

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Yang relevan

Belum banyak penelitian yang membahas terkait komparasi pengujian *HV Test* metode *Reverse* Menggunakan Trafo Daya eksisting dengan sistem tegangan *step up* 20 kV ke 150 kV dari trafo eksisting. Beberapa penelitian yang berhubungan dengan pengujian tegangan tinggi adalah sebagai berikut :

- a. Jurnal dengan judul “ Analisis Gangguan Pada Sistem Gardu Listrik Berbasis *Gas Insulated Switchgear* 150 Kv Dengan Metode *High Voltage Test*” oleh Karel Octavianus Bachri.[4] Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis gangguan dan memastikan integritas sistem isolasi pada *Gas Insulated Switchgear* (GIS) 150 kV di Gardu induk Tigaraksa II menggunakan Metode High Voltage Test (*HV Test*), sesuai dengan standar internasional IEC 62271-203. Metode pengujian yang diterapkan melibatkan dua tahapan utama: Pengukuran *Insulation Resistance* (IR) dan Pengujian *HV Test*. Pengukuran IR, yang dilakukan menggunakan *Megger MIT1025*, bertujuan untuk memastikan kualitas isolasi pada setiap fasa (R, S dan T) di mana hasilnya wajib melampaui standar minimum 5 M Ω . Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai resistansi isolasi pada sistem GIS jauh di atas ambang batas (contohnya, fasa R sebelum *HV Test* adalah 62.4 M Ω), yang mengindikasikan sistem isolasi berada dalam kondisi prima dan proses *HV Test* dapat dilanjutkan. Pengujian *HV Test* sendiri dilakukan dalam dua langkah: kondisi elektrik (*electrical conditioning*) selama 5 menit pada tegangan 87 kV, dan dilanjutkan dengan uji tegangan penuh (*test voltage*) selama 1 menit pada tegangan maksimum 270 kV. Hasil akhir dari *HV Test* menegaskan bahwa sistem GIS, termasuk seluruh komponennya, berfungsi dengan baik dan mampu mengisolasi energi listrik tanpa menunjukkan adanya arus bocor pada ketiga fasa, sehingga menjamin stabilitas dan keamanan operasional gardu induk.
- b. Penelitian ini berjudul “*Analisa Pengujian Tegangan Tembus Menggunakan Applied Potensial Test Pada Current Transormator Unit CT/VT*” oleh Didik Ariwibowo.[5] Menganalisis pengujian tegangan

tembus (breakdown voltage) pada *Current Transformer* (CT) dengan menggunakan metode *Applied Potential Test* (APT) di PT. Trafoindo Prima Perkasa, dengan tujuan menguji ketahanan isolasi jarak aman (P-S, P-E, S-E) sesuai standar IEC 60044-1. APT adalah pengujian tegangan tinggi (high voltage) yang berfungsi untuk mencegah kegagalan isolasi jarak yang disebabkan oleh kesalahan pemasangan pada proses *moulding*. Dalam pengujian di perusahaan tersebut, trafo arus untuk jaringan distribusi 50 kV diuji dengan tegangan 55 kV (nilai isolasi 50 kV dinaikkan 10% sesuai standar perusahaan) selama 60 detik. Kriteria kelulusan utama adalah nilai arus bocor yang dihasilkan harus stabil dan tidak lebih dari 7 mA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai isolasi yang lebih kecil menghasilkan nilai arus bocor yang lebih baik, dengan trafo berisolasi rendah (misalnya, nilai isolasi kurang dari 28) terbaca nilai arus bocor 0 mA. Kegagalan uji APT sebagian besar disebabkan oleh kurangnya ketelitian pekerja produksi pada proses *moulding*, yang mengakibatkan jarak antar coil (P-S, P-E, S-E) tidak sesuai desain, serta proses casting resin yang tidak tercetak dengan baik (misalnya, resin lembab atau keropos akibat pencampuran bahan yang berlebihan atau proses oven yang tidak tepat), yang memungkinkan terjadinya tegangan tembus. Oleh karena itu, penelitian menyimpulkan bahwa proses *moulding* sangat berpengaruh terhadap keberhasilan produk dalam APT, dan penentuan jarak antar belitan harus benar-benar sesuai dengan desain yang telah ditentukan.

- c. Penelitian ini berjudul “*Comparison of Insulation Cable Voltage Withstand Testing Requirement Using Very Low Frequency Test Methods According to IEC and IEEE Standards*” oleh Nataworn Sinsupa et.al.,2024, Dimana Pengujian tegangan tahan isolasi kabel yang dipasang pada sistem kelistrikan bertegangan tinggi (22 kV dan 33 kV) merupakan langkah penting untuk menjamin keandalan, keselamatan, dan stabilitas sistem. Saat ini, pengujian tegangan tahan isolasi kabel dapat dilakukan menggunakan pengujian Arus Bolak-balik Frekuensi Sangat Rendah (*Very Low Frequency / VLF*), yang diakui oleh standar internasional. Standar utama yang mengatur penggunaan VLF untuk pengujian kabel adalah IEC 60502-

2:2014, IEC 60060-3:2006, dan IEEE 400.2:2013. Selain berfungsi sebagai pengujian tegangan tahan, VLF juga dapat digunakan untuk mengukur faktor rugi-rugi dielektrik (*tan delta*) untuk menilai kondisi isolasi kabel serta mengukur tingkat peluahan parsial (*partial discharge*). Oleh karena itu, VLF telah diterima luas oleh banyak utilitas listrik. Artikel ini menyajikan perbandingan signifikan antara persyaratan standar IEC dan IEEE dalam pengujian tegangan tahan isolasi kabel menggunakan VLF untuk sistem distribusi 22 kV dan 33 kV. Perbandingan tersebut mencakup perbedaan dalam persyaratan seperti bentuk gelombang tegangan, tingkat tegangan uji, dan durasi pengujian untuk berbagai skenario, bertujuan untuk membantu operator memilih metode pengujian yang paling tepat.

2.2. Komponen Sistem Kelistrikan Gardu Induk SF₆

Gas Insulated Switchgear (GIS) adalah perangkat terpadu (*compact*) yang terdiri dari gabungan beberapa komponen. Komponen-komponen ini ditempatkan dalam selungkup logam (*metallic housing*) yang terhubung ke tanah, dengan gas SF₆ (*Sulfur Heksafluorida*) sebagai media isolasi utama. Secara umum, GIS mencakup komponen-komponen seperti *busbar*, pemisah (*disconnecter*), *circuit breaker* dan peralatan pendukung lainnya.[6]

Menurut standar IEC 62271-203, GIS termasuk dalam kategori *Metal-enclosed switchgear and controlgear*, yaitu peralatan *switchgear* dan *controlgear* yang dipasang dalam selungkup logam yang ditanahkan dan sudah lengkap, hanya menyisakan bagian untuk koneksi eksternal. Dimana GIS juga dapat diintegrasikan dengan peralatan *Air Insulated Switchgear* (AIS).[7]

Instalasi GIS pada gardu induk umumnya mencakup komponen-komponen inti, yang menyesuaikan dengan konfigurasi instalasi, seperti:

- Busbar
- *Switchgear*
- Pemisah pentanahan (*earthing switch*)
- Pemisah (*disconnecter*)
- Perangkat pengukuran (seperti Trafo Tegangan/VT dan Trafo Arus/CT)
- Kabel *sealing end* atau *air bushing* untuk sambungan luar.

Perkembangan teknologi telah menghasilkan kombinasi peralatan AIS dan GIS yang dikenal sebagai *Mixed-Technology Switchgear* (MTS). MTS menjadi solusi ideal untuk desain gardu induk dengan keterbatasan area, karena peralatan ini memiliki dimensi yang lebih ringkas dibandingkan dengan AIS. Karena komponen yang digunakan dalam MTS serupa dengan GIS, beberapa standar yang berlaku untuk GIS dapat diterapkan juga pada MTS.



Gambar 2.1 *Mixed Technology Switchgear* di GIS Durentiga (Sumber: Dokumen Pribadi)

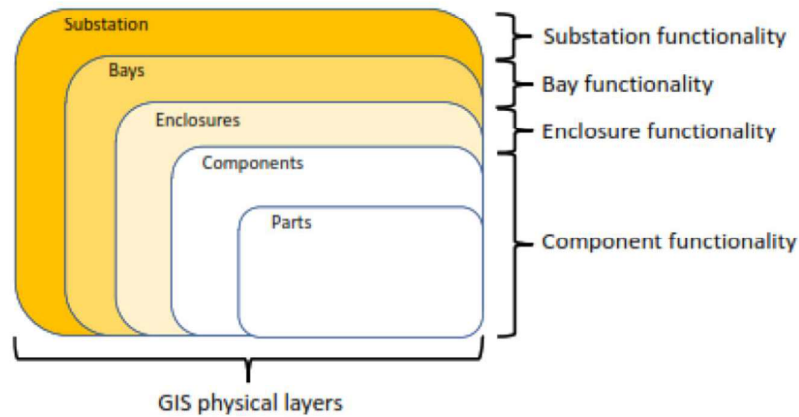
Menurut publikasi CIGRE *Technical Brochure* (TB) 858:2021, *Gas Insulated Switchgear* (GIS) dapat diuraikan menjadi beberapa elemen, yaitu bay, *enclosure*, komponen (*component*) dan *parts*. Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan lapisan hirarki atau *hierarchical layer* dari GIS. GIS dapat dilihat dari dua perspektif: lapisan fisik (secara horizontal) dan lapisan fungsional (secara vertikal).

Secara fungsional, GIS umumnya dibagi menjadi empat (4) lapisan utama, diurutkan dari hierarki paling atas ke bawah:

1. Gardu Induk (*Substation*)
2. Bay
3. *Enclosure*
4. Komponen (*Component*)

Setiap lapisan yang lebih rendah berfungsi sebagai subsistem bagi lapisan yang berada di atasnya. Selanjutnya, lapisan komponen itu sendiri terdiri dari subsistem

yang dikelompokkan berdasarkan sub-fungsi spesifiknya. Sementara itu, secara fisik, sebuah komponen tersusun dari berbagai macam parts.

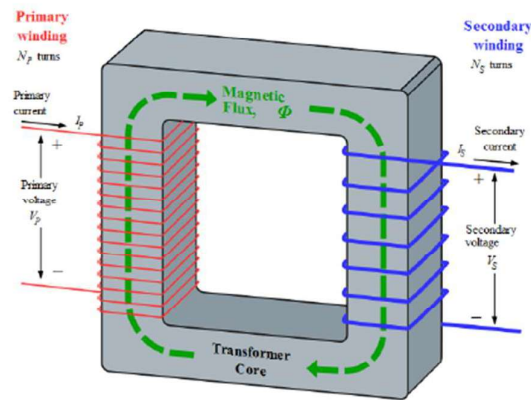


Gambar 2.2 Lapisan (*Layer*) Hierarki GIS (*Sumber: Kepdir 520*)

2.3. Transformator Daya

Pada Transformator (Trafo) adalah perangkat statis yang berfungsi mentransformasikan daya (arus dan tegangan) dari satu sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama, melalui mekanisme induksi elektromagnetik. Peralatan ini terdiri dari dua atau lebih belitan (kumparan) serta rangkaian magnetik.[8]

Trafo bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik, yang melibatkan Hukum Ampere dan Induksi *Faraday*. Prinsip ini menyatakan bahwa arus listrik atau medan listrik yang berubah dapat menghasilkan medan magnet, dan sebaliknya, perubahan fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi.



Gambar 2.3 Elektromagnetik Pada Transformator Daya (*Sumber : Buku Transformer And Inductor Design Handbook karya Colonel Wm. T. Mclyman*)

Secara operasional, arus AC yang melewati belitan primer akan menghasilkan *fluks* magnet yang merambat melalui inti besi yang menghubungkan kedua belitan. *Fluks* magnet ini kemudian akan menginduksi belitan sekunder, yang pada akhirnya menghasilkan beda potensial atau tegangan induksi pada ujung-ujung belitan sekunder tersebut.

2.4. OLTC (*On Load Tap Changer*)

Kualitas tegangan dalam suatu jaringan listrik sangat bergantung pada kestabilan tegangan. Transformator (Trafo) dituntut untuk menghasilkan tegangan *output* yang stabil meskipun tegangan *input* (primer) yang diterimanya tidak selalu konstan.

