

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Kelistrikan

Sistem tenaga Listrik sering disebut sebagai infrastruktur kelistrikan, pada dasarnya berfungsi sebagai jaringan terintegrasi yang bertanggung jawab atas pengaliran daya listrik dari fasilitas produksi primer hingga ke konsumen akhir. Daya Listrik dihasilkan terlebih dahulu di instalasi pembangkit utama, kemudian disalurkan atau didistribusikan kepada para pelanggan melalui berbagai macam proses transformasi dan elemen pendukung yang saling terkait. Secara umum, komponen-komponen esensial dalam infrastruktur tenaga listrik dapat diidentifikasi sebagai berikut:

1. Instalasi Pembangkit Listrik

Instalasi pembangkit listrik merupakan fasilitas yang berfungsi menghasilkan energi listrik dari berbagai sumber energi, seperti tenaga air, uap, gas, diesel, panas bumi, maupun energi terbarukan lainnya. Pada tahap ini, energi primer diubah menjadi energi listrik melalui generator sebelum disalurkan ke sistem transmisi. Keandalan instalasi pembangkit sangat menentukan kontinuitas pasokan energi listrik karena gangguan pada pembangkit dapat mempengaruhi kestabilan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

2. Saluran Transmisi Bertegangan Ekstra Tinggi 500 kV

Saluran transmisi bertegangan ultra tinggi 500 kV merupakan salah satu komponen utama dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dalam kapasitas besar dari pusat pembangkitan menuju pusat-pusat beban yang berada pada jarak yang sangat jauh. Sistem transmisi ini dirancang untuk menghubungkan pembangkit listrik berskala besar dengan wilayah-wilayah yang memiliki tingkat konsumsi energi tinggi, sehingga kebutuhan listrik masyarakat, industri, maupun sektor lainnya dapat terpenuhi secara optimal dan berkesinambungan.

Penggunaan tegangan ultra tinggi pada saluran transmisi dilakukan dengan tujuan utama untuk meningkatkan efisiensi penyaluran energi listrik. Dengan menaikkan level tegangan, arus listrik yang mengalir pada penghantar dapat ditekan menjadi lebih kecil, sehingga rugi-rugi daya akibat hambatan penghantar selama proses penyaluran dapat diminimalkan. Hal ini sangat penting mengingat jarak penyaluran yang jauh berpotensi menimbulkan kehilangan energi listrik yang cukup besar apabila tidak menggunakan sistem tegangan tinggi.

3. Substasiun Utama

Substasiun utama berfungsi sebagai pusat pengaturan, pengamanan, dan transformasi tegangan listrik dari sistem transmisi tegangan ultra tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah. Substasiun ini dilengkapi dengan transformator daya, sistem proteksi, serta peralatan pengendalian yang berfungsi menjaga stabilitas operasi sistem tenaga listrik.

4. Saluran Transmisi Bertegangan Tinggi

Saluran transmisi bertegangan tinggi berfungsi menyalurkan energi listrik dari substasiun utama menuju substasiun distribusi. Pada tahap ini, listrik masih berada pada level tegangan tinggi seperti 150 kV atau 70 kV agar efisiensi penyaluran tetap optimal. Gangguan pada sistem transmisi tegangan tinggi dapat menyebabkan pemadaman listrik dalam cakupan wilayah yang luas.

5. Substasiun Distribusi

Substasiun distribusi memiliki peranan yang sangat penting dalam sistem penyaluran tenaga listrik, khususnya dalam proses menurunkan tegangan listrik dari jaringan transmisi bertegangan tinggi menjadi tegangan menengah yang sesuai untuk disalurkan ke jaringan distribusi. Proses penurunan tegangan ini bertujuan agar energi listrik dapat didistribusikan secara aman, efisien, dan sesuai dengan kebutuhan konsumen pada berbagai sektor. Tanpa adanya substasiun distribusi, proses penyaluran energi listrik dari

pembangkit menuju pelanggan tidak dapat berlangsung secara optimal karena perbedaan tingkat tegangan yang digunakan pada setiap tahapan sistem tenaga listrik.

Selain berfungsi sebagai penurun tegangan, substasiun distribusi juga berperan sebagai pusat pengaturan pembebanan jaringan. Melalui fungsi ini, substasiun mampu mengatur keseimbangan beban listrik yang disalurkan ke berbagai wilayah sehingga sistem distribusi dapat beroperasi secara stabil dan andal. Pengaturan pembebanan tersebut penting untuk mencegah terjadinya kelebihan beban pada jaringan yang dapat menyebabkan penurunan kualitas daya listrik maupun gangguan operasional.

6. Jaringan Distribusi Tingkat 20 kV

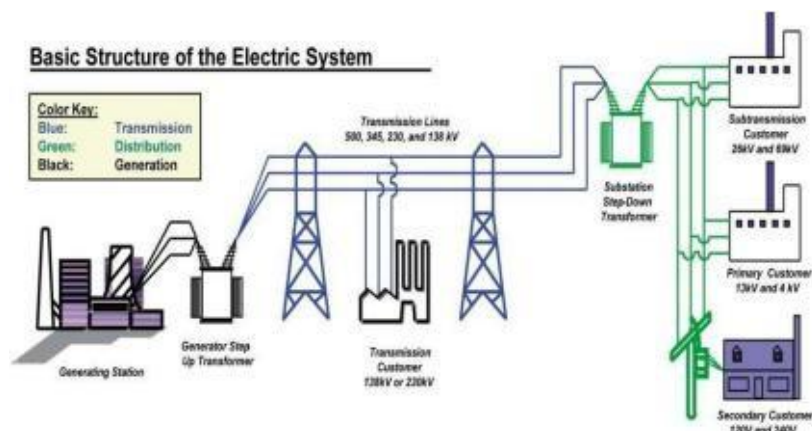
Jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV merupakan salah satu bagian penting dalam sistem penyaluran tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari substasiun distribusi menuju gardu distribusi maupun langsung ke pelanggan dengan kebutuhan daya besar, seperti sektor industri dan komersial. Sistem ini menjadi penghubung utama antara proses penurunan tegangan di substasiun dengan tahap pendistribusian listrik ke pengguna akhir, sehingga keberadaannya sangat menentukan keandalan dan kontinuitas suplai energi listrik.

Pada jaringan distribusi 20 kV, energi listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer yang dirancang untuk menjangkau area pelayanan yang luas dan beragam. Jaringan distribusi primer ini biasanya terdiri atas saluran udara tegangan menengah maupun saluran kabel bawah tanah yang disesuaikan dengan kondisi geografis, tingkat kepadatan penduduk, serta kebutuhan beban listrik pada suatu wilayah. Dengan menggunakan sistem distribusi primer, penyaluran energi listrik dapat dilakukan secara lebih efisien dan mampu menjangkau daerah-daerah yang membutuhkan pasokan listrik secara merata.

