

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Menurut **(Tambunan & Sinaga, 2024)** dalam jurnalnya yang berjudul "Tinjauan Keandalan Kondisi Kontigensi Jaringan Tenaga Listrik 150 kV Sub Sistem Aceh" jurnal ini membahas analisis kontingensi pada sistem tenaga listrik 150 kV dengan menggunakan metode indeks performansi (performance index). Analisis dilakukan untuk mengevaluasi dampak gangguan tertentu, seperti lepasnya satu elemen sistem, terhadap perubahan profil tegangan dan aliran daya pada jaringan transmisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode indeks performansi efektif dalam mengidentifikasi kondisi kontingensi yang paling kritis, sehingga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi keamanan dan keandalan operasi sistem tenaga listrik.

Penelitian yang dilakukan **((Ten{ga, n.d.)** mengkaji proses energize trafo tenaga pada tahap komisioning instalasi tenaga listrik melalui pemodelan dan simulasi menggunakan DIGSILENT PowerFactory. Kajian dilakukan pada sistem kelistrikan dengan kapasitas pembangkit yang terbatas untuk menilai kemampuan sistem dalam mempertahankan kestabilan tegangan dan frekuensi selama pelaksanaan energize trafo.

Penelitian yang dilakukan **(Listrik et al., 2025)** menganalisis pembangunan Gardu Induk 150 kV untuk memenuhi kebutuhan daya kawasan industri melalui studi aliran daya, kondisi tegangan, dan hubung singkat sesuai standar yang berlaku. Hasil analisis menunjukkan bahwa konfigurasi sistem transmisi 150 kV menuju GI 150 kV KIT Batang mampu melayani kebutuhan daya 90 MVA dan memenuhi ketentuan Grid Code Sistem Jawa–Madura–Bali.

Penelitian **(Guarango, 2022)** membahas analisis perencanaan sistem kelistrikan Kalimantan Barat, khususnya Sistem Khatulistiwa, menggunakan metode optimal power flow dengan simulasi DIGSILENT PowerFactory untuk menjaga keandalan dan keekonomian suplai listrik. Hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi pengoperasian

pembangkit batubara dengan pembangkit berbahan bakar minyak mampu meningkatkan kualitas tegangan sistem sekaligus menjaga biaya pokok produksi tetap terkendali

Penelitian **(Stabilitas et al., n.d.)** mengkaji pengoperasian saluran transmisi dan Gardu Induk 150 kV untuk menyalurkan daya pembangkit ke pusat beban. Hasil simulasi load flow dan kestabilan transien menunjukkan sistem beroperasi normal dengan rugi-rugi daya yang rendah, meskipun gangguan tiga fasa dapat memengaruhi kestabilan sudut rotor dan frekuensi sistem.

Penelitian **(Dhamara et al., 2022)** dengan judul "Analisis Aliran Daya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Pulau Pramuka. Hasil studi aliran daya menunjukkan bahwa PLTS layak beroperasi hingga lima tahun ke depan, namun diperlukan perhatian terhadap kapasitas penghantar karena berpotensi mengalami kelebihan beban.

(Kusuma et al., 2025) dengan judul "Analisa Perbaikan Jatuh Tegangan Dan Losses Pada Penyulang Ktb 01 Di PT PIN (Persero) Ulp Kota Bangun Up3 Samarinda". Penelitian ini mengkaji upaya peningkatan kualitas tegangan dan keandalan distribusi listrik pada Penyulang KTB01 di ULP Kota Bangun, UP3 Samarinda, yang mengalami jatuh tegangan melebihi standar PLN. Hasil kajian menunjukkan bahwa pecah beban ke Penyulang KTB05 melalui LBS HDR merupakan solusi paling efektif dalam memperbaiki profil tegangan dan menurunkan rugi-rugi daya, dengan peningkatan tegangan ujung jaringan menjadi 18,6 kV serta penurunan losses menjadi 279,4 kW.