Untuk mencapai hal ini, Trafo dilengkapi dengan perangkat yang disebut Tap Changer. Alat ini berfungsi untuk menyesuaikan rasio jumlah belitan antara sisi primer dan sekunder. Dengan mengubah rasio belitan tersebut, tegangan *output* (sekunder) dapat diatur dan disesuaikan dengan kebutuhan sistem, terlepas dari variasi tegangan *input* (primer).[9]

Proses penyesuaian rasio belitan oleh Tap Changer dapat dilakukan melalui dua cara:

1. *On-Load Tap Changer* (OLTC): Perubahan rasio belitan dilakukan saat Trafo sedang beroperasi atau berbeban.

2. *Off-Circuit Tap Changer* (disebut juga *De-Energize Tap Changer/DETC*): Perubahan rasio belitan dilakukan saat Trafo tidak beroperasi atau tidak berbeban.

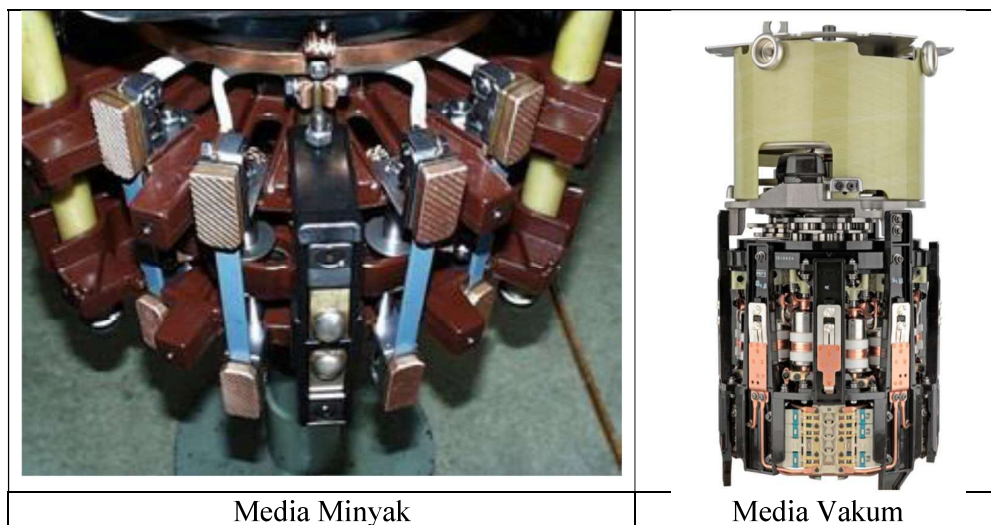
On-Load Tap Changer (OLTC) memiliki beberapa komponen utama:

- *Selector Switch*: Merupakan susunan mekanis yang memiliki terminal-terminal yang berfungsi untuk menentukan posisi *tap* atau rasio belitan primer yang diinginkan.
- *Diverter Switch*: Ini adalah rangkaian mekanis yang secara khusus dirancang untuk membuat atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang sangat tinggi selama proses perubahan *tap*.
- Tahanan Transisi: Merupakan resistor yang digunakan sementara untuk dilewati oleh arus primer ketika proses perubahan *tap* sedang berlangsung.

Mengingat aktivitas OLTC jauh lebih dinamis dibandingkan komponen utama trafo lainnya (seperti belitan utama dan inti besi), maka kompartemen OLTC dipisahkan dari kompartemen belitan utama untuk menjaga integritas isolasi.[10]

Proses *switching* pada *Diverter Switch* menghasilkan *arcing* (busur api) yang harus dipadamkan. Media pemadam *arcing* yang umum digunakan saat ini terbagi menjadi dua jenis:

1. Media Minyak (*Oil Media*): Pemadaman busur api menggunakan minyak akan menyebabkan energi *arcing* menguraikan minyak, menghasilkan gas seperti asetilena C_2H_2 dan karbon. Akibatnya, minyak pelumas perlu diganti secara berkala.
2. Media Vakum (*Vacuum Media*): Metode ini melokalisasi proses pemadaman *arcing* selama *switching* sehingga tidak merusak minyak isolasi yang ada.



Gambar 2.4 Media pemadam *Arcing Pada OLTC* (Sumber : *Buku Pengujian Tegangan Tinggi karya Ade Syuhada*)

2.5. Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT)

Seiring dengan perkembangan wilayah, terutama di perkotaan yang sulit mencari lahan untuk membangun menara transmisi, Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) atau Saluran Kabel Tegangan Ekstra Tinggi (SKTET) menjadi solusi utama untuk mendistribusikan energi listrik dari pusat pembangkit ke konsumen. Selain itu, kabel juga vital untuk menghubungkan tenaga listrik antar pulau melalui Saluran Kabel Laut Tegangan Tinggi (SKLT). Berdasarkan letaknya, kabel tegangan tinggi dibagi menjadi Kabel Tanah (di bawah tanah) dan Kabel Laut (melintasi atau berada di dasar air). Berdasarkan material dielektriknya, kabel tegangan tinggi dapat diklasifikasikan menjadi dua yakni sebagai berikut :

- Kabel Minyak (memakai isolasi kertas minyak).
- Kabel Kering (XLPE) (memakai isolasi *Crosslinked Polyethylene*).

Kabel yang digunakan untuk SKTT/SKTET dan SKLT umumnya adalah kabel berisolasi kertas yang diberi minyak disebut Kabel Minyak. Kabel Minyak ini juga masih banyak ditemukan pada saluran kabel lama sedangkan untuk kabel berisolasi *Crosslinked Polyethylene* (XLPE), yang populer sebagai Kabel Kering banyak terpasang pada saluran kabel pasangan baru.[11]

2.5.1. Komponen dan Fungsi Sistem SKTT/SKTET & SKLAT

Sistem SKTT/SKTET dan SKLT dapat dibagi menjadi sub-sub sistem seperti dalam Tabel 2.1 Dibawah ini :

Tabel 2.1 Pembagian sub sub sistem pada sistem SKTT/SKTET dan SKLT

NO	NAMA SUB SISTEM	KABEL XLPE	KABEL MINYAK
1	Sub Sistem Penyalur Arus		
	a. Konduktor	Ada	Ada
	b. Terminasi	Ada	Ada
	c. Sambungan	Ada	Ada
2	Sub Sistem Isolasi		
	a. Isolasi Padat	Ada	Ada
	b. Isolasi Cair	Tidak Ada	Ada
	c. Isolasi Gas	Ada	Ada
3	Pelindung Mekanik		
	a. <i>Lead Sheat</i>	Ada	Ada
	b. <i>Beding</i>	Ada	Ada
	c. <i>Armour Rod</i>	Ada	Ada
	d. <i>Black PE (Poly Ethelene)</i>	Ada	Ada
	e. <i>Flange Sealing End</i> (Untuk Ventilasi)	Ada	Ada
	f. <i>Mekanical Structure</i> Pada <i>Sealing End</i>	Ada	Ada
	g. <i>Compound</i>	Ada	Ada
	h. <i>Outer Case</i>	Ada	Ada
	i. <i>Joint Box</i>	Ada	Ada
	j. <i>Cable Duct</i>	Ada	Ada
	k. Jembatan Kabel	Ada	Ada
4	Pelindung Elektrik		
	a. <i>Electrostatic Screen</i>	Ada	Ada
	b. Sistem Pentanahan	Ada	Ada
	c. <i>Kabel Coaxial</i>	Ada	Ada
5	Pendingin		
	a. Minyak	Tidak Ada	Ada
	b. Kanal Minyak/ <i>Oil Duct</i>	Tidak Ada	Ada
	c. Tangki Minyak	Tidak Ada	Ada
	d. Pipa Minyak	Tidak Ada	Ada
6	Pengaman Kabel		

	a. <i>Wiring Sistem Proteksi</i> - <i>Manometer</i> dan pipa/ <i>napple</i> saluran minyak - Tangki - Kabel Pilot/ <i>Pilot Cable</i> - <i>Fiber Optic (FO)</i>	Tidak Ada Tidak Ada Ada Ada	Ada Ada Ada Tidak Ada
	b. <i>SVL / Arester Sistem</i>	Ada	Ada
	c. <i>Pelindung Anti rayap/Anti Termite</i>	Ada	Ada
	d. <i>Anti Corrosion Covering (ACC)</i>	Ada	Ada
	e. <i>Cable Covering Protection Unit</i>	Ada	Ada
	f. (CCPU)	Ada	Ada
	Sarana Pendukung		
7	a. Pagar	Ada	Ada
	b. Patok dan rambu-rambu	Ada	Ada
	c. Rumah Tangki	Tidak Ada	Ada
	d. <i>Man Hole Box Joint</i>	Ada	Ada
	e. <i>CCTV kabel Laut</i>	Sarana Pendukung SKLT	
	f. <i>Sokle</i>		
	g. <i>Pelampung (Buoy)</i>		
	h. Rambu Suar		
	i. <i>Vessel Trafic Monitoring System</i>		
	j. <i>Radar</i>		

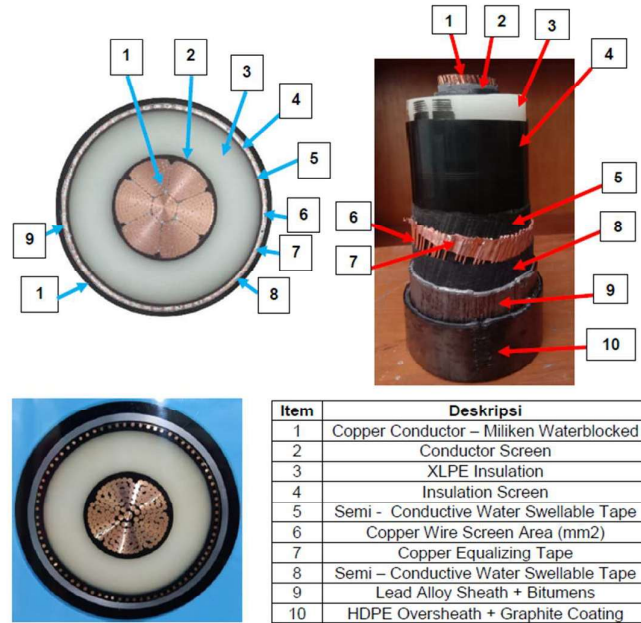
2.5.2. Sub Sistem Penyalur Arus (*Current Carrying*)

a. Konduktor

Subsistem penyalur arus berfungsi sebagai media utama untuk mengalirkan arus listrik dalam Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT). Komponen utama dari subsistem ini adalah Konduktor, yang umumnya terbuat dari tembaga atau aluminium. Pemilihan material didasarkan pada pertimbangan kemampuan menahan arus beban (*rating*) dan aspek keekonomisan.

Untuk transmisi energi listrik tegangan tinggi, sering digunakan konduktor jenis *Milliken*. Konduktor ini memiliki konstruksi yang umumnya terdiri dari enam segmen berpilin (*Six Stranded Segmen*) yang saling terisolasi. Segmen-segmen ini tersusun melingkari sebuah kanal (saluran) yang biasanya berisi spiral penyangga, dan disatukan oleh pita *Bronze*.

Pada konduktor *Milliken*, karena masing-masing sektor secara otomatis di *transposed*, maka pembesaran diameter kanal dapat mengurangi pengaruh *skin* efek cukup banyak. Nilai rugi-rugi akibat *skin* efek untuk konduktor *cooper Milliken* cukup rendah yaitu untuk diameter 2500 mm² pada 850°C dan 25 mm kanal adalah 14%. Nilai rugi-rugi akibat *skin* efek yang rendah dapat dicapai dengan konduktor yang disusun elemen terisolasi satu dengan yang lainnya menggunakan *enamel*.