7. Pengguna Akhir

Pengguna akhir merupakan pihak yang menerima dan memanfaatkan energi listrik untuk berbagai kebutuhan, seperti rumah tangga, industri, perkantoran, dan fasilitas umum. Keandalan pasokan listrik pada pengguna akhir sangat dipengaruhi oleh kinerja seluruh komponen sistem tenaga listrik dari pembangkit hingga jaringan distribusi [13].

Proses awal yang digunakan dalam tahapan transmisi energi Listrik antara lain mencakup peningkatan voltase keluaran generator yang biasanya berada dalam rentang 6,6 kV hingga 24 kV menuju level operasional yang lebih tinggi, yaitu 70 kV, 150 kV, atau 500 kV, melalui penerapan transformator pengangkat (*step-up transformer*). Tahapan ini dirancang secara khusus untuk mengurangi hilang-rugi daya selama pengiriman melalui jalur transmisi serta mengatasi kendala jarak tempuh yang substansial pada saluran tersebut. Selanjutnya, pengiriman energi listrik dilaksanakan melalui saluran udara bertegangan tinggi (SUTT) atau saluran udara bertegangan ekstra tinggi (SUTET).[14].



Gambar 2.1 Skema Sistem Tenaga Listrik [15]

Gambar 2.1 menyajikan kerangka dasar dari sistem tenaga listrik, yang terdiri dari empat komponen utama, yaitu proses generasi, transmisi, distribusi, dan juga konsumsi energi. Pada bagian generasi, konversi energi primer dari sumber-sumber beragam seperti potensi hidrolik, pembakaran batubara, panas bumi, angin, atau alternatif lainnya dilakukan menjadi bentuk listrik melalui fungsi utama generator.

Perangkat ini menghasilkan output tegangan yang disesuaikan dengan spesifikasi teknisnya, biasanya berkisar antara 11 kV hingga 24 kV, tergantung pada jenis dan kapasitas yang diterapkan.

Kemudian pada tahap transmisi yang melakukan aliran kuasa elektrik dari stasiun pembangkit listrik hingga ke pusat beban utama menggunakan level tegangan ekstra tinggi dengan setidaknya 70 kV. Strategi ini efektif meminimalkan kehilangan ketuaan akibat resistansi dan voltach drop ketika kuasa listrik dikube terlalu jauh melalui sistem saluran. Setibanya kuasa itu di titik acuan untuk transmisis, transformator dari pusat beban utama GI akan mengubah down voltach kembali ke distribusi kuasa kesejahteraan standar sebelum dialokasikan ke konsumen terakhir.

Oleh karena itu, sistem distribusi tenaga listrik pada dasarnya tidak dapat dipisahkan dari operasional Gardu Induk (GI) yang berfungsi sebagai penghubung utama antara sistem transmisi bertegangan tinggi dengan sistem distribusi bertegangan lebih rendah. Gardu Induk memiliki peran penting dalam menurunkan tingkat tegangan listrik dari sistem transmisi menjadi tegangan yang sesuai untuk didistribusikan kepada konsumen. Selain itu, GI juga berfungsi sebagai pusat pengaturan, pengamanan, serta pengendalian aliran daya listrik agar proses penyaluran energi dapat berlangsung secara efisien, stabil, dan andal. Keberadaan Gardu Induk memungkinkan proses distribusi listrik dilakukan secara terkontrol sehingga mampu meminimalkan gangguan serta menjaga kontinuitas suplai energi listrik.

Secara khusus, jaringan distribusi tenaga listrik dibedakan menjadi dua tingkatan tegangan, yaitu Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR). Jaringan Tegangan Menengah (JTM) atau sering disebut sebagai jaringan primer merupakan sistem penyaluran listrik dari Gardu Induk menuju gardu distribusi dengan kisaran tegangan umumnya sekitar 20 kV. JTM berfungsi menyalurkan energi listrik dalam jarak menengah dengan kapasitas daya yang relatif besar sebelum diturunkan kembali tegangannya. Sementara itu,

Jaringan Tegangan Rendah (JTR) atau jaringan sekunder merupakan sistem penyaluran listrik dari gardu distribusi langsung ke konsumen akhir, seperti rumah tangga, perkantoran, dan industri kecil, dengan tingkat tegangan yang lebih rendah dan aman digunakan. Kedua sistem jaringan tersebut saling terintegrasi dan berperan penting dalam memastikan energi listrik dapat tersalurkan secara optimal hingga sampai ke pengguna akhir.

2.1.2 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

1. Klasifikasi Saluran Transmisi

Secara umum, jalur distribusi listrik biasanya melibatkan pengiriman arus bolak-balik (AC). Sistem AC ini mencakup konfigurasi satu fase serta tiga fase. Dalam pengiriman arus bolak-balik, penerapan sistem tiga fase jauh lebih umum daripada yang satu fase, sebab mampu menyampaikan daya lebih besar, memiliki nilai instan yang tetap stabil, serta memudahkan pembentukan medan magnet berputar. Meskipun demikian, berkat kemajuan teknologi di bidang sistem kelistrikan, belakangan ini telah muncul inovasi pengiriman arus searah (DC) di sejumlah wilayah global. Di antara manfaat utama sistem DC tersebut adalah desain isolasi yang lebih praktis, tingkat efisiensi yang superior (karena faktor dayanya mencapai 1), serta bebas dari isu kestabilan, sehingga memungkinkan transmisi jarak jauh dengan lebih efektif. Akan tetapi, kekurangan mendasar dari pendekatan ini justru berada pada aspek biaya yang relatif mahal. [16].

Adapun saluran transmisi dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa bagian sebagai berikut:

a. Klasifikasi untuk keperluan diagram pengganti

Jaringan transmisi diklasifikasikan ke dalam 3 kelas berdasarkan panjang salurannya yaitu [17]:

1) Saluran transmisi pendek

Saluran transmisi pendek merupakan saluran yang memiliki panjang kurang dari 80 km. Pada jenis saluran ini,

pengaruh kapasitansi saluran relatif kecil sehingga sering diabaikan dalam proses analisis sistem tenaga listrik. Parameter yang lebih dominan dalam mempengaruhi karakteristik listrik saluran adalah resistansi dan induktansi. Oleh karena itu, model analisis pada saluran transmisi pendek biasanya hanya mempertimbangkan kedua parameter tersebut. Pendekatan ini digunakan untuk menyederhanakan perhitungan tanpa mengurangi tingkat akurasi yang signifikan, khususnya pada sistem transmisi dengan jarak relatif dekat.

2) Saluran transmisi menengah

Saluran transmisi menengah merupakan saluran yang memiliki panjang antara 80 km hingga 240 km. Pada kategori ini, pengaruh kapasitansi mulai memberikan dampak yang cukup signifikan terhadap kinerja sistem transmisi. Oleh karena itu, analisis saluran transmisi menengah harus mempertimbangkan tiga parameter utama, yaitu resistansi, induktansi, dan kapasitansi. Ketiga parameter tersebut biasanya dimodelkan sebagai konstanta saluran yang digabungkan dalam bentuk rangkaian pengganti tertentu, seperti model nominal π atau nominal T. Pendekatan ini bertujuan untuk memperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai karakteristik tegangan, arus, serta rugi-rugi daya pada sistem transmisi.