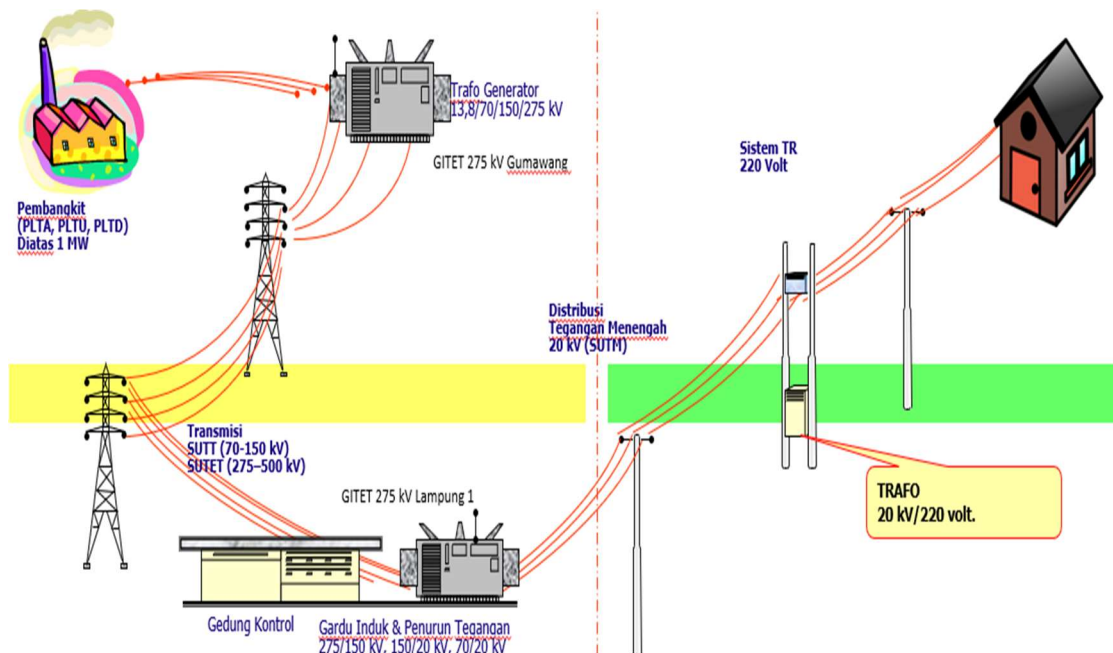
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah kumpulan pusat pembangkit, saluran transmisi, dan jaringan distribusi yang saling terhubung untuk menyalurkan energi listrik dari pembangkit ke konsumen/kawasan beban **(Nelwan et al., 2015)**. Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan sistem yang saling terhubung dan berfungsi untuk memproduksi, menyalurkan, serta mendistribusikan energi listrik dari sumber pembangkitan sampai ke pusat beban. Sistem ini tersusun atas tiga bagian utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi yang

bekerja secara terkoordinasi guna menjamin kontinuitas penyaluran serta menjaga kualitas tegangan sesuai batas operasi yang ditetapkan. Keterpaduan antar subsistem tersebut diperlukan agar keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dan daya yang dikonsumsi dapat terjaga secara optimal.

Energi listrik pada umumnya dihasilkan oleh unit pembangkit yang lokasinya berada jauh dari pusat-pusat permukiman atau daerah beban. Pembangkit listrik adalah tempat dimana dibangkitkannya energi Listrik **(Desita, 2021)**. Daya listrik yang telah dibangkitkan kemudian disalurkan melalui sistem transmisi yang beroperasi pada level tegangan tinggi hingga tegangan ekstra tinggi. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) adalah sarana diatas tanah untuk menyalurkan tenaga listrik dari Pusat Pembangkit ke Gardu Induk (GI) atau dari GI ke GI lainnya Penggunaan tegangan tersebut bertujuan untuk menekan rugi-rugi daya dan meminimalkan jatuh tegangan, mengingat jarak penyaluran pada saluran transmisi relatif panjang. Selanjutnya, energi listrik diteruskan ke sistem distribusi yang berperan sebagai jaringan penyaluran akhir untuk menyuplai energi listrik kepada pelanggan sesuai kebutuhan.