Gambar 2.5 Struktur dan Fisik Konduktor Miliken (*Sumber : Buku Pedoman Pemeliharaan SKTT/SKLT, PLN*)

b. Terminasi / *Sealing End*

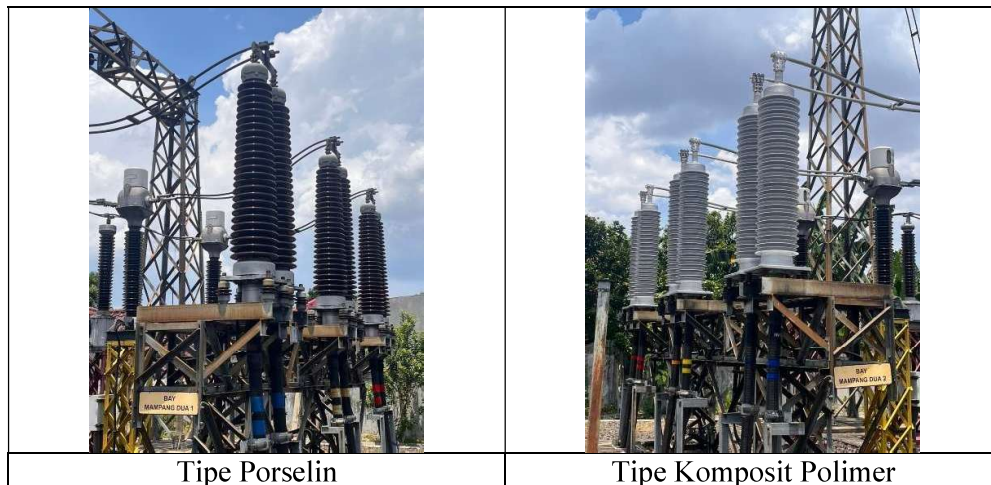
Terminasi kabel, atau dikenal sebagai *Sealing End* atau kepala kabel, berfungsi sebagai titik sambungan kritis yang menghubungkan ujung kabel tenaga dengan aset gardu induk lainnya, seperti *Gas Insulated Switchgear* (GIS) atau *Cable Head* konvensional. Fungsi utama komponen ini adalah mengelola gradien tegangan dielektrik di ujung kabel. Di area transisi ini, *sealing end* harus mengurangi tekanan dielektrik yang tinggi (yang dapat mencapai ribuan volt per milimeter secara radial di dalam insulasi kabel) menjadi tingkat yang jauh lebih rendah di permukaan luar (beberapa ratus volt per milimeter).

Desain fisik *sealing end* memastikan isolasi yang rapat dan pemisahan elektrik antara ujung konduktor dan selubung logam (*sheath*). Terminasi ini harus memiliki kekuatan tahan tegangan uji kabel yang memadai, sekaligus memiliki tingkat tegangan *impuls* yang tinggi untuk menahan *Transien* Tegangan Lebih. Untuk isolasi eksternal, material yang umum digunakan adalah porselin atau komposit, yang diformulasikan sebagai jenis *antifog* agar tahan terhadap kondisi cuaca ekstrem dan polusi.

Terminasi yang dirancang untuk direndam dalam minyak (terutama untuk sambungan ke transformator daya) harus mampu beroperasi secara stabil di bawah tekanan minyak tinggi. Khusus untuk kabel yang memasuki GIS, terminasi sering kali dilengkapi dengan *insulator voltalit* atau porselin khusus, yang menawarkan kekuatan mekanik superior. *Sealing end* jenis ini dipasang pada boks kabel yang terangkai dengan transformator melalui bushing, suatu susunan yang memfasilitasi pelepasan transformator tanpa perlu memutus kabel dan memudahkan pemeriksaan minyak pada boks tersebut. Untuk kabel inti tiga (*tri-core*), digunakan *splitter boks* untuk memisahkan inti-inti kabel sebelum masing-masing terhubung ke *sealing end* individual.

Secara material, terdapat beberapa tipe utama *sealing end* yang digunakan untuk Kabel XLPE (*Cross-linked Polyethylene*):

1. Tipe Porselin Berisi Minyak: Menggunakan porselin sebagai isolator utama dengan tambahan minyak silikon, baik bertekanan maupun tanpa tekanan, untuk meningkatkan karakteristik dielektrik internal.



Gambar 2.6 Tipe Sealing End di GIS Durentiga (Sumber : Dokumentasi Pribadi)

2. Tipe Porselin Kering: Mengandalkan porselin sebagai isolasi utama tanpa penambahan media cair.
3. Tipe Komposit Kering: Menggunakan material komposit polimer yang lebih ringan, menawarkan kinerja unggul terhadap polusi, dan tidak memerlukan media minyak tambahan.

c. Sambungan / *Jointing*

Joint atau sambungan kabel berfungsi untuk menghubungkan dua ujung kabel. Berdasarkan kondisi koneksi isolasi minyak antara kedua ujung kabel, sambungan dibedakan menjadi empat jenis:

- Sambungan Lurus (*Straight Joint*)

Pada Sambungan Lurus, media minyak isolasi pada kedua ujung kabel saling terhubung. Tipe *Straight Joint* yang memiliki area lentur dikenal sebagai *Flexible Joint*. Dalam proses penyambungan, konduktor aluminium disambung menggunakan pengelasan atau pengecoran. Saat penyambungan, tekanan minyak di ujung kabel harus dijaga tetap rendah. Masing-masing ujung kabel memiliki kotak tekanan minyak dengan katup pengatur, memastikan minyak terus meresapi isolasi kertas selama pekerjaan berlangsung. Untuk kabel tipe lain, sirkulasi pendingin dan isolasi menggunakan kanal minyak spiral baja yang dipasang di pusat konduktor agar minyak terus menekan isolasi kertas (*Impregnated paper*).

- Sambungan Henti (*Stop Joint*)

Sambungan Henti digunakan pada kabel minyak di mana media minyak pada kedua ujung kabel tidak terhubung dan dipisahkan oleh insulated joint. Pada *Oil Filled Cable (OFC)*, *Stop Joint* berfungsi membagi sirkuit kabel menjadi seksi-seksi tekanan minyak yang terpisah, dan setiap seksi dilengkapi dengan peralatan untuk mengakomodasi ekspansi minyak. Tujuan dari pemisahan ini adalah untuk membatasi tekanan minyak agar tidak melampaui batas aman (*Over Pressure*) dan membagi panjang kabel menjadi seksi-seksi yang lebih pendek guna memudahkan pekerjaan pemeliharaan.

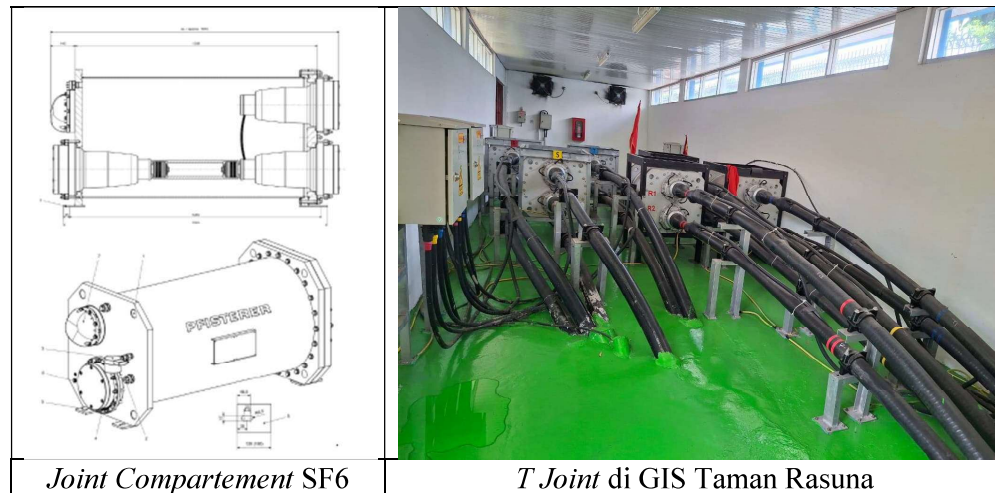
- Sambungan Transisi (*Transition Joint*)

Sambungan Transisi digunakan untuk menghubungkan dua jenis kabel yang berbeda, yaitu sambungan antara kabel jenis minyak dan kabel jenis XLPE. Sistem

pada *Transition Joint* hampir sama dengan *Stop Joint*, di mana minyak pada sisi kabel minyak dihentikan (distop) pada sambungan tersebut dan dilengkapi dengan peralatan untuk ekspansi minyak.

- *T Joint*

T Joint adalah sambungan yang digunakan untuk memecah satu kabel menjadi dua kabel. Sambungan ini biasanya diaplikasikan pada kabel jenis XLPE dan menggunakan jenis sambungan yang sama.



Gambar 2.7 *T Joint* di GIS Taman Rasuna (Sumber : Dokumentasi Pribadi)

2.5.3. Sub Sistem Isolasi

Secara umum, bagian konduktif dari peralatan listrik harus aman bagi pengguna. Oleh karena itu, bagian-bagian ini ditutup atau dilapisi dengan bahan isolasi.

Fungsi utama isolasi pada kabel adalah untuk mencegah aliran listrik dari konduktor yang beroperasi ke tanah atau ke konduktor lain yang berada di dekatnya. Karena isolasi berperan memisahkan bagian-bagian yang bertegangan, sifat kelistrikan dari bahan tersebut menjadi sangat krusial. Isolasi yang dianggap ideal harus memiliki kriteria dan sifat-sifat sebagai berikut:

1. Ketahanan Dielektrik Tinggi: Harus mampu menahan tekanan listrik (*stress*) yang ditimbulkan oleh tegangan bolak-balik (AC).
2. Resistivitas Tinggi: Memiliki tahanan jenis yang tinggi untuk meminimalkan kebocoran arus.

3. Ketahanan Terhadap Kelembapan: Bersifat *non-higroskopis* (tidak menyerap air atau uap air).
4. Fleksibilitas: Mudah dibengkokkan, yang menjadikannya fleksibel untuk instalasi.
5. Ketahanan Api: Tidak mudah terbakar.
6. Ketahanan Impuls: Sanggup menahan tegangan impuls yang tinggi (misalnya, akibat sambaran petir).
7. Stabilitas Termal: Dapat bekerja secara efektif pada rentang suhu yang luas, baik suhu rendah maupun suhu tinggi.

Berikut bagian-bagian dari sub sistem Isolasi yang terdapat pada Saluran Kabel Tegangan Tinggi.

1. Kertas

Kabel SKTT menggunakan jenis isolasi padat yang terdiri dari kertas selulosa (*Cellulose Paper*) yang dililitkan pada konduktor. Kertas tersebut kemudian diresapi dengan *Viscose Compound* dan melalui proses treatment untuk menghilangkan kelembaban serta udara, menghasilkan dinding isolasi yang rapat dan seragam.

Isolasi kertas ini harus dibentuk dengan ketebalan yang seragam, rapat (tidak mengerut), dan tidak mengalami kerusakan selama proses produksi. Meskipun demikian, pengawasan ketat tetap diperlukan saat instalasi di lapangan, terutama terkait pembengkokan, tarikan, dan kelembaban.

Kertas isolasi yang digunakan dipilih berdasarkan kemurnian dan keseragaman yang tinggi, dan dicuci menggunakan air deionisasi saat pembuatannya. Ketebalan kertas bervariasi disesuaikan dengan kebutuhan tegangan; kertas yang lebih tipis, yang memiliki kekuatan dielektrik tinggi tetapi kekuatan mekanik rendah, ditempatkan paling dekat dengan konduktor. Kerapatan kertas juga dipilih secara saksama agar tercapai kekuatan dielektrik tertinggi dan kompatibel dengan metode *impregnasi* lainnya.

Secara umum, ketebalan isolasi kertas ini bervariasi, mulai dari 3 mm untuk tegangan 30 kV hingga 35 mm. Untuk tegangan yang sangat tinggi (khususnya 750 kV sampai 1000 kV), isolasi kertas tebal ini digabungkan dengan sistem minyak bertekanan tinggi. Untuk menjaga nilai isolasi kertas maka diberi tekanan 1 s/d 5

atm. Isolasi jenis ini digunakan untuk instalasi kabel dengan tegangan tinggi supaya menaikkan *Dielektrik Strength* Isolasi.

2. XLPE (*cross-link polyethylene*)

Kabel yang menggunakan isolasi *Cross-Linked Polyethylene* (XLPE), didukung oleh teknologi manufaktur yang canggih, memungkinkan penggunaannya pada tingkat tegangan yang semakin tinggi. Perkembangan ini terus berlanjut hingga diproyeksikan bahwa kabel XLPE akan menggantikan kabel isolasi minyak tegangan 275 kV. Secara umum, kabel XLPE memiliki keunggulan berupa berat yang ringan, kemampuan termal yang superior, dan biaya instalasi yang lebih hemat dibandingkan kabel minyak. Selain itu, jika terjadi kerusakan, perbaikan kabel XLPE jauh lebih mudah dan murah.