3) Saluran transmisi panjang

Saluran transmisi panjang merupakan saluran yang memiliki panjang lebih dari 240 km. Pada jenis saluran ini, seluruh parameter listrik seperti resistansi, induktansi, dan kapasitansi tidak lagi dianggap sebagai parameter yang terkonsentrasi pada titik tertentu, melainkan dipandang sebagai elemen yang terdistribusi sepanjang saluran transmisi. Pendekatan distribusi parameter ini diperlukan

karena pengaruh panjang saluran terhadap karakteristik gelombang listrik menjadi sangat signifikan. Analisis pada saluran transmisi panjang biasanya menggunakan metode matematis yang lebih kompleks untuk mendapatkan hasil perhitungan yang lebih akurat, terutama dalam perencanaan dan pengoperasian sistem transmisi jarak jauh.

b. Klasifikasi berdasarkan jenis

Berdasarkan jenisnya, dikenal dua macam saluran transmisi yaitu [18]:

1) Saluran udara (*overhead line*)

Sistem penyaluran energi listrik yang menggunakan konduktor terbuka yang dipasang dan digantungkan pada struktur penyangga seperti tiang atau menara transmisi. Pada sistem ini, penghantar listrik dipisahkan dari struktur penyangga menggunakan isolator untuk mencegah terjadinya kebocoran arus serta menjaga keamanan operasi jaringan. Saluran jenis ini banyak digunakan karena relatif lebih ekonomis, mudah dalam proses pemasangan, serta memudahkan pemeliharaan dan inspeksi jaringan. Selain itu, saluran udara umumnya digunakan untuk penyaluran listrik jarak jauh dengan kapasitas daya besar, meskipun memiliki kerentanan terhadap gangguan lingkungan seperti cuaca ekstrem, sambaran petir, maupun gangguan dari vegetasi dan benda asing.

2) Saluran bawah tanah (*underground line*)

Sistem distribusi dan transmisi tenaga listrik yang menggunakan kabel berisolasi khusus yang ditanam di dalam tanah. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan keandalan jaringan serta mengurangi risiko gangguan yang disebabkan oleh faktor eksternal seperti angin kencang, pohon tumbang, maupun gangguan visual pada lingkungan perkotaan. Penggunaan saluran bawah tanah juga

memberikan tingkat keamanan yang lebih baik karena penghantar listrik terlindungi oleh lapisan isolasi dan pelindung tambahan. Namun, pembangunan dan pemeliharaan saluran ini memerlukan biaya yang lebih tinggi serta proses perbaikan yang relatif lebih kompleks dibandingkan dengan saluran udara.

c. Klasifikasi berdasarkan level tegangan

Standar tegangan transmisi yang digunakan di Indonesia adalah tegangan 30 kV, 70 kV, dan 150 kV. Klasifikasi jaringan transmisi berdasarkan kelompok level tegangannya adalah [19]:

1) Jaringan tegangan rendah (*Low Voltage*)

Jaringan tegangan rendah merupakan sistem penyaluran tenaga listrik dengan level tegangan di bawah 1 kV. Jaringan ini umumnya digunakan untuk distribusi listrik langsung kepada pelanggan akhir, seperti rumah tangga, perkantoran, maupun usaha kecil. Sistem ini berfungsi sebagai tahap akhir dalam proses penyaluran tenaga listrik sebelum energi digunakan oleh konsumen

2) Jaringan tegangan menengah (*Medium Voltage*)

Jaringan tegangan menengah memiliki rentang tegangan antara 1 kV hingga 35 kV. Sistem ini biasanya digunakan sebagai jaringan distribusi primer yang menyalurkan energi listrik dari gardu induk menuju gardu distribusi atau pelanggan industri dengan kebutuhan daya menengah

3) Jaringan tegangan tinggi (*High Voltage*)

Jaringan tegangan tinggi beroperasi pada rentang tegangan di atas 35 kV hingga 245 kV. Jaringan ini berfungsi sebagai sistem transmisi utama yang menyalurkan energi listrik dalam jumlah besar dari pembangkit menuju gardu induk atau pusat beban dengan jarak yang relatif jauh

4) Jaringan tegangan ekstra tinggi (*Extra High Voltage*)

Jaringan tegangan ekstra tinggi memiliki rentang tegangan di atas 245 kV hingga 765 kV. Sistem ini digunakan untuk penyaluran daya listrik dalam kapasitas yang sangat besar serta jarak transmisi yang sangat panjang dengan tujuan meminimalkan rugi-rugi daya selama proses penyaluran.

5) Jaringan tegangan ultra tinggi (*Ultra High Voltage*)

Jaringan tegangan ultra tinggi merupakan sistem transmisi dengan level tegangan di atas 765 kV. Jaringan ini biasanya digunakan pada sistem interkoneksi skala besar antarwilayah atau antarnegara yang memerlukan kapasitas penyaluran daya sangat besar serta tingkat efisiensi yang sangat tinggi.

2. Komponen Utama Saluran Transmisi

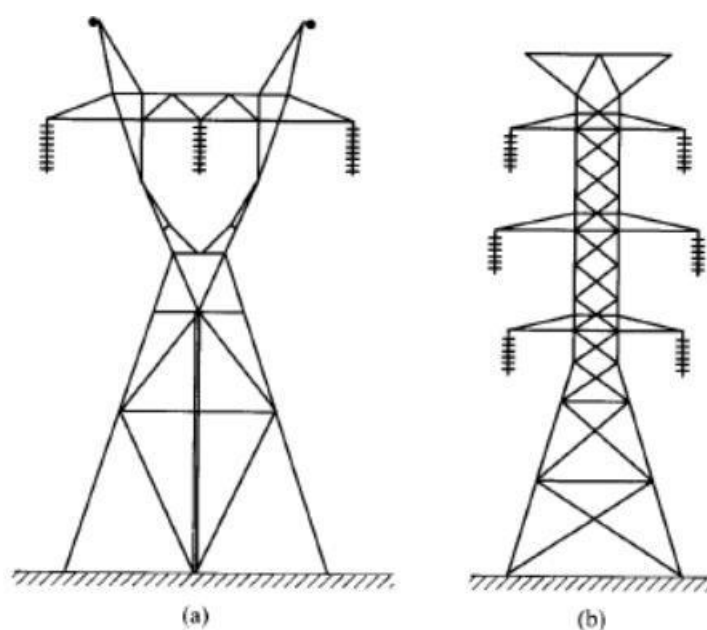
a. Menara dan Tiang Transmisi

Struktur penyangga transmisi, yang dikenal juga sebagai tower, memainkan peran krusial dalam infrastruktur distribusi daya listrik, dengan tujuan utama menyampaikan pasokan energi dari stasiun pembangkit ke berbagai titik pengelolaan muatan. Jenis-jenis penyangga ini mencakup rangka baja, pilon baja, pilon beton prategang, serta pilon berbahan kayu. Pada saluran tegangan ekstra rendah di bawah 70 kV, biasanya diterapkan pilon baja atau kayu, sementara untuk saluran tegangan ekstra tinggi melebihi 70 kV (disebut SUTET), struktur rangka baja menjadi pilihan utama. Rangka baja ini diklasifikasikan menjadi berbagai tipe sesuai peranannya, seperti rangka penopang, rangka terminal, rangka pembagi jalur, rangka sudut, dan rangka pengangkut.