Gambar 2. 1 Skema Penyaluran Tenaga Listrik

Fungsi masing-masing komponen secara garis besar adalah sebagai berikut :

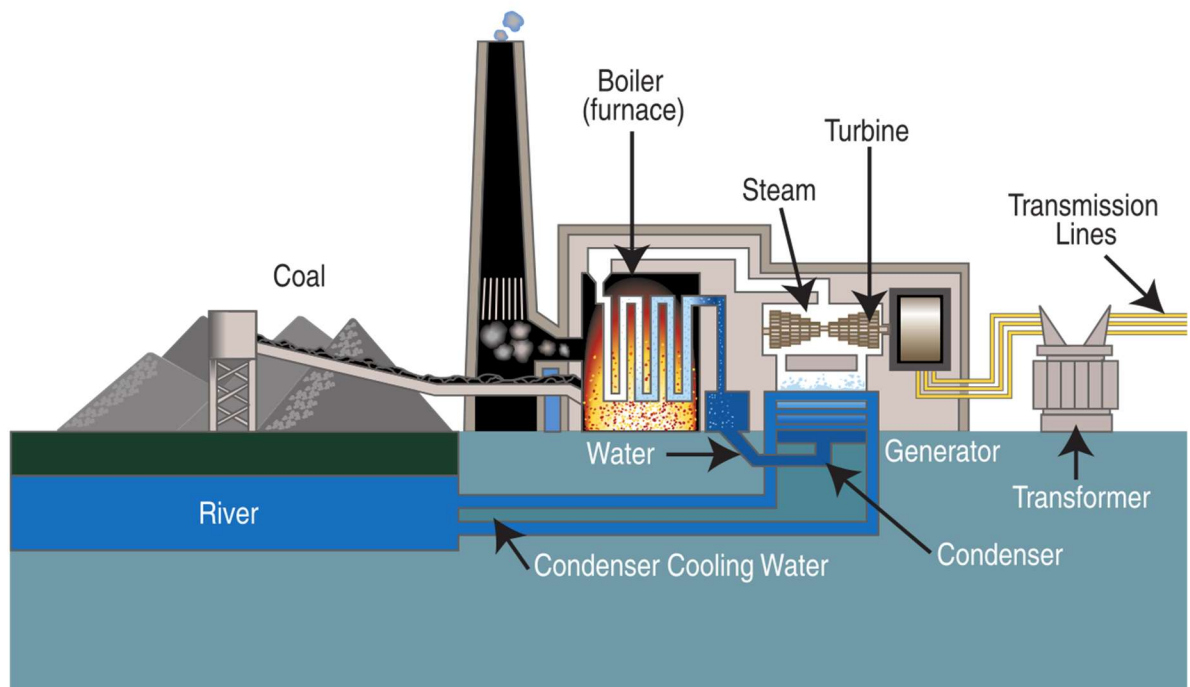
1. Pembangkit

Pembangkit listrik merupakan suatu sistem atau instalasi teknik yang berfungsi untuk mengonversi energi primer menjadi energi listrik melalui serangkaian proses elektromekanik maupun elektrokimia sehingga energi listrik tersebut dapat disalurkan dan dimanfaatkan oleh konsumen. Energi primer yang digunakan pada pembangkit listrik dapat berasal dari berbagai sumber, antara lain energi fosil, energi air, energi panas bumi, energi angin, energi surya, serta sumber energi lainnya. Dalam sistem tenaga listrik, pembangkit listrik berperan sebagai komponen utama yang menentukan kontinuitas, kualitas, dan keandalan pasokan energi Listrik (*10 Sources of Air Pollutzon, n.d.*). Proses konversi energi ini mencerminkan prinsip dasar konversi energi dalam sistem pembangkitan, yaitu transformasi energi dari bentuk panas, kinetik, atau cahaya menjadi energi listrik yang siap disalurkan ke konsumen akhir.

Dalam operasionalnya, setiap unit pembangkit memiliki karakteristik respons beban yang berbeda-beda atau dikenal sebagai *ramp rate*. Pembangkit termal konvensional seperti PLTU umumnya memiliki respons yang lebih lambat sehingga sering difungsikan sebagai pemikul beban dasar (*base load*), sedangkan PLTA atau PLTG memiliki fleksibilitas tinggi untuk merespons fluktuasi beban secara cepat. Menurut Bolarinwa dan Udensi (2024), kemampuan respons beban ini sangat krusial dalam menjaga stabilitas frekuensi sistem, terutama saat terjadi ketidakseimbangan antara pasokan dan permintaan energi di jaringan.