- Karakteristik Termal XLPE

Berkat proses *cross-linking*, XLPE adalah material yang tahan panas. Berbeda dengan *polyethylene* biasa yang dapat meleleh, XLPE akan terurai dan membentuk karbon hanya jika terpapar suhu di atas 300°C dalam waktu lama. Suhu konduktor yang diizinkan saat terjadi hubung singkat (selama 1 detik) adalah 250°C sementara suhu maksimum pada beban berkelanjutan (*kontinyu*) adalah 90°C.

- Karakteristik Elektris XLPE

Sifat kelistrikan baik yang dimiliki oleh *polyethylene* tidak berubah selama proses *cross-linking*. Oleh karena itu, XLPE memiliki faktor disipasi (*tan delta*) yang sangat kecil dan hanya bergantung pada suhu serta konstanta dielektrik. Hasilnya, rugi-rugi dielektrik pada kabel XLPE jauh lebih kecil dibandingkan dengan PVC atau kabel isolasi minyak. Keunggulan ini membuat kabel XLPE sangat ideal untuk digunakan pada rute kabel yang panjang dan bertegangan tinggi, di mana rugi-rugi listrik menjadi pertimbangan utama.

- Karakteristik Mekanis XLPE

XLPE mewarisi sifat mekanik yang baik dari *polyethylene*. Pada suhu normal, XLPE mampu menahan tegangan lokal (*local stress*) lebih baik daripada PVC. Isolasi XLPE juga menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap abrasi dibandingkan *polyethylene* biasa. Karena sifat mekaniknya yang unggul, diprediksi bahwa kabel XLPE akan semakin dominan menggantikan kabel konvensional di masa depan.

- Karakteristik Kimia XLPE

Tahanan Cross-linking dari molekul XLPE lebih baik dari pada PE, dari aspek lingkungan PVC maupun kabel minyak mempunyai kerugian yang jelas, jika kabel PVC terbakar akan memberikan gas-gas yang korosi dan kabel minyak jika bocor akan merusak suplai air. Penggunaan XLPE pada kabel tegangan rendah dapat dibuat tahan terhadap rambatan api dan kompon tidak menghasilkan halogen.

3. *Bushing*

Bushing yang terbuat dari keramik atau komposit berperan sebagai bahan isolasi yang sangat penting. Bahan dasar dari porselen adalah tanah liat. Dalam proses pembuatannya, porselen dilapisi dengan glazur (lapisan kaca atau gelas) . Pelapisan ini berfungsi untuk mengurangi arus bocor yang mengalir di permukaan isolator, terutama ketika dalam kondisi basah.

4. *Heat Shrink*

Isolasi *Heat Shrink* (ciut panas) berfungsi sebagai pelindung pada terminasi sambungan (joint) maupun sealing end terhadap korosi (*Anti Corrosion Protection*). Bahan yang digunakan dapat berupa Adhering Layer Covered atau PVC, tergantung jenis kabelnya. Isolasi ini dipasang pada bagian terluar kabel dan pemasangannya dilakukan dengan cara dipanaskan sehingga menyusut (ciut) dan melekat rapat.

5. *Compound*

Compound adalah material pengisi yang digunakan pada setiap tabung sambungan (joint). Fungsi utamanya adalah untuk mengisolasi sambungan tersebut dari selungkup logam sambungan (*metal case joint*) atau dari tanah (*ground*).

6. *Minyak Impregnated*

Pada kabel yang menggunakan selubung logam (timah atau aluminium) untuk tegangan lebih dari 50 kV, minyak isolasi berfungsi krusial untuk mencegah kegagalan isolasi yang disebabkan oleh Void (rongga udara). Void ini terbentuk selama konstruksi atau akibat pemuaian termal (*Heat Cycling*) dan tekanan tegangan tinggi, yang kemudian memicu ionisasi yang merusak isolasi.

Untuk menghilangkan *void* ini, kabel diimpregnasi penuh dengan minyak yang memiliki viskositas rendah. Kabel *Self-Contained Oil Filled* dirancang untuk beroperasi pada tekanan rendah (di atas tekanan udara luar). Minyak ini berfungsi

sebagai sistem termal: ia mengalir keluar menuju reservoir saat kabel memanaskan, dan kembali lagi ketika suhu kabel menurun. Minyak kabel adalah komponen vital yang harus memenuhi karakteristik spesifik :

- *Viskositas* (Kekentalan)

Viskositas minyak sangat penting untuk sistem hidrolik kabel. Nilainya harus serendah mungkin agar kompatibel dengan titik nyala dan titik tuang. Viskositas yang rendah memungkinkan operasi pada suhu ekstrem dan membantu mengurangi jumlah titik pasokan minyak, sehingga desain sistem lebih ekonomis.

- Koefisien Muai Termal

Koefisien ekspansi panas menentukan aliran minyak dan ukuran ruang yang diperlukan untuk ekspansi termal (*ruangan ekspansi*). Karakteristik ini juga mempengaruhi tekanan dinamik, yang pada gilirannya memengaruhi desain diameter kanal minyak dan jenis tangki pemuai.

- Sifat Kelistrikan

Tegangan Tembus (*Breakdown Voltage*): Minyak harus memiliki tegangan tembus yang tinggi selain itu juga perlu diperhatikan nilai $\tan\delta$ Pengukuran $\tan\delta$ adalah cara terbaik untuk memeriksa kemurnian minyak. Cairan isolasi yang baik harus memiliki nilai $\tan\delta$ yang rendah. Kenaikan $\tan\delta$ menunjukkan adanya kontaminasi berbahaya seperti air, produk penuaan, debu, atau sisa pelumas.

- Penyerapan Gas (*Gas Absorption*)

Minyak isolasi harus mampu menyerap gas yang mungkin terbentuk akibat tekanan listrik (electrical stress). Jika gas tidak terserap, gelembung-gelembung gas akan terbentuk.

- Pelepasan Gas (*Degassifying*)

Untuk menjadi cairan isolasi yang ideal, minyak harus bebas dari gas dan kontaminasi. Proses degassifying dilakukan dengan menghamparkan minyak di ruang vakum, memungkinkan gas dan air menguap

2.5.4. Sub Sistem Pelindung Mekanik

Berikut ini merupakan bagian-bagian Pelindung Mekanik yang mampu menahan kabel dari faktor eksternal akibat dorongan mekanis:

- *Lead Sheath*

- Bantalan/*Bedding*
- *Armour Rod*
- *Black PE (Poly Ethelene)* dan *Inner Sheath*
- *Flange Sealing End* (untuk Ventilasi)
- *Mechanical Structure* pada *Sealing End*
- *Outer Case*
- *Joint Box*
- *Cable Duct*
- Jembatan Kabel

2.5.5. Sub Sistem Pelindung Elektrik

Kabel mengalami stress elektrik yang ditimbulkan oleh tegangan induksi konduktor ke komponen logam pada kabel. Tegangan induksi ini dapat menimbulkan arus induksi yang menyebabkan panas, baik pemanasan lokal maupun rugi panas dalam proses transfer daya. Komponen-komponen yang termasuk pelindung elektrik adalah sebagai berikut:

- *Electrostatic Screen*

Electrostatic sreen dipasang pada konduktor dan isolasi kabel minyak tegangan tinggi. *Screen* ini berguna untuk mendistribusikan *stress electric* pada kabel secara radial, hal ini untuk menghindari timbulnya stress secara longitudinal dan terkonsentrasi pada permukaan yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi.

- Sistem Pentanahan

Sistem pentanahan memiliki fungsi utama menghilangkan arus selubung logam yang diakibatkan oleh induksi pada konduktor yang dapat menimbulkan rugi panas. Terdapat 2 jenis system pentanahan pada saluran kabel tegangan tinggi yakni sebagai berikut :

- Sistem pentanahan menggunakan *crossbonding* :
- Sistem Pentanahan Dengan Penggabungan Selubung Logam Pada Kedua Ujung
- Konstruksi *Single Poin Bonding*
- Konstruksi *Solid Bonding*
- Konstruksi *Sheath – Cross Bonding*

- Konstruksi Transposisi *Crossbonding*
- Konstruksi Transposisi dan sambung silang

2.5.6. Pengujian Elektris menurut SPLN T3.006-1: 2015

Pengujian dilakukan untuk menunjukkan integritas dari sistem kabel ketika dipasang. Pengujian pada instalasi dilakukan setelah instalasi sistem kabel sudah selesai sesuai dengan konstruksi yang telah ditentukan. Pengujian yang wajib untuk dilakukan adalah pengujian selubung luar dengan tegangan DC sesuai dengan *IEC 60840 klausul 16.2*. Pengujian insulasi dengan tegangan AC juga diperlukan.

Untuk instalasi dimana hanya pengujian selubung luar yang dapat dilakukan, maka prosedur *quality assurance* dapat menggantikan pengujian insulasi. Hasil dari prosedur *quality assurance* dapat digunakan sebagai dasar penerbitan rekomendasi layak bertegangan pada instalasi sistem kabel untuk pengujian insulasi dengan tegangan AC pada U_0 selama 24 jam dengan menggunakan tegangan dari sistem.

Prosedur *quality assurance* dapat terdiri dari dan tidak terbatas pada:

1. Pengukuran tan delta;
2. Pengukuran resistans insulasi dengan menggunakan tegangan pengujian minimum $0,9 U_0$;
3. Pengujian lainnya sesuai kesepakatan.

Pengujian insulasi dengan tegangan AC dapat dilakukan dengan salah satu dari yang berikut:

1. Pengujian dengan tegangan AC sinusoidal 150 kV fase – tanah dengan frekuensi antara 20 s.d 300 Hz; selama 1 jam;
2. Pengujian dengan tegangan AC pada $U_0 = 87$ kV selama 24 jam;

Catatan : Untuk pengujian tegangan AC sebesar U_0 dengan menggunakan sumber tegangan dari sistem harus terlebih dahulu mendapatkan rekomendasi layak bertegangan berdasarkan prosedur *quality assurance*.

3. Pengujian lainnya dengan nilai tegangan dan waktu pengujian sesuai kesepakatan antara pembeli dan kontraktor.

Rangkaian pengujian elektrik tersebut salah satunya mendeteksi adanya *corona*. Gejala korona yang tidak terdeteksi dapat berkembang menjadi lompat

denyar (*spark over*) yang merusak peralatan dan berakibat pada kegagalan pasokan tenaga listrik ke beban.[12]

2.6. Penyulang dan *Incoming* 20 kV

Kubikel *Incoming* 20 kV dan Jaringan Penyulang 20 kV merupakan dua elemen kritis yang menjembatani transformasi daya dari tegangan tinggi menjadi tegangan yang siap didistribusikan ke konsumen. Meski memiliki konstruksi yang hampir serupa, kubikel *incoming* dan Penyulang memiliki fungsi yang berbeda.

2.6.1. Penyulang

Penyulang 20 kV adalah jalur utama penyalur tenaga listrik yang berawal dari Gardu Induk (GI) menuju Gardu Distribusi (GD) atau pelanggan Tegangan Menengah (TM).[13] Jaringan ini merupakan bagian dari Sistem Distribusi Primer 20 kV. Peran Penyulang 20 kV dalam sistem adalah sebagai berikut :

- Penyulang 20 kV dimulai dari kubikel *outgoing* di Gardu Induk dan berakhir di Gardu Distribusi (tempat daya diturunkan menjadi tegangan rendah, 380/220 V).
- Sebuah Gardu Induk biasanya memiliki banyak penyulang (5 hingga 20 penyulang) untuk menyuplai area layanan yang luas.
- Struktur jaringan penyulang ini dapat berupa *Radial* (paling sederhana), Spindel, atau Jaringan Terbuka/Loop (memiliki *tie line* untuk fleksibilitas manuver) .