Tabel 2.1 Tipe dan Fungsi Tower Transmisi 150 kV [20], [21]

Tipe Tower	Fungsi	Sudut belok jalur (α)
AA	<i>Suspension (Gantung)</i>	0°-3°

BB	<i>Tension/section (Tarik)</i>	3°-20°
CC	<i>Tension (Tarik dengan Jumper)</i>	20°-60°
DD	<i>Tension (Tarik dengan Jumper)</i>	60°-90°
EE	<i>Tension (Tarik dengan Jumper)</i>	>90°
FF	<i>Tension (Tarik dengan Jumper)</i>	>90°
GG	Transposisi	



Gambar 2.2 Menara Transmisi Tenaga Listrik untuk (a) Saluran Tunggal; (b) Saluran Ganda

Tiang transmisi terbagi atas enam berdasarkan fungsinya [22]:

1. Tiang tension (*tension tower*)

Struktur ini dirancang untuk menahan beban vertikal serta tegangan tarik yang timbul dari kabel konduktor pada jalur udara tegangan tinggi (SUTT) dan jalur transmisi udara tegangan ekstra tinggi (SUTET). Tiang tension biasanya dibagi menjadi:

- a. Tiang sudut (*angle tower*), yaitu jenis tiang tension yang menanggung tarikan akibat perubahan arah pada jalur transmisi tegangan tinggi.
 - b. Tiang ujung mati (*dead-end tower*), yaitu tiang tension yang dibuat khusus untuk menahan tegangan tarik konduktor hanya dari satu sisi. Tiang ini sering dipasang di bagian akhir jalur yang menghubungkan ke area *switchyard* di gardu induk.
2. Tiang suspensi (*suspension tower*)

Tiang dengan jenis ini pada umumnya dirancang untuk menahan beban vertikal yang berasal dari berat konduktor, isolator, serta komponen pendukung lainnya pada sistem transmisi tenaga listrik. Struktur tiang ini berfungsi sebagai penopang utama yang menjaga posisi konduktor tetap stabil sesuai dengan ketinggian dan jarak aman yang telah ditentukan. Oleh karena itu, beban mekanis yang diterima cenderung lebih sederhana karena dominan berasal dari gaya berat konduktor dan pengaruh lingkungan seperti angin, tanpa adanya tekanan tarik lateral yang besar akibat perubahan arah saluran transmisi.
 3. Tiang pemisah (*section tower*)

Tiang ini ditempatkan di antara tiang-tiang suspensi untuk mempermudah proses pemasangan selama konstruksi, khususnya saat proses penarikan kabel konduktor. Tiang semacam ini umumnya memiliki kemiringan arah yang minimal.
 4. Tiang transposisi

Fungsi utama tiang ini adalah sebagai tempat untuk melakukan perpindahan posisi antar-fase pada susunan konduktor dalam jaringan transmisi tegangan tinggi. Tujuannya untuk menjaga keseimbangan sistem,

meningkatkan efisiensi penyaluran listrik, serta mengurangi potensi gangguan pada jaringan.

5. Tiang gerbang (*gantry power*)

Tiang dengan desain menyerupai bentuk gerbang, yang digunakan pada titik persilangan antara dua jalur transmisi yang memerlukan ketinggian rendah karena faktor khusus (seperti di sekitar bandara atau persilangan tiang). Tiang ini biasanya dibangun di bawah jalur transmisi yang sudah ada sebelumnya.

6. Tiang gabungan (*combined tower*)

Jenis tiang ini dimanfaatkan secara bersama oleh dua jalur transmisi yang memiliki level tegangan operasional berbeda.

Pada sistem transmisi SUTT 150kV terdapat 2 jenis tower yaitu *tower tension* dan *tower suspension*. Dalam rangka menghantarkan energi listrik ke konsumen, konstruksi konduktor pada SUTT 150kV didesain menggunakan satu konduktor (*single conductor*), dua konduktor (*double conductor*) maupun empat konduktor (*quad conductor*). Berdasarkan data yang ada, sebagian besar sistem transmisi SUTT 150kV di wilayah UPT Salatiga menggunakan *double conductor* sebagai media hantar energi listrik, sedangkan sebagai media isolasinya menggunakan dua string isolator (*double isolator*) sehingga dapat berfungsi secara maksimal baik dari segi elektrik maupun mekanik.

b. Isolator

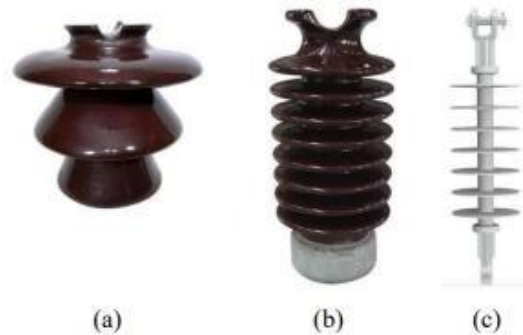
Isolator merupakan suatu peralatan listrik yang berfungsi sebagai penyekat antara tiang atau menara jaringan listrik dengan penghantar bertegangan [23] . Adapun fungsi utama isolator selain yang disebutkan di atas ialah:

- 1) Menyekat atau mengisolir kawat penghantar dengan bagian yang ditanahkan dan kawat penghantar dengan kawat penghantar lainnya.
- 2) Sebagai pemikul beban mekanis akibat adanya berat dari konduktor penghantar dan/atau gaya tarik yang ditimbulkan oleh kawat penghantar.
- 3) Sebagai bagian yang membatasi kawat penghantar agar memiliki jarak yang tetap.

Fungsi utama isolasi adalah memisahkan berbagai komponen yang memiliki perbedaan potensial tegangan, sehingga dapat mencegah munculnya arus loncat (*flash-over*) atau percikan listrik (*spark-over*) antar komponen tersebut. Jika isolasi pada perangkat bertegangan tinggi mengalami kegagalan saat proses operasi berlangsung, hal ini berpotensi merusak perangkat secara keseluruhan dan mengacaukan kelangsungan fungsi sistem secara menyeluruh. [21].