Selain aspek fleksibilitas, efisiensi pembangkitan dan dampak lingkungan menjadi parameter utama dalam manajemen energi modern. Penggunaan teknologi *Combined Cycle* (PLTGU) merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi melalui pemanfaatan kembali energi panas yang terbuang. Sebagaimana dijelaskan dalam literatur *ScienceDirect*, efisiensi pembangkitan tidak hanya berdampak pada aspek ekonomi berupa penurunan biaya bahan bakar, tetapi juga berbanding lurus dengan pengurangan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh setiap unit energi listrik yang diproduksi.

Transisi menuju energi terbarukan menghadirkan tantangan baru bagi sistem pembangkitan akibat sifat intermiten dari sumber energi seperti matahari dan angin. Integrasi pembangkit berbasis energi terbarukan memerlukan sistem kendali cerdas untuk memitigasi dampak variabilitas cuaca terhadap kualitas daya di jaringan transmisi maupun distribusi. **(Bolarinwa & Udensi, 2024)** Dalam kajian ilmu tenaga listrik dan energi terbarukan, pembangkit listrik juga dijelaskan sebagai komponen sistem tenaga listrik yang memiliki karakteristik teknis tertentu yang mencakup efisiensi pembangkitan, kemampuan respons beban, serta dampak lingkungan dari sumber energi yang digunakan (*ScienceDirect*).



Gambar 2. 2 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Berdasarkan sumber energi primer yang dimanfaatkan, pembangkit listrik diklasifikasikan menjadi dua kelompok besar yakni pembangkit berbasis energi fosil dan pembangkit berbasis energi terbarukan. Pembangkit berbasis energi fosil, misalnya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan tenaga gas, selama ini digunakan secara luas

karena kapasitasnya yang besar dan kemampuan operasi secara kontinu, namun membawa dampak negatif signifikan terhadap lingkungan melalui emisi gas rumah kaca (*review paper coal power generation* (**Ahmad, 2013**)).

Sebaliknya, pembangkit listrik berbasis energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), serta tenaga angin, mendapatkan perhatian kuat dalam literatur karena potensinya yang ramah lingkungan dan berkelanjutan (*Renewable Energy-Based Electricity Generation*) (**Islam et al., 2014**).

Pembangkit listrik yang memanfaatkan energi fosil hingga saat ini masih menjadi tulang punggung sistem penyediaan energi listrik karena mampu menghasilkan daya dalam kapasitas besar, memiliki tingkat keandalan operasi yang tinggi, serta dapat beroperasi secara kontinu untuk melayani beban dasar (base load). Meskipun demikian, berbagai penelitian dan kajian ilmiah menunjukkan bahwa pemanfaatan bahan bakar fosil dalam proses pembangkitan listrik menimbulkan dampak lingkungan yang cukup signifikan, terutama akibat emisi gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO_2), sulfur dioksida (SO_2), dan nitrogen oksida (NO_x). Emisi tersebut berperan dalam peningkatan efek rumah kaca, pemanasan global, serta penurunan kualitas lingkungan. Oleh sebab itu, walaupun pembangkit listrik berbasis energi fosil masih mendominasi dari sisi teknis dan ekonomi, keberlanjutan penggunaannya menghadapi tantangan serius terkait aspek lingkungan, sebagaimana diungkapkan dalam berbagai studi tinjauan mengenai pembangkitan listrik berbahan bakar batu bara.

2. Transmisi

Jaringan transmisi adalah sistem yang menghubungkan berbagai gardu listrik, pembangkit listrik, dan pelanggan listrik dalam suatu wilayah. Fungsi utamanya adalah untuk mentransmisikan listrik dari pembangkit ke gardu-gardu distribusi yang lebih kecil, yang kemudian mengirimkan listrik tersebut ke rumah-rumah, bisnis, dan industri (**M. Ashof Azria Azka & Mustofa Abi Hamid, 2024**). Sistem transmisi 150 kV merupakan bagian dari jaringan tenaga listrik tegangan tinggi yang berperan sebagai media penyaluran

daya listrik dalam kapasitas besar dari pusat pembangkitan, gardu induk sumber, maupun titik interkoneksi menuju pusat-pusat beban. Penggunaan level tegangan 150 kV bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penyaluran, karena semakin tinggi tegangan penyaluran maka arus yang mengalir pada penghantar akan semakin kecil untuk daya yang sama. Kondisi tersebut berdampak pada berkurangnya rugi-rugi daya (losses) akibat pemanasan konduktor serta menurunnya penurunan tegangan (voltage drop) pada saluran, khususnya pada jarak penyaluran yang relatif panjang.