Gambar 2.8 Penyulang 20 kV di GIS Durentiga (*Sumber : Dokumentasi Pribadi*)

Struktur jaringan penyulang sangat menentukan keandalan suplai, dengan beberapa konfigurasi umum :

- *Radial*: Paling sederhana, daya mengalir satu arah dari GI ke beban. Kelemahannya: pemadaman total jika terjadi gangguan di jalur utama.
- *Spindel*: Modifikasi radial dengan *tie line* ke penyulang lain, memungkinkan manuver beban.
- Jaringan *Loop/Lingkaran*: Jaringan tertutup yang memungkinkan pasokan dari dua arah, sehingga gangguan dapat dilokalisir dengan cepat, meningkatkan keandalan (*Zero Down Time / ZDT*).

2.6.2. Incoming 20 kV

Kubikel Incoming 20 kV adalah jenis kubikel yang secara spesifik dipasang di Gardu Induk atau Gardu Distribusi untuk menerima masukan (daya) dari sumber utama sebelum daya tersebut didistribusikan lebih lanjut melalui Busbar ke kubikel lain. Secara singkat, kubikel Incoming adalah gerbang utama masuknya daya 20 kV ke dalam sistem pembagian, dari mana daya kemudian didistribusikan melalui busbar ke kubikel Outgoing yang menjadi pangkal dari setiap Penyulang 20 kV.



Gambar 2.9 Kubikel *Incoming* 20 kV di GIS Durentiga (*Sumber : Dokumentasi Pribadi*)

Secara spesifik fungsi kubikel Incoming 20 kV adalah sebagai berikut :

- *Penerima Daya*: Kubikel ini menjadi titik terima daya 20 kV dari sisi sekunder Trafo Daya Gardu Induk.
- *Titik Hubung Awal*: Setelah menerima daya, kubikel Incoming menghubungkannya ke Busbar 20 kV yang menjadi pusat distribusi di Gardu Induk tersebut.
- *Proteksi Utama*: Kubikel Incoming biasanya dilengkapi dengan Pemutus Tenaga (PMT) yang memiliki kapasitas pemutusan arus gangguan tertinggi dan relai proteksi utama untuk mengamankan seluruh Busbar 20 kV.
- *Radial*: Paling sederhana, daya mengalir satu arah dari GI ke beban. Kelemahannya adalah pemadaman total jika terjadi gangguan di jalur utama.

2 Bagian-Bagian Kubikel Penyulang dan Incoming

Kubikel 20 kV, terlepas dari fungsinya sebagai incoming atau outgoing, umumnya terdiri dari kompartemen dan komponen dasar yang serupa, tetapi fungsinya disesuaikan. Bagian-bagian utamanya Adalah sebagai berikut :

- Pemutus Tenaga (PMT) / *Circuit Breaker* (CB): Digunakan untuk menghubungkan dan memutus arus, termasuk arus gangguan hubung

singkat. Pada incoming, PMT ini memiliki kapasitas pemutusan yang sangat tinggi sedangkan pada Penulang kapasitas pemutusan arus lebih rendah.

- Pemisah (PMS) / Disconnecter Switch: Untuk mengisolasi PMT atau Busbar saat tidak bertegangan (pemeliharaan). Pemisah ini di desain apabila memiliki struktur *Double Busbar*.
- Trafo Arus (CT): Mengukur arus yang masuk dan memberikan sinyal ke relai proteksi.
- Relai Proteksi: Pada incoming maupun penyulang, relai (seperti OCR/GFR) berfungsi sebagai proteksi utama Busbar dan proteksi cadangan (backup) untuk penyulang.
- *Busbar* (Rel): Batang konduktor utama yang menerima daya dari incoming dan mendistribusikannya ke kubikel outgoing (penyulang).
- Sakelar Pentanahan (*Earthing Switch*): Untuk pentanahan jalur agar aman saat pemeliharaan.
- Kompartemen Kabel: Tempat terminasi kabel dari Trafo Daya.

2.7. Sistem Proteksi

Sistem proteksi merupakan upaya penting untuk mengurangi dampak gangguan dengan cara mengisolasi atau memisahkan bagian sistem yang terganggu dari sistem yang sehat, memastikan bagian yang sehat dapat terus beroperasi. Gangguan umum, seperti hubung singkat (antar fasa atau ke tanah), menghasilkan arus yang sangat besar yang berpotensi merusak peralatan. Fungsi sistem proteksi adalah mengamankan peralatan sekaligus melokalisir gangguan, yang berarti sistem hanya mengaktifkan Pemutus Tenaga (PMT) yang paling dekat dengan lokasi gangguan, sehingga interupsi pasokan daya (*downtime*) menjadi terbatas dan tidak meluas. Dalam hal ini penulis menitik beratkan pada Proteksi Utama di sisi Transmisi dan Proteksi utama disisi Sistem Distribusi.

2.7.1. Line Current Differential Relay

Penggunaan Relai Diferensial Penghantar kini semakin populer sebagai proteksi utama pada sistem transmisi, bahkan dianggap lebih ekonomis dibandingkan relai jarak (*distance relay*).[14] Keunggulannya membuat relai ini

tidak hanya diterapkan pada penghantar pendek, tetapi juga pada saluran transmisi dengan panjang sedang maupun panjang. Perluasan penggunaan Relai Diferensial Penghantar disebabkan oleh kemampuannya yang tidak terpengaruh oleh faktor eksternal seperti *Source Impedance Ratio* (SIR), fluktuasi beban, atau *power swing* pada sistem. Selain itu, relai ini menawarkan sensitivitas yang tinggi dan kemudahan dalam pengaplikasian. Dalam konteks PLN P3B Jawa Bali, bagian ini akan menguraikan aplikasi, desain, kriteria pengaturan (*setting*), serta koordinasi relai diferensial penghantar dengan relai proteksi penghantar lainnya.

Relai diferensial beroperasi berdasarkan prinsip Hukum Kirchhoff Arus, yaitu dengan menjumlahkan secara vektor arus listrik yang masuk dan arus yang keluar dari wilayah atau zona yang diproteksi. Menurut IEEE Std 242-1986, relai ini dapat diaplikasikan pada berbagai seksi rangkaian dan secara luas digunakan untuk mendeteksi serta mengisolasi gangguan internal dengan cepat pada motor, generator, saluran transmisi (udara atau kabel), transformator, dan busbar. Karakteristik pentingnya adalah kemampuan mendeteksi gangguan secara cepat tanpa dipengaruhi oleh kondisi beban lebih atau adanya gangguan yang terjadi di luar zona proteksinya. Jenis relai diferensial penghantar yang diterapkan di lingkungan PLN P3B Jawa Bali adalah Relai Diferensial Arus (*line current differential*) atau yang dikenal sebagai Relai Diferensial Pilot.



Gambar 2.10 Prinsip Kerja Relai Differential Penghantar (*Sumber : Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi dan Meter , PLN*)

Dalam keadaan normal, arus listrik akan mengalir antara titik A dan B, tergantung pada kondisi pembangkitan dan beban di kedua sisi. Ketika sistem beroperasi secara normal, atau bahkan saat terjadi gangguan yang berada di luar daerah pengamanan (zona proteksi) relai, arus sekunder yang diukur oleh Trafo Arus (CT) di sisi A (I_1) dan sisi B (I_2) memiliki nilai yang sama namun arah vektor yang berlawanan.

Secara matematis, arus diferensial (I_d) yang mengalir melalui relai adalah penjumlahan vektor kedua arus ini:

$$I_d = I_1 - I_2 = 0$$

Karena arus yang melalui relai adalah nol, relai tidak akan bekerja (tidak trip).

Jika terjadi gangguan pada peralatan yang berada di dalam zona pengamanan relai (gangguan internal), maka arus gangguan akan mengalir menuju titik gangguan tersebut. Sebagai contoh, jika arus normal awalnya mengalir dari A ke B, saat terjadi gangguan, arus yang diukur oleh CT di sisi B (I_2) akan berbalik arah (180°) dan juga mengalir menuju titik gangguan.

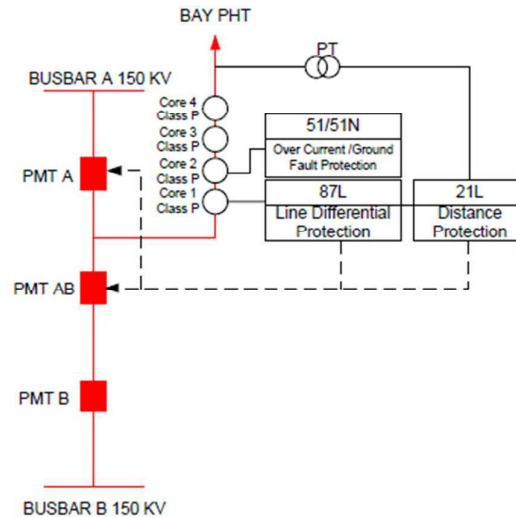
Akibatnya, arus yang mengalir ke relai diferensial merupakan penjumlahan vektor dari I_1 dan I_2 :

$$I_d = I_1 + I_2$$

Karena penjumlahan vektor ini menghasilkan nilai arus yang signifikan ($I_d \neq 0$) relai akan mendeteksi gangguan dan memberikan perintah trip kepada Pemutus Tenaga (PMT) untuk mengisolasi peralatan yang terganggu.

Pada umumnya relai diferensial arus sama dengan relai diferensial lainnya yang membedakannya adalah daerah yang diamankan cukup panjang sehingga disyaratkan beberapa hal sebagai berikut:

- Sarana komunikasi antara ujung-ujung saluran (kabel pilot, *microwave, fiber optic*)
- Relai sejenis pada setiap ujung saluran.



Gambar 2.11 Konfigurasi Relai Differensial Pada Saluran Transmisi (*Sumber : Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi dan Meter , PLN*)

Saluran transmisi tegangan tinggi berperan sebagai tulang punggung (*backbone*) sistem, sehingga memerlukan sistem proteksi yang sangat selektif, sensitif, dan cepat dalam mengamankan gangguan.

Meskipun sensitivitas tinggi meningkatkan keandalan (*dependability*) sistem proteksi untuk mendeteksi gangguan minimum, hal ini dapat menurunkan keamanan (*security*) sistem. Penurunan *security* berisiko menyebabkan relai trip yang salah (*false trip*) akibat kesalahan Trafo Arus (CT) saat terjadi gangguan eksternal yang besar. Oleh karena itu, penetapan nilai *setting* yang tepat sangat krusial untuk menyeimbangkan ketiga kriteria (selektivitas, sensitivitas, dan kecepatan).

a. Pengaturan Arus Differensial Gangguan Fasa Fasa

Arus pickup harus lebih besar dari arus *charging* (I_c) (arus yang dapat dianggap normal) tetapi harus lebih kecil dari arus gangguan minimum I_{fmin} yang mungkin terjadi.

Secara umum, I_{diff} sering diatur sebagai nilai rata-rata antara I_c dan I_{fmin} atau ditetapkan dalam rentang 20% hingga 30% dari arus nominal relai (I_n) menurut :

$$I_c < I_{diff} < I_{fmin}$$

$$I_{diff} \approx \frac{I_c + I_{fmin}}{2} \text{ atau } I_{diff} \approx (0,2 \text{ hingga } 0,3) \times I_n$$

Dimana,

I_c : Arus *charging* (Amp)

I_{diff} : Arus *pickup/ diferensial* (Amp)

$I_{f_{min}}$: Arus gangguan minimum (Amp)

I_n : Arus nominal relai (Amp)

b. Pengaturan Arus Diferensial Gangguan Fasa-Tanah

Untuk mendeteksi gangguan fasa ke tanah dengan tahanan tinggi, digunakan elemen diferensial urutan nol $3I_0$. Nilai setelan $3I_0$ biasanya diatur antara 30% hingga 50% dari arus gangguan minimum yang telah dikonversi ke sisi sekunder CT :

$$\frac{I_{fm} \times 30\%}{CT \text{ Ratio}} < 3I_0 < \frac{I_{fmi} \times 50\%}{CT \text{ Ratio}}$$

Dimana,

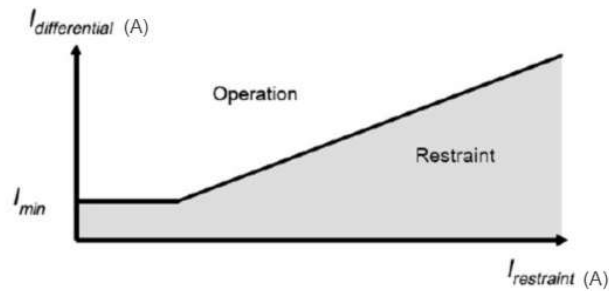
$I_{f_{min}}$: Arus gangguan minimum (Amp)

$CT \text{ Ratio}$: Rasio CT (Amp)

$3I_0$: *Zero sequence Diferensial* (Amp)

c. Waktu Kerja dan Karakteristik Relai

Waktu Kerja Relai Diferensial Penghantar umumnya disetel untuk bekerja secara instan untuk memastikan pemutusan gangguan yang sangat cepat. Namun untuk meningkatkan faktor security dan mencegah salah trip akibat ketidakakuratan CT saat gangguan eksternal, relai diferensial dilengkapi dengan kurva kecuraman atau biasa disebut dengan Karakteristik *Slope*. Relai akan beroperasi di atas kurva *slope* dan diblokir di bawah kurva tersebut.