Elemen isolator pada sistem transmisi listrik memiliki peran utama dalam menjaga keamanan kabel pengantar daya, sekaligus berfungsi sebagai penyangga untuk jalur transmisi yang direntangkan dari satu tiang ke tiang berikutnya. Jenis isolator ini dibedakan menjadi dua kategori, yakni isolator penopang dan isolator penarik, yang diterapkan pada posisi tiang listrik untuk aplikasi tegangan sedang maupun tinggi. Secara umum, isolator tersebut dibuat menggunakan material keramik atau kaca. [24] . Menurut penerapannya serta desain bangunannya, isolator listrik dapat dikategorikan menjadi tiga macam, yakni isolator tiang jalur (*post-line insulator*), isolator tipe pasak (*pin-type insulator*), serta isolator penyangga (*suspension insulator*). Material pembuat isolator diwajibkan mempunyai ketahanan resistansi listrik yang superior, sehingga bisa menghindari risiko arus bocor dan mengatasi potensi

terjadinya tegangan tembus di bawah beban listrik bertegangan ekstrem. [21].



Gambar 2.3 Isolator Pasak (a); Isolator Pos Saluran (b); Isolator Gantung (c)

c. Konduktor

Kawat konduktor didefinisikan sebagai jenis kawat yang dirancang untuk mengalirkan arus listrik secara efektif, dengan karakteristik konduktivitas listrik yang optimal, ketahanan tinggi terhadap suhu panas, serta kekuatan mekanik yang superior. [21]. Jenis kawat konduktor yang umum dipakai dalam sistem transmisi listrik mencakup kawat tembaga murni dengan tingkat konduktivitas mencapai 100% (Cu 100%), varian kawat tembaga berkonduktivitas 97,5%, maupun kawat aluminium yang memiliki konduktivitas 61% (Al 61%). Beberapa jenis kawat aluminium yang digunakan pada jaringan transmisi diantaranya [21]:

1) AAC (*All-Aluminium Conductor*)

AAC merupakan jenis konduktor yang seluruh bagiannya terbuat dari aluminium murni tanpa penguat tambahan. Konduktor ini memiliki konduktivitas listrik yang tinggi dan bobot yang relatif ringan, sehingga banyak digunakan pada jaringan distribusi jarak pendek atau wilayah yang tidak membutuhkan kekuatan mekanis tinggi.

2) AAAC (*All-Aluminium Alloy Conductor*)

AAAC merupakan konduktor yang terbuat dari campuran aluminium dengan unsur logam lain seperti magnesium dan silikon. Penambahan unsur tersebut bertujuan untuk meningkatkan kekuatan mekanis serta ketahanan terhadap korosi tanpa mengurangi kemampuan hantar listrik secara signifikan.

3) ACSR (*Aluminium Conductor, Steel-Reinforced*)

ACSR merupakan konduktor yang terdiri dari lapisan aluminium sebagai penghantar arus listrik dan inti baja sebagai penguat struktur. Inti baja berfungsi meningkatkan kekuatan tarik konduktor sehingga mampu menahan beban mekanis yang besar, terutama pada jaringan transmisi jarak jauh atau bentangan panjang antar tower. Konduktor jenis ini, bagian dalamnya berupa steel yang mempunyai kuat mekanik tinggi, sedangkan bagian luarnya berupa aluminium yang mempunyai konduktivitas tinggi. Sifat elektron lebih menyukai bagian luar konduktor daripada bagian sebelah dalam konduktor, maka pada sebagian besar SUTT maupun SUTET menggunakan konduktor jenis ACSR. Untuk daerah yang udaranya mengandung kadar belerang tinggi dipakai jenis ACSR/AS, yaitu konduktor jenis ACSR yang konduktor steelnya dilapisi dengan aluminium.



Gambar 2.4 Penampang Kawat Penghantar ACSR

4) TACSR (*Thermal Aluminium Conductor, Steel-Reinforced*)

Pada saluran transmisi yang mempunyai kapasitas penyaluran /beban sistem tinggi maka dipasang konduktor jenis TACSR. Konduktor jenis ini mempunyai kapasitas lebih besar tetapi berat konduktor tidak mengalami perubahan yang banyak, tapi berpengaruh terhadap sagging

5) ACAR (*Aluminium Conductor, Alloy Reinforced*)

ACAR merupakan konduktor aluminium yang diperkuat menggunakan logam campuran sebagai inti penguatnya. Konduktor ini dirancang untuk memberikan kombinasi antara konduktivitas listrik yang baik dengan kekuatan mekanis yang tinggi.

d. Kawat Tanah

Ground wires atau sering disebut kawat tanah berfungsi melindungi kawat penghantar atau kawat fasa terhadap sambaran petir. Oleh karena itu, kawat tanah juga disebut kawat pelindung (*shield wires*). Kawat tanah umumnya menggunakan kawat baja yang lebih murah, namun sering juga menggunakan kawat ACSR. Beberapa syarat yang harus terpenuhi agar suatu kawat tanah dapat memenuhi fungsinya dengan baik sebagai pelindung dari sambaran petir adalah sebagai berikut [25]:

- 1) Letaknya harus cukup tinggi di atas fasa konduktor agar dapat menangkap (*intercept*) serangan langsung.

- 2) Letaknya harus mempunyai jarak aman (*clearance*) yang cukup di tengah rentangan terhadap konduktor.
- 3) Tahanan kaki dari menara harus cukup rendah dengan tujuan memperkecil tegangan yang melintas pada isolator.

2.1.3 Peralatan *Adjustable Strain Carrier Yoke*

Pembuatan peralatan *Adjustable Strain Carrier Yoke* digunakan sebagai salah satu peralatan utama dalam proses penggantian isolator pada tower tension SUTT 150 kV konfigurasi double konduktor double isolator. Peralatan utama yang lain dalam proses penggantian isolator ini, antara lain:

1. *Single Yoke Strain Carrier*

Peralatan ini berfungsi sebagai penopang sementara beban konduktor dan rangkaian isolator saat proses penggantian dilakukan. Single yoke strain carrier membantu menjaga posisi konduktor tetap stabil sehingga beban mekanis dapat dialihkan dengan aman selama pekerjaan pemeliharaan berlangsung

2. *Strain Pole*

Strain pole digunakan sebagai alat bantu penahan gaya tarik konduktor. Peralatan ini berperan dalam menjaga keseimbangan tegangan mekanis pada konduktor agar tidak terjadi pergeseran atau ketidakseimbangan saat isolator dilepas maupun dipasang kembali.

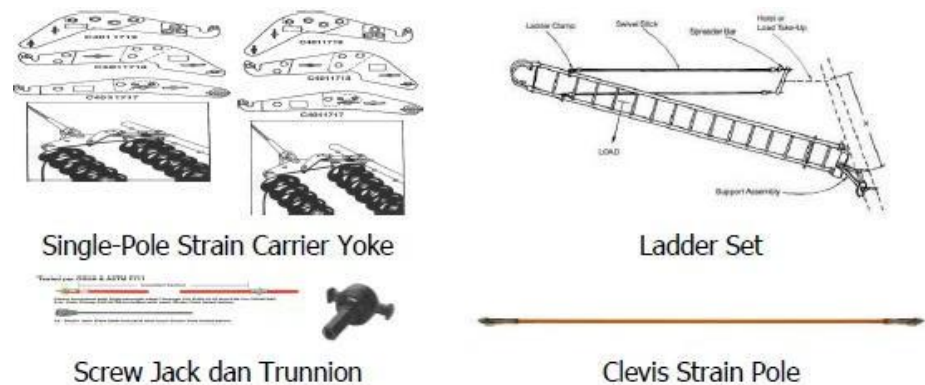
3. *Screw Jack dan Trunnion*

Screw jack berfungsi sebagai alat pengangkat atau penyesuai posisi komponen secara presisi, sedangkan trunnion digunakan sebagai titik tumpu atau penghubung yang memungkinkan pergerakan alat secara fleksibel. Kombinasi keduanya memudahkan proses pengaturan posisi konduktor maupun isolator selama pekerjaan berlangsung.

4. *Ladder Set*

Ladder set merupakan perlengkapan akses kerja yang digunakan oleh petugas untuk mencapai titik pekerjaan pada tower transmisi. Peralatan ini dirancang untuk memberikan keamanan dan

kestabilan bagi pekerja saat melakukan penggantian isolator di ketinggian.



Gambar 2.5 Peralatan Utama Penggantian Isolator

Fitur dari *single-pole strain carrier yoke* yaitu dapat digunakan dengan tiang regangan yang dapat disesuaikan untuk menghilangkan regangan dari satu string dari beberapa string isolator buntu, harus dibeli berpasangan agar sesuai dengan konstruksi pelat yoke tertentu, rakitan *yoke* yang sama dapat digunakan pada ujung panas dan ujung dingin string isolator saat dikaitkan ke perangkat keras pelat *yoke* dan semua kuk ini diberi peringkat 15.000 lbs. beban maksimum per senar isolator [26].

Tabel 2.2 Spesifikasi Yoke Plates [26]

Catalog No.	Fits Yoke Plates	Weight
C4011719	Flat Plates up to $\frac{3}{4}$ " thick	25 lb./11.3 kg.
C4011718	Flat Plates up to 1" thick	25 lb./11.3 kg.
C4011717	Rectangular or Triangular plates up to $\frac{3}{4}$ " thick	25 lb./11.3 kg.

Kriteria keberhasilan implementasi *Adjustable Strain Carrier Yoke* sebagai acuan pengukuran keberhasilan penelitian berdasarkan standar SPLN T5.012-2:2010 dan IEC 61284:1997 tentang *Overhead Lines – Requirements and Tests for Fittings* sebagai berikut.

1. Kriteria Kinerja Operasional & Efisiensi Waktu
 - a. Efisiensi Waktu Penggantian Isolator

Efisiensi waktu dalam proses penggantian isolator merupakan salah satu indikator keberhasilan dalam pelaksanaan pekerjaan pemeliharaan jaringan transmisi tenaga listrik. Upaya peningkatan efisiensi ini dilakukan melalui perbaikan metode kerja, penggunaan peralatan yang lebih efektif, serta peningkatan koordinasi antar personel yang terlibat dalam pekerjaan. Dengan adanya pengelolaan pekerjaan yang lebih terencana dan sistematis, proses penggantian isolator dapat dilakukan dengan lebih cepat tanpa mengabaikan standar keselamatan kerja dan kualitas pemasangan peralatan.

Hasil optimalisasi menunjukkan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk mengganti satu string isolator mengalami penurunan yang cukup signifikan, yaitu setidaknya sebesar 40% dibandingkan waktu kerja sebelumnya. Apabila sebelumnya proses penggantian membutuhkan waktu sekitar 4 hingga 6 jam, maka setelah dilakukan peningkatan metode kerja, durasi pekerjaan dapat dipersingkat menjadi sekitar 2,5 hingga 3,5 jam. Pengurangan waktu tersebut memberikan dampak positif terhadap keandalan sistem tenaga listrik karena dapat meminimalkan durasi gangguan operasional serta meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dalam kegiatan pemeliharaan jaringan transmisi.

b. Efisiensi Waktu Penyesuaian Peralatan

Efisiensi waktu dalam proses penyesuaian peralatan menjadi salah satu aspek penting dalam mendukung kelancaran pekerjaan di lapangan, khususnya pada kegiatan pemasangan dan pengaturan alat kerja. Proses pemasangan awal (*setup*) serta penyesuaian alat memerlukan ketelitian dan ketepatan agar peralatan dapat berfungsi secara optimal sesuai dengan kebutuhan pekerjaan. Dengan adanya pengembangan metode kerja dan penggunaan peralatan yang lebih fleksibel, proses

penyesuaian alat dapat dilakukan dengan lebih cepat tanpa mengurangi tingkat akurasi maupun standar keselamatan kerja.

Dalam penerapannya, durasi yang dibutuhkan untuk melakukan pemasangan awal dan penyesuaian alat di lapangan ditargetkan tidak lebih dari 15 menit untuk setiap perubahan sudut maupun panjang alat. Target waktu tersebut menunjukkan adanya peningkatan efisiensi yang cukup signifikan apabila dibandingkan dengan metode konvensional, yang umumnya memerlukan waktu sekitar 30 hingga 45 menit untuk proses penyesuaian serupa.

c. Pengurangan Proses Percobaan Penyesuaian

Jumlah percobaan penyesuaian alat atau proses *trial and error* dalam pelaksanaan pekerjaan dapat diminimalkan secara signifikan melalui penerapan metode kerja yang lebih terencana serta penggunaan peralatan yang dirancang dengan tingkat presisi yang lebih baik. Pengurangan jumlah percobaan ini menunjukkan bahwa proses penyesuaian alat dapat dilakukan dengan lebih akurat sejak tahap awal pemasangan, sehingga waktu pelaksanaan pekerjaan menjadi lebih efisien. Selain itu, berkurangnya proses percobaan juga dapat mengurangi potensi kesalahan pemasangan serta meminimalkan risiko kerusakan pada peralatan maupun komponen jaringan yang sedang dikerjakan.

Dengan penerapan metode yang lebih optimal, jumlah percobaan penyesuaian alat dapat ditekan hingga hanya berkisar antara 1 hingga 2 kali sebelum posisi alat dinyatakan sesuai dan siap digunakan. Kondisi ini jauh lebih efisien dibandingkan dengan metode konvensional yang umumnya memerlukan sekitar 3 hingga 5 kali penyesuaian untuk mencapai posisi yang tepat. Efisiensi tersebut tidak hanya berdampak pada percepatan waktu kerja, tetapi juga meningkatkan produktivitas tenaga kerja, mengurangi kelelahan operator, serta mendukung

terciptanya proses pekerjaan yang lebih aman, efektif, dan berkualitas.

d. Optimalisasi Total Durasi Pekerjaan

Optimalisasi total durasi pekerjaan merupakan salah satu upaya penting dalam meningkatkan efisiensi pelaksanaan kegiatan pemeliharaan dan penggantian isolator pada jaringan transmisi tenaga listrik. Proses pekerjaan ini mencakup beberapa tahapan, yaitu persiapan peralatan dan personel, pelaksanaan instalasi penggantian isolator, hingga proses penyetelan serta penyesuaian alat agar dapat berfungsi dengan baik. Seluruh rangkaian kegiatan tersebut direncanakan dan dilaksanakan secara sistematis agar pekerjaan dapat berlangsung secara efektif tanpa mengurangi aspek keselamatan kerja maupun kualitas hasil pekerjaan.