Gambar 2.12 Karakteristik *Slope* (Sumber : Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi dan Meter , PLN)

Karakteristik kerja relai diferensial umumnya terdiri atas dua *slope* yang fungsinya sebagai berikut :

- *Setting slope 1* untuk memastikan relai bekerja pada saat gangguan internal dan mengantisipasi kesalahan perbandingan arus diferensial akibat *mismatch* CT. Faktor kesalahan tersebut sebagai berikut :
 Kesalahan Transformator Arus : 10 %
 Akurasi relai : 5 %
 Faktor Keamanan : 5 %
 Oleh karena itu *setting slope 1* dipilih = **20 – 30 %**
- *Setting slope 2* untuk mengantisipasi kesalahan yang cukup besar pada CT akibat kondisi saturasi saat terjadi arus gangguan eksternal yang cukup besar. *Setting slope 2* dipilih = **40 % - 80 %**.

2.7.2. Relai Arus Lebih (*Over Current Relay*)

Relai Arus Lebih (OCR) adalah perangkat proteksi esensial yang dirancang untuk mendeteksi dan merespons kondisi di mana arus listrik dalam suatu sirkuit melebihi batas yang ditentukan (set point). Relai ini bekerja berdasarkan besaran arus masukan dari Trafo Arus (CT) dan sangat efektif untuk melindungi sistem dari gangguan hubung singkat antar fasa dan beban lebih.[14]

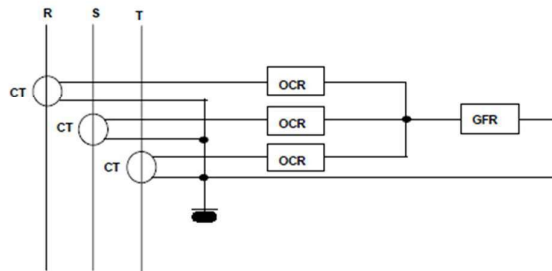
a. Karakteristik Relay Arus Lebih (*OCR*)

Proteksi arus lebih dapat mencegah perubahan parameter arus yang sangat besar, yang dapat terjadi dengan cepat karena adanya gangguan hubung singkat.

Dengan proteksi arus lebih ini, rele diaktifkan ketika arus melebihi nilai yang ditetapkan. Rele arus lebih memiliki beberapa perilaku pengaturan waktu, dibagi menjadi tiga jenis yaitu:

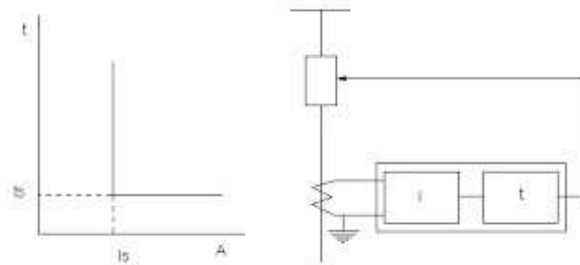
- Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite Time*)

Relai ini berfungsi dengan mengirimkan perintah trip ke Pemutus Tenaga (PMT) ketika terjadi gangguan hubung singkat dan besarnya arus gangguan melebihi nilai ambang batas yang ditetapkan I_s .



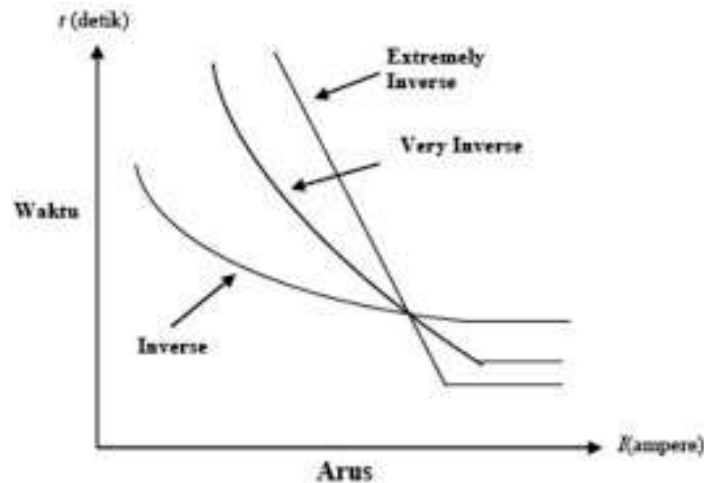
Gambar 2.13 Diagram Pengawatan *Over Current Relay* (Sumber : Buku *Pedoman Pemeliharaan Proteksi dan Meter , PLN*)

Karakteristik khas dari relai ini adalah waktu kerjanya yang tetap (konstan) setelah waktu tunda (time delay) tertentu, terlepas dari seberapa besar arus yang bekerja pada relai (selama arus tersebut melebihi I_s). Waktu tunda ini memberikan durasi tertentu, mulai dari saat gangguan terdeteksi hingga relai beroperasi. Standar yang digunakan untuk pengaturan waktu tunda ini adalah BS142:1966, di mana waktu kerja minimum (minimum operating time) biasanya ditetapkan pada $t = 0.3$ detik.



Gambar 2.14 Karakteristik *definite time relay* (Sumber : Buku *Pedoman Pemeliharaan Proteksi dan Meter , PLN*)

Relai Arus Lebih Terbalik (*Inverse Time Relay*) adalah jenis relai yang waktu tunda operasinya berbanding terbalik (*inverse*) dengan besaran arus gangguan. Prinsip kerjanya adalah semakin besar arus gangguan yang terdeteksi oleh relai, maka semakin kecil waktu penundaannya (semakin cepat relai bekerja). Sebaliknya, jika arus gangguan hanya sedikit melebihi batas pickup, relai akan bekerja dengan waktu tunda yang lebih lama. Karakteristik ini memungkinkan relai memberikan proteksi yang efektif. Perlu diperhatikan bahwa bentuk kurva karakteristik inverse time ini dapat bervariasi antar pabrikan.



Gambar 2.15 Karakteristik *Inverse time relay* (Sumber : Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi dan Meter , PLN)

a. Karakteristik *Setting* Relay OCR

Berikut adalah rumusan perhitungan *setting* OCR dan GFR menggunakan *Standar Inverse*. [15]

- *Setting* Arus OCR

$$I_s = (110\% - 120\%) * I_n / CCC$$

Dimana,

I_s : *Setting* Arus OCR (Ampere)

I_n : Arus Nominal CT (Ampere).

CCC : *Current Carrying Capacity* atau Kemampuan hantar arus kawat penghantar (Ampere).

Dipilih nilai terkecil antara CCC atau I_n .

- *Setting Waktu OCR*

$$T (SI) = \frac{0,14}{(I_{hsph} / I_s)^{0,02} - 1} * TMS$$

Karena *setting* yang dimasukkan pada relai adalah *setting* TMS maka waktu kerja yang diinginkan pada saat terjadinya gangguan fasa-fasa di bus harus ditentukan (umumnya waktu kerja relai proteksi back-up penghantar adalah 1 detik pada saat terjadinya gangguan fasa-fasa di bus).

$$TMS = \frac{(I_{hsph} / I_s)^{0,02} - 1}{0,14} * T (SI)$$

Dimana,

TMS : *Time Multiple Setting*.

I : Arus Hubung singkat Fasa-Fasa di lokal Bus (A).

I_s : *Setting* Arus OCR (A).

T(SI) : Waktu kerja yang diinginkan pada Gangguan Hubung Singkat Fasa-Fasa di lokal bus (s)

2.7.3. Relai Arus Lebih Gangguan 1 Fasa – Tanah (*Ground Fault Relay*)

GFR merupakan relai yang bekerja dengan input analog arus, dimana relai akan bekerja apabila relai merasakan arus gangguan 1 fasa ke tanah di atas nilai penyetelannya. Untuk selektifitas dengan proteksi utama fungsi high set tidak diaktifkan. Relai arus gangguan tanah diset 10 – 30% dari kemampuan arus nominal peralatan yang terkecil, namun harus dipastikan bahwa *setting* arus relai masih tetap bekerja pada arus hubung singkat 1 fasa - tanah minimum. Waktu kerja relai arus gangguan tanah diset +/- 1 (satu) detik pada arus hubung singkat 1 fasa - tanah maksimum di lokal bus.

- *Setting Arus GFR*

$$I_s = (20\% - 30\%) * I_n / CCC$$

Dimana,

I_s : *Setting* Arus GFR (Ampere)

I_n : Arus Nominal CT (Ampere).

CCC : *Current Carrying Capacity* atau Kemampuan hantar arus kawat penghantar (Ampere).

Dipilih nilai terkecil antara CCC atau In.

- *Setting Waktu GFR*

$$T(SI) = \frac{0,14}{(I_{hsph} / I_s)^{0,02} - 1} * TMS$$

Karena *setting* yang dimasukkan pada relai adalah *setting* TMS maka waktu kerja yang diinginkan pada saat terjadinya gangguan 1 fasa di bus lokal harus ditentukan (umumnya waktu kerja relai proteksi back-up penghantar adalah 1 detik pada saat terjadinya gangguan 1 fasa-tanah di bus).

$$TMS = \frac{(I_{hsph} / I_s)^{0,02} - 1}{0,14} * T(SI)$$

Dimana,

TMS : *Time Multiple Setting*.

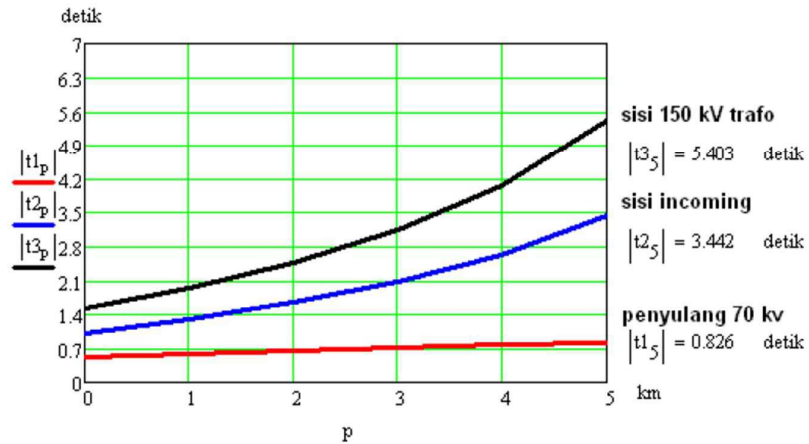
I : Arus Hubung singkat Fasa-Fasa di lokal *Bus* (A).

I_s : *Setting* Arus GFR (A).

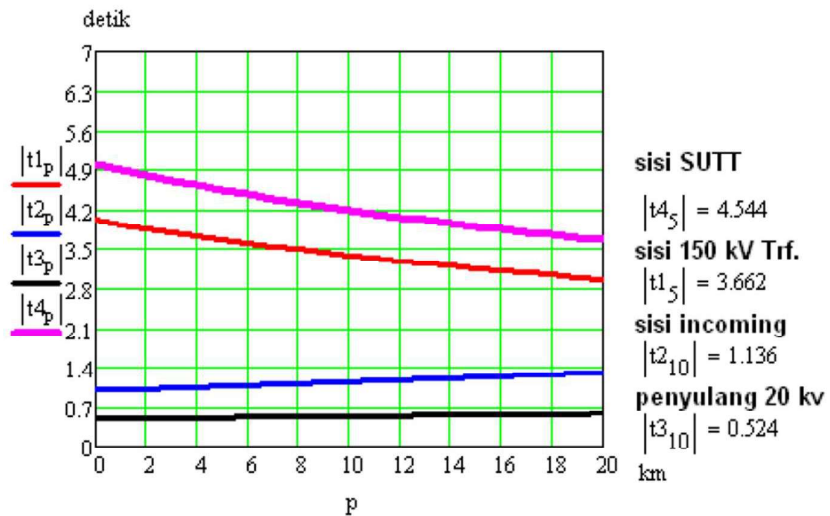
T(SI) : Waktu kerja yang diinginkan pada Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa-tanah di lokal bus.

2.7.4. Koordinasi *Setting* Relai OCR / GFR

Koordinasi *setting* proteksi OCR dan GFR dalam skema HV Test *Reverse* Menggunakan Trafo Daya eksisting ini sangat penting karena aliran daya disuntikkan dari arah yang berlawanan (dari 20 kV ke 150 kV) dan harus dijamin bahwa arus pengujian yang spesifik tidak memicu (trip) relai, namun relai harus bekerja selektif jika terjadi gangguan (fault) pada SKTT yang diuji. Tujuan utama koordinasi ini adalah menerapkan prinsip kaskading (*cascading*) atau bertingkat waktu kerja relai, di mana relai yang paling dekat dengan gangguan harus bekerja paling cepat.



Gambar 2.16 Kurva Koordinasi OCR (*Sumber : Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi dan Meter , PLN*)



Gambar 2.17 Kurva Koordinasi GFR (*Sumber : Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi dan Meter , PLN*)

2.8. Pengujian Tegangan Tinggi (*Mobile Test Unit*)

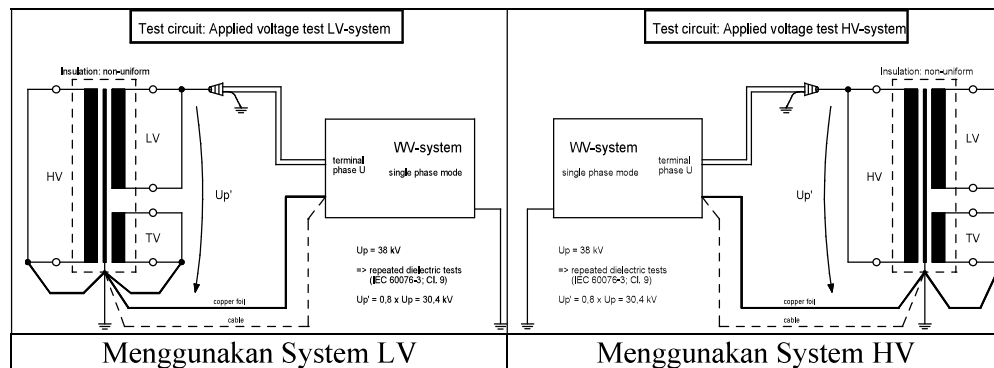
Pengujian tegangan tinggi dilakukan untuk memastikan bahwa sistem isolasi peralatan listrik mampu menahan tegangan lebih yang mungkin terjadi selama masa operasi.[16] Selain itu memastikan integritas isolasi, keandalan, dan keamanan operasional dari peralatan utama sistem tenaga listrik di Gardu Induk. *HV Test* dilakukan pada instalasi baru (commissioning) maupun sebagai bagian dari pemeliharaan berkala.

Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk menguji kemampuan isolasi suatu komponen dalam menahan tegangan lebih (surja) dan tegangan kerja normal dalam jangka panjang, serta mendeteksi adanya cacat isolasi yang tidak terlihat. Beberapa tujuan utama pengujian *HV Test* adalah sebagai berikut :

- Memastikan Integritas Isolasi: Menguji kemampuan bahan isolasi (seperti porselen, minyak, gas SF₆ atau XLPE) untuk menahan tegangan lebih tinggi dari tegangan operasional normal tanpa terjadi tembus (*breakdown*).
- Mendeteksi Kebocoran Arus: Mengidentifikasi adanya arus bocor (*leakage current*) yang signifikan, yang mengindikasikan adanya kerusakan isolasi atau kontaminasi (misalnya kelembaban atau debu).
- Menguji Kualitas Manufaktur: Khusus untuk instalasi baru, pengujian ini memverifikasi bahwa peralatan (seperti GIS atau kabel) telah dipasang dan dibuat sesuai dengan standar dan spesifikasi desain
- Menjaga Keandalan Sistem: Kegagalan isolasi yang tidak terdeteksi dapat menyebabkan gangguan sistem yang katastrofik (*blackout*), sehingga *HV Test* adalah upaya preventif.

2.8.1 Pengujian Tegangan Tinggi Terapan (*Applied HV Test*)

Pengujian ini, yang distandardisasi dalam IEC 60076-3: 2000-03, secara formal dikenal sebagai *Separate Source AC Withstand Voltage* atau lebih umum sebagai *Applied Voltage Withstand Test*. Tujuan utamanya adalah untuk memverifikasi kemampuan isolasi belitan transformator terhadap ground dan juga antarbelitan itu sendiri.[17]



Gambar 2.18 *Aplied HV Test* Menggunakan HV & LV System [18]

a. Metode dan Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menginjeksikan tegangan AC satu fasa ke belitan yang diuji, dengan bentuk gelombang tegangan diupayakan mendekati sinusoidal dan frekuensi tidak kurang dari 80% frekuensi sistem nominal 50 Hz. Nilai tegangan uji (nilai RMS) ditentukan dari pengukuran nilai tegangan puncak (*peak*) dibagi dengan $\sqrt{2}$. Prosedur kenaikan dan penurunan tegangan dilakukan secara terkontrol :

- Tegangan uji dimulai dari nilai tidak lebih dari sepertiga ($1/3$) tegangan uji penuh.
- Tegangan kemudian dinaikkan dengan cepat dan konsisten hingga mencapai nilai tegangan uji yang ditetapkan.
- Setelah pengujian selesai, tegangan harus diturunkan dengan cepat hingga kurang dari $1/3$ tegangan uji sebelum peralatan uji dimatikan.

b. Kriteria dan Kondisi Uji

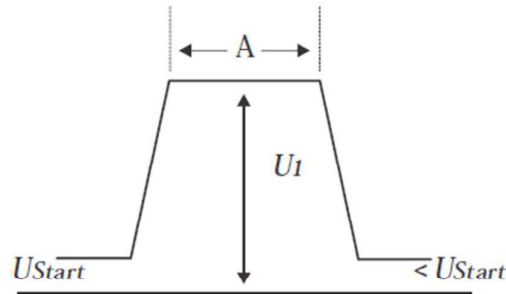
Keseluruhan pengujian dilaksanakan selama 60 detik. Selama pengujian berlangsung, semua terminal atau belitan yang tidak sedang diuji harus dikoneksikan ke tanah (*grounded*). Inilah mengapa pengujian ini sering disebut sebagai "Pengujian Terpisah" (*Separate Test*), karena hanya satu belitan yang diberi tegangan sementara belitan lainnya dibumikan.

Untuk belitan yang memiliki isolasi *non-uniform* (misalnya pada titik netral), nilai tegangan uji yang diterapkan adalah nilai tegangan uji terendah dari belitan tersebut. Besaran tegangan yang diterapkan didasarkan pada *Basic Insulation Level* (BIL) bushing yang tertera pada pelat nama Transformator.

Kriteria keberhasilan pengujian ini adalah tidak terjadi kegagalan isolasi (breakdown) tegangan selama durasi pengujian (60 detik).

Jika pengujian merupakan *Factory Test* maka besar pengujian 100 % dari nilai PFW. Namun jika pengujian yang sifatnya berulang (*Repeated Test*) maka dilakukan 80 % dari nilai PFW. Untuk pengujian di lapangan dapat ditetapkan bahwa *Applied Test* dilakukan dengan besaran tegangan pengujian sebagai berikut.[19]

- Tegangan Pengujian sisi Primer : 38 kV (Fasa-ground) x 0.8 = 30.2kV
- Tegangan Pengujian sisi Sekunder : 38 kV (Fasa-ground) x 0.8 = 30.2kV
- Tegangan Pengujian sisi Tertier : 140 kV (Fasa-ground) x 0.8 = 112 kV



Gambar 2.19 Tegangan PFW dan Tegangan Start (Sumber : Buku Pengujian Tegangan Tinggi karya Ade Syuhada)

Dimana,

$$U_{start} < 1/3 \times U_1.$$

$$U_1 = U_{test} = \text{Tegangan PFW (Volt)}$$

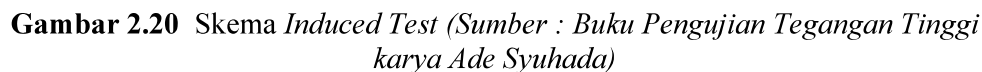
$$A = 60 \text{ detik.}$$

2.8.2 Pengujian Tegangan Tinggi Induksi (*Induced HV Test*)

Pengujian Tegangan Tinggi Induksi pada transformator daya/tenaga, yang distandardisasi dalam *IEC 60076-3: 2000-03* sebagai *Induced AC Voltage Test*, dilakukan dengan cara menginduksikan tegangan pada salah satu belitan trafo.[17]

a. Tujuan dan Metode

Tujuan utama pengujian ini adalah untuk memverifikasi kekuatan dielektrik isolasi trafo secara menyeluruh, karena pengujian ini menghasilkan tegangan antara belitan dan tegangan antara belitan dengan tanah (ground) kondisi yang sangat menyerupai operasi sesungguhnya.[18]



b. Besaran Tegangan dan Waktu Uji

$$V_u = K \times E_M$$

EM = tegangan maksimum sistem atau tegangan maksimum dari trafo, sadapan trafo pada durasi waktu uji Tu 10 menit.

Tabel 2.2 Nilai Faktor K

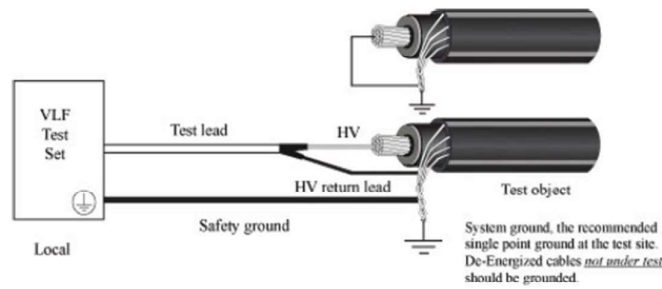
Tegangan Maksimum Trafo EM (kV)	Nilai Faktor K
3.6	1.5
7.2	
12	1.25
17.5	
24	0.64
72.5	

Dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan formula di atas, tegangan uji pada trafo diterapkan sebesar 110 % V maks, tegangan maksimm sadapan atau $1,1 \times V$ maks tegangan sadapan. Namun untuk pelaksanaan di lapangan dengan menggunakan faktor kali tersebut sering kali tidak digunakan karena dianggap masih terlalu besar.

Untuk kepraktisan di lapangan dan atas kesepakatan antara vendor dan pemilik aset, seringkali menggunakan faktor pengali 100 % V_{maks} tegangan sadapan.

2.8.3 Pengujian Tegangan Tinggi *Very Low Frequency* (VLF)

Uji *Very Low Frequency* (VLF) adalah metode Pengujian Tegangan Tinggi (*HV Test*) yang menggunakan tegangan bolak-balik (AC) dengan frekuensi yang sangat rendah, jauh di bawah frekuensi sistem normal (50/60 Hz). Metode ini dikembangkan secara spesifik untuk mengatasi masalah pengujian pada beban kapasitif tinggi, seperti kabel daya bertegangan menengah (*Medium Voltage/MV*) dan tinggi (*High Voltage/HV*). Uji VLF dilakukan pada rentang frekuensi antara 0.01 Hz hingga 1 Hz, dengan 0.1 Hz menjadi frekuensi yang paling umum digunakan dan direkomendasikan.[20]



Gambar 2.21 Skema Pengujian VLF (*Sumber : IEEE Guide using VLF*)

Pada Saluran Kabel Tegangan Tinggi memiliki karakteristik kapasitif yang tinggi. Arus yang dibutuhkan untuk menguji beban kapasitif pada frekuensi sistem 50 Hz akan sangat besar $I_c = 2\pi fCV$ dengan menurunkan frekuensi (f), arus kapasitif (I_c) yang dibutuhkan akan berkurang drastis.