Dalam pelaksanaannya, keseluruhan waktu pekerjaan ditargetkan dapat diselesaikan dalam durasi maksimal 3 jam untuk setiap satu string isolator. Penetapan target waktu ini bertujuan untuk meminimalkan gangguan terhadap operasional sistem tenaga listrik serta mengurangi potensi waktu pemadaman atau pembatasan beban. Selain itu, pengaturan durasi pekerjaan yang optimal juga mendukung peningkatan produktivitas tenaga kerja, efisiensi penggunaan peralatan, serta menjaga keandalan jaringan transmisi agar tetap beroperasi secara stabil dan berkelanjutan.

2. Kriteria Keselamatan Kerja & Risk Mitigation

- a. Distribusi beban pada kedua string isolator merata dengan deviasi maksimal 10% (*unbalanced loading <10%*), memvalidasi eliminasi risk kondisi *unbalanced loading baseline*.
- b. Alat tetap stabil saat pembebanan hingga SWL (6 ton) tanpa defleksi atau *oscillation* yang tidak aman.

- c. Tidak ada slip atau *sudden release* pada sambungan mekanis dengan sistem *double locking* dan *safety pin* terintegrasi dan berfungsi optimal.
 - d. Exposure time pekerja berkurang minimum 50% dari baseline 4-6 jam menjadi 2,5-3,5 jam, mengurangi fatigue dan *human error*.
 - e. Ergonomi dan kemudahan *handling* di ketinggian memenuhi standar *work-at-height safety* (*comfortable grip, clear operational procedure*).
3. Kriteria Kepatuhan Teknis & Standar
- a. Kapasitas beban kerja aman (SWL)
Alat dirancang memiliki kapasitas beban kerja aman (SWL) minimal sebesar 6 ton untuk setiap satu string isolator. Kapasitas ini ditetapkan dengan mempertimbangkan faktor keamanan sebesar 1,6 sesuai dengan standar operasional dan keselamatan kerja yang berlaku di PLN.
 - b. Kemampuan Menahan Beban Maksimum (*Ultimate Load*)
Selain memenuhi kapasitas beban kerja normal, alat juga dirancang mampu menahan beban maksimum hingga 9 ton atau setara dengan 150% dari nilai SWL. Pengujian ultimate load dilakukan untuk memastikan bahwa alat tidak mengalami kegagalan struktur (*structural failure*) maupun deformasi permanen ketika menerima beban ekstrem.
 - c. Rentang *adjustable length*
Alat memiliki rentang penyesuaian panjang antara 800 mm hingga 1100 mm yang dirancang untuk mengakomodasi variasi jarak antar isolator pada berbagai konfigurasi tower di lapangan. Sistem penyesuaian ini dilengkapi dengan minimal lima posisi pengaturan (*preset positions*) sehingga memudahkan teknisi dalam melakukan penyesuaian secara cepat dan presisi tanpa memerlukan modifikasi tambahan.
 - d. Rentang *adjustable angle*

Alat juga dirancang memiliki kemampuan penyesuaian sudut kerja antara 0° hingga 30° . Rentang sudut ini memungkinkan alat menyesuaikan posisi dengan berbagai tipe tower transmisi seperti tipe BB, CC, dan DD. Sistem pengaturan sudut dilengkapi dengan minimal tiga posisi sudut tetap (preset angle positions) guna meningkatkan stabilitas alat serta mempermudah proses instalasi di lapangan.

e. Material Konstruksi dan Ketahanan Korosi

Material yang digunakan dalam konstruksi alat dipilih dengan mempertimbangkan ketahanan terhadap korosi dan kondisi lingkungan ekstrem seperti kelembapan tinggi serta paparan cuaca. Selain itu, spesifikasi material harus memenuhi standar internasional IEC 61284:2021 yang mengatur persyaratan teknis untuk perlengkapan saluran udara tegangan tinggi, sehingga keandalan dan umur pakai alat dapat terjaga.

f. Bobot Total Alat

Bobot keseluruhan alat dirancang tidak melebihi 30 kg agar memudahkan proses mobilisasi, pengangkutan, serta penanganan oleh teknisi di lapangan. Berat yang relatif ringan namun tetap mempertahankan kekuatan struktur menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi kerja dan keselamatan pekerja selama proses pemasangan maupun pengoperasian alat.

4. Kriteria Penurunan Angka Kegagalan Pekerjaan

- a. Implementasi ASCY dalam mock-up test menunjukkan kegagalan pekerjaan turun signifikan dari baseline 80% menjadi target $<20\%$, dengan failure mode berbeda dari baseline.
- b. Tidak ada kerusakan sekunder pada komponen adjacency (fitting clamp, hardware, isolator pendamping) selama proses penggantian dengan ASCY.
- c. Isolator yang baru terpasang tetap intact tanpa kerusakan mekanis akibat *unbalanced loading* atau *overstress*.

- d. Proses instalasi dapat mengatasi variasi kondisi lapangan (sudut tower berbeda, jarak antar isolator bervariasi) tanpa kegagalan setup atau adjustment.
5. Kriteria Implementabilitas & Readiness Operasional
- a. Prosedur operasional ASCY dapat didokumentasikan secara clear dengan *step-by-step instruction* yang dapat dipahami teknisi lapangan tanpa *extensive training*.
 - b. *Operational constraint* dan *challenge* praktis implementasi telah teridentifikasi dan teratasi atau memiliki *mitigation plan* yang jelas.
 - c. *Spare parts* dan *maintenance requirement* minimal dan mudah diakses dari logistik PLN.
 - d. Alat dapat disimpan dan diangkut dengan aman tanpa *damage* dengan *transportation standard equipment* yang tersedia di PLN.

2.1.4 SWL (*Safe Working Load*)

SWL (*safe working load*) atau kapasitas beban kerja aman pada peralatan merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi agar peralatan tersebut dapat digunakan dalam pelaksanaan PDKB. Sangat penting untuk menghitung berbagai beban dan gaya yang timbul saat mengoperasikan peralatan dalam kondisi bertegangan. Adjustable Strain Carrier Yoke dirancang sedemikian rupa sehingga apabila prosedur penggunaan peralatan yang direkomendasikan dipatuhi, maka batas kemampuan mekanis dari perlengkapan tidak akan terlewat. Setiap peralatan yang digunakan dalam kondisi bertegangan memiliki batasan kekuatan operasional tertentu.

Rumus untuk menghitung tarikan pada satu konduktor adalah:

$$= \frac{.2}{8.} \quad (2.1)$$

Dimana:

T = Gaya tarik konduktor (kg)

W = Berat massa konduktor per satuan panjang (kg/m).

L = Panjang gawang / *Span* antar struktur (m).

d = *Sag* / Lendutan konduktor (m).

Ketentuan SWL untuk peralatan kerja mengacu pada prosedur adalah sebesar 3 kali beban kerja.

2.2 Penelitian yang Relevan

Menurut Jun et al. (2019) dalam jurnal yang berjudul "*Development and UPTlication of Live Replacement of Insulator Suspension Tool Components for Transmission Lines*", Penelitian ini berfokus pada pengembangan alat bantu penggantian isolator pada saluran transmisi 500 kV yang memiliki risiko keselamatan tinggi. Metodologi penelitian menggunakan pendekatan desain alat berdasarkan analisis kekuatan material serta ergonomi kerja operator lapangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat pengganti baru yang dirancang lebih ringan dan aman dibandingkan alat konvensional, sehingga mampu menekan waktu padam dan meningkatkan keandalan sistem transmisi. Namun, penelitian ini belum diaplikasikan untuk sistem tegangan menengah (150 kV) dengan kondisi kerja tropis dan akses terbatas seperti pada jaringan PLN [27].

Menurut Garcia et al. (2022) dalam jurnal yang berjudul "*Development of Methodology for Insulator Replacement in ± 800 kV DC Strings Using Live Line Procedures*", Penelitian ini bertujuan mengembangkan metodologi penggantian isolator pada saluran transmisi ± 800 kV DC tanpa pemadaman (*live line*). Pendekatan yang digunakan meliputi simulasi numerik, perancangan alat prototipe, serta uji lapangan terhadap prosedur keselamatan kerja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metodologi yang dikembangkan mampu meningkatkan keselamatan kerja hingga 30% dan mengurangi waktu pekerjaan sebesar 25% dibanding metode konvensional. Meskipun efektif untuk sistem ± 800 kV DC, penelitian ini belum mengadaptasi desain dan prosedur serupa untuk sistem 150 kV AC yang memiliki karakteristik beban tarik serta bentuk *yoke* yang berbeda [28].

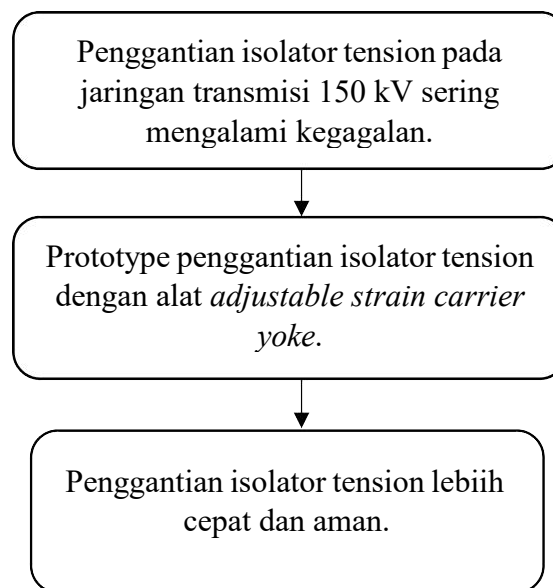
Menurut Sanyal et al. (2020) dalam jurnal yang berjudul *"Replacement Strategy of Insulators Established by Probability of Failure"*, Penelitian ini mengkaji masalah penurunan kekuatan isolator akibat penuaan material dan ketidakpastian waktu penggantian yang tepat pada jaringan transmisi 154 kV. Metode penelitian dilakukan melalui uji mekanik dan listrik terhadap 30 isolator porselen berusia antara 10 hingga 50 tahun, kemudian dianalisis menggunakan distribusi Weibull untuk menentukan probabilitas kegagalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan mekanik isolator menurun seiring bertambahnya usia dengan kualitas turun hingga 89,3% pada usia 50 tahun, serta probabilitas kegagalan meningkat sebesar 2,7% dibanding isolator baru. Penelitian ini masih terbatas pada analisis pasca-kerusakan (post-mortem) dan belum menyediakan sistem prediksi real-time untuk mendeteksi potensi kegagalan isolator di lapangan [29].

Menurut Fu et al (2022) dalam jurnal yang berjudul *"Research on Independent Live Replacement Method and Equipment for Suspension Clamp of ± 800 kV Transmission Line"*, Penelitian ini mengkaji pengembangan metode dan peralatan untuk penggantian clamp serta isolator pada saluran transmisi bertegangan tinggi tanpa pemadaman. Pendekatan yang digunakan meliputi analisis desain struktural, simulasi beban, dan verifikasi kinerja alat dengan uji keamanan kerja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode penggantian independen dapat mengurangi beban transfer hingga satu per enam dari metode tradisional, serta meningkatkan efisiensi dan keselamatan kerja secara signifikan. Namun, penelitian ini belum diuji untuk sistem 150 kV dan belum menerapkan konsep adjustable yoke yang dapat menyesuaikan dengan berbagai tipe isolator dan konfigurasi menara [30].

Menurut Monemi et al (2024) dalam jurnal yang berjudul *"Failure Type and Failure Level Detection of Insulators According to Monitored Leakage Current"*, Penelitian ini bertujuan mengembangkan metode deteksi kegagalan isolator secara dini dengan memanfaatkan pemantauan arus bocor (*leakage current*) secara *real-time*. Metode yang digunakan adalah analisis sinyal domain waktu dan frekuensi untuk mengidentifikasi enam indikator kondisi isolator (C1–C6) yang diolah menggunakan jaringan saraf tiruan (ANN).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem deteksi ini mampu mengidentifikasi tingkat kerusakan isolator dengan akurasi tinggi berdasarkan pola arus bocor yang terukur. Meskipun demikian, penelitian ini belum mengintegrasikan sistem deteksi tersebut dengan perangkat mekanik lapangan seperti *adjustable strain carrier yoke* untuk mendukung proses penggantian isolator secara langsung di lapangan [31].

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.6 Kerangka Pemikiran

Penggantian isolator tension pada SUTT 150 kV banyak mengalami kegagalan karena tidak tersedianya alat bantu yang sesuai untuk menahan beban tarik konduktor saat isolator diganti. Single yoke strain carrier konvensional yang umum digunakan bersifat statis, tidak dapat diatur panjang dan sudutnya dan sering menimbulkan risiko ketidakseimbangan beban dan kegagalan mekanis. Oleh karena itu, pengembangan prototype penggantian isolator tension dengan alat *adjustable strain carrier yoke* dengan konfigurasi *double conductor double isolator string* tanpa perlu pemadaman dapat membantu teknisi dalam pekerjaannya. Adanya alat ini

membantu pekerjaan penggantian isolator tension menjadi lebih aman, cepat serta meminimalisir kegagalan.