- Pada 0.1 Hz, daya dan arus yang dibutuhkan hanya sekitar 1/500 hingga 1/600 kali dibandingkan pada 50 Hz.
- Penurunan daya ini memungkinkan penggunaan peralatan uji (*VLF Hipot Tester*) yang ringkas, ringan, dan portabel, ideal untuk pengujian di lapangan

Berdasarkan jenisnya, Pengujian menggunakan metode VLF ini dibagi menjadi dua, yakni :

- Uji Tahan Tegangan VLF (*VLF Withstand Test*): Merupakan pengujian Lulus/Gagal (Pass/Fail) untuk menguji integritas isolasi kabel.
- Uji Diagnostik VLF (*VLF Diagnostic Tests*): Meliputi pengukuran $\tan\delta$ (*Tangen Delta*) dan Pelepasan Sebagian (*Partial Discharge / PD*) untuk menilai kondisi isolasi.

a. Metode dan Parameter Kunci Uji VLF (IEEE 400.2)

Metode Pengujian Very Low Frequency (VLF) didasarkan pada parameter spesifik untuk menjamin efektivitas dan konsistensi pengujian di lapangan. Parameter ini dimulai dari frekuensi dan bentuk gelombang, di mana panduan merekomendasikan frekuensi uji berada dalam rentang 0.01 Hz hingga 1 Hz,

dengan 0.1 Hz menjadi frekuensi yang paling sering digunakan secara komersial. Bentuk gelombang yang diakui umumnya adalah Gelombang Sinusoidal (Sinewave) atau Gelombang *Cosine-Rectangular*. Selanjutnya, dalam menetapkan besaran tegangan uji, panduan *IEEE 400.2* selalu menggunakan nilai Puncak (*Peak Voltage*) untuk memastikan hasil yang konsisten terlepas dari bentuk gelombang yang dipakai.[21] Tegangan uji dibagi berdasarkan kondisi kabel:

- Uji Penerimaan (*Acceptance Test*): Untuk kabel baru atau paska-perbaikan, tegangan yang digunakan adalah 2.5 hingga 3 kali tegangan fasa-ke-tanah nominal kabel (U_0).
- Uji Pemeliharaan (*Maintenance Test*): Untuk kabel yang sudah beroperasi (*service-aged*), tegangan diturunkan menjadi 1.7 hingga 2 kali (U_0).
- Uji Pemasangan (*Installation Test*): Mirip dengan uji penerimaan, dilakukan segera setelah instalasi.

Durasi uji merupakan faktor penting karena cacat isolasi memerlukan waktu untuk tembus. Durasi yang direkomendasikan umumnya berkisar antara 30 menit hingga 60 menit, tergantung pada jenis pengujian (penerimaan atau pemeliharaan).

b. Prosedur Uji dan Kriteria Keberhasilan VLF

Pada *IEEE 400.2* sangat menekankan pentingnya prosedur pra-uji dan keamanan untuk memastikan pengujian VLF berlangsung dengan aman dan akurat. Prosedur ini mencakup tiga langkah kritis: Pentanahan, di mana kabel harus di-ground secara aman sebelum memulai dan setelah mengakhiri pengujian untuk menghilangkan muatan sisa; Isolasi, di mana semua peralatan sensitif, relai, dan terminasi yang tidak diuji harus dilepas atau diisolasi dari titik uji dan Stabilitas, di mana direkomendasikan untuk memverifikasi stabilitas arus pada tegangan rendah ($0.5 \times U_0$) sebelum penaikan tegangan penuh untuk mendeteksi kelemahan kabel yang parah sejak dini. Setelah prosedur dijalankan, Kriteria *Pass/Fail* (Uji Tahan) ditetapkan secara jelas: kabel dinyatakan Lulus (*Pass*) jika mampu menahan tegangan uji yang diterapkan sepanjang durasi waktu yang ditentukan tanpa terjadi tembus isolasi (*breakdown*); sebaliknya, kabel dinyatakan Gagal (*Fail*) jika tembus isolasi terjadi selama pengujian, yang mengharuskan dilakukannya lokalisasi dan perbaikan gangguan sebelum kabel dapat dioperasikan kembali.

2.9. Analisa Ekonomi

Secara Pengambilan keputusan mengenai adopsi Metode Uji Induksi Tegangan (*Reverse* Menggunakan Trafo Daya eksisting) sebagai alternatif dari penggunaan *Mobile Test Unit* (MTU) konvensional harus didukung oleh analisis ekonomi yang kuat, khususnya dalam konteks Studi Kelayakan Tekno-Ekonomi. Analisis ini wajib membandingkan profil pengeluaran jangka panjang dari kedua metode, yang secara fundamental dibagi menjadi dua kategori biaya utama yakni *Capital Expenditure* (CapEx) atau biaya modal dan *Operating Expenditure* (OpEx), atau biaya operasional, untuk menentukan strategi mana yang memberikan Biaya Total Kepemilikan (*Total Cost of Ownership/TCO*) yang paling efisien dan optimal bagi PT PLN (Persero).

a. *CapEx* Metode MTU Konvensional

CapEx merujuk pada dana yang diinvestasikan perusahaan untuk membeli, mengakuisisi, atau meningkatkan aset fisik yang memiliki masa manfaat lebih dari satu tahun. Dalam konteks Pengujian *HV Test*, *CapEx* menjadi titik pembeda utama antara dua metode yang dianalisis. *CapEx* Metode MTU (*Mobile Test Unit*) Konvensional memerlukan biaya tinggi dan tidak fleksibel. Biaya modal untuk MTU sangat tinggi karena mencakup pembelian unit pembangkit tegangan tinggi bergerak (termasuk *trailer* khusus dan sistem kontrol). Nilai depresiasi aset ini juga besar dan harus dialokasikan ke dalam biaya setiap pengujian. *CapEx* ini ditujukan untuk aset yang tidak beroperasi secara permanen di Gardu Induk, melainkan dirotasi di berbagai lokasi kerja.

b. *OpEx* Metode MTU Konvensional

OpEx merujuk pada biaya yang dikeluarkan perusahaan untuk menjalankan dan memelihara aset serta operasional harian. *OpEx* merupakan biaya berulang yang timbul setiap kali pengujian dilakukan. *OpEx* Metode MTU Konvensional memerlukan biaya Tinggi dan Variabel *OpEx* ini mencakup biaya transportasi dan mobilisasi MTU dari depo ke lokasi GIS Durentiga misalnya, biaya bahan bakar untuk generator atau kendaraan pengangkut MTU, biaya upah lembur atau perjalanan dinas personel spesialis, serta biaya pemeliharaan rutin MTU. Tingginya *OpEx* ini sangat dipengaruhi oleh jarak tempuh dan frekuensi rotasi MTU. Selain

itu, Kebutuhan setup yang lama pada MTU secara tidak langsung meningkatkan *OpEx* dalam bentuk Biaya Peluang (*Opportunity Cost*) dan potensi kerugian *Energy Not Served* (ENS) karena durasi *outage* yang lebih panjang.

c. Biaya Total

Berdasarkan literatur "*Engineering Economy*" oleh Leland Blank dan Anthony Tarquin, biaya diklasifikasikan berdasarkan hubungannya dengan volume output:[22]

- *Fixed Cost* (FC) / Biaya Tetap yaitu biaya yang jumlah totalnya tetap konstan dalam rentang waktu dan volume aktivitas tertentu. Biaya ini tidak dipengaruhi oleh berapa kali pengujian dilakukan. Contoh : Biaya penyusutan alat, gaji pegawai tetap, asuransi, dan pajak bangunan GIS.
- *Variable Cost* (VC) / Biaya Variabel yaitu biaya yang jumlah totalnya berubah secara proporsional dengan perubahan tingkat aktivitas atau volume produksi. Contoh : Biaya konsumsi energi listrik (kWh), biaya bahan bakar kendaraan, biaya tol, dan biaya makan harian petugas lapangan.

Dijelaskan dalam rumus :

$$TC = FC + VC$$

Atau lebih spesifik untuk tujuan perhitungan:

$$TC = FC + (v \times X)$$

Di mana:

$$TC = \text{Total Cost}$$

$$FC = \text{Fixed Cost}$$

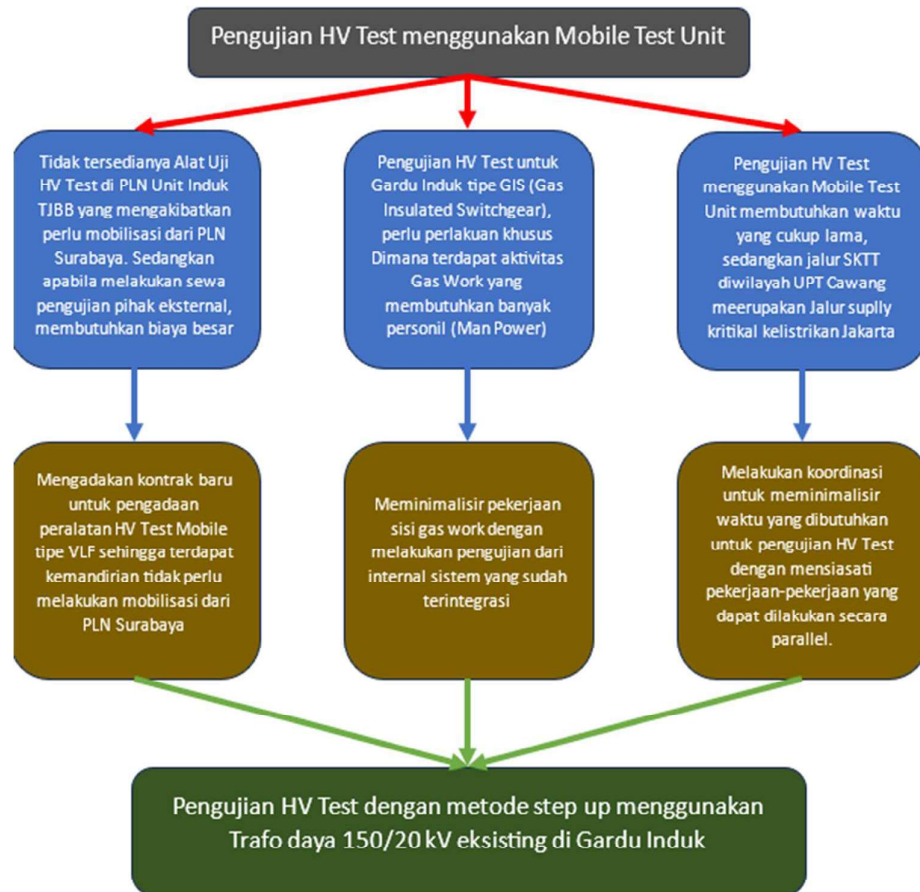
$$v = \text{Variable cost per unit of activity}$$

$$X = \text{Activity level (number of units)}$$

2.10. Kerangka Pemikiran

Penelitian ini didasari oleh kebutuhan akan efisiensi waktu dan biaya dalam pengujian dielektrik SKTT 150 kV paska perbaikan. Masalah utama adalah inefisiensi metode konvensional (MTU) yang memerlukan biaya logistik tinggi dan

waktu pengerjaan lama karena adanya *gas work* SF₆. Berdasarkan teori transformator dan proteksi tenaga listrik, peneliti mengajukan solusi penggunaan metode saluran *reverse*. Melalui simulasi ETAP, divalidasi bahwa Trafo eksisting daya dapat berfungsi sebagai sumber tegangan (*step-up*) dengan arus yang aman bagi relai proteksi. Hasil akhir yang diharapkan adalah validasi teknis dan bukti penghematan ekonomi yang signifikan



Gambar 2.22 Kerangka Pemikiran

Namun demikian pelaksanaan pengujian tegangan tinggi pada PLN UPT Cawang harus dilakukan dengan mengacu pada standar operasional yang baku. Karena menurut Tri Wahyu “Dalam dunia bisnis yang semakin kompleks, memahami hukum yang mengatur setiap aspek bisnis adalah kunci untuk keberhasilan dan kepatuhan.”[23]