Dalam operasinya, sistem transmisi 150 kV juga berfungsi menjaga kontinuitas pasokan dan kestabilan sistem melalui pengaturan konfigurasi jaringan serta pembagian aliran daya antar saluran. Secara umum, komponen utama pada sistem transmisi 150 kV (**Guarango, 2022**). Meliputi Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) sebagai penghantar daya, gardu induk sebagai pusat pengaturan dan switching, busbar sebagai pengumpul dan pembagi daya, serta transformator daya yang berfungsi menyesuaikan level tegangan sesuai kebutuhan sistem berikutnya. Untuk saluran transmisi tegangan tinggi, dimana jarak antar tiang/menara jauhnya sampai ratusan meter maka dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi (Feranda et al., 2019). Keandalan dan kinerja sistem transmisi 150 kV sangat dipengaruhi oleh kondisi pembebanan, kualitas tegangan pada bus, serta kemampuan peralatan dalam beroperasi sesuai batas teknis yang ditetapkan.



Gambar 2. 3 Saluran Transmisi Tegangan Tinggi

Saluran transmisi merupakan salah satu elemen penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai media penghantar daya listrik bertegangan tinggi dari pusat pembangkit menuju gardu induk pusat beban, atau menghubungkan antar gardu induk dalam suatu jaringan. Komponen ini umumnya terdiri dari konduktor atau penghantar listrik yang dibentangkan di antara menara transmisi (SUTT/SUTET) untuk menjaga kestabilan dan keamanan aliran listrik. Peranan utama saluran transmisi adalah menyalurkan energi listrik dalam jumlah besar dari lokasi pembangkitan ke wilayah yang membutuhkan, dengan menekan rugi-rugi daya seminimal mungkin selama proses penyaluran. Melalui sistem transmisi ini, energi listrik dapat didistribusikan secara efisien ke daerah-daerah yang jauh dari pusat pembangkitan, sehingga kontinuitas pasokan listrik tetap terjaga dan kebutuhan energi di berbagai sektor dapat terpenuhi dengan baik.

Dalam pengoperasiannya, saluran transmisi harus mampu menghadapi berbagai tantangan lingkungan dan teknis yang dinamis. Faktor-faktor seperti perubahan cuaca ekstrem, sambaran petir, hingga korosi pada material konduktor dapat memengaruhi

performa penyaluran daya. Oleh karena itu, sistem transmisi modern dilengkapi dengan peralatan proteksi canggih, seperti kawat tanah (*ground wire*) dan isolator yang dirancang khusus untuk meminimalkan risiko gangguan hubung singkat. Selain itu, pemeliharaan rutin pada menara transmisi dan pembersihan ruang bebas (*right of way*) menjadi aspek krusial untuk mencegah gangguan dari objek eksternal, seperti pohon atau bangunan, yang dapat mengancam kestabilan sistem secara keseluruhan.

Selain aspek fisik, efisiensi saluran transmisi sangat bergantung pada manajemen parameter elektrik seperti reaktansi induktif dan kapasitansi saluran. Pada saluran yang sangat panjang, fenomena seperti efek Ferranti—di mana tegangan di ujung penerima menjadi lebih tinggi daripada ujung pengirim saat beban ringan—dapat terjadi dan berisiko merusak peralatan. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan penggunaan kompensator seperti reaktor shunt atau kapasitor seri guna menyeimbangkan aliran daya reaktif. Pengaturan ini bertujuan untuk menjaga profil tegangan tetap berada dalam batas toleransi yang diizinkan, sehingga daya yang dikirimkan tetap stabil meskipun terjadi fluktuasi beban yang signifikan di sisi konsumen.

Terakhir, peran saluran transmisi kini semakin berkembang seiring dengan integrasi energi terbarukan yang lokasinya seringkali terpencil dan jauh dari pusat beban. Jaringan interkoneksi melalui transmisi bertegangan ekstra tinggi (SUTET) atau bahkan teknologi arus searah (*High Voltage Direct Current/HVDC*) menjadi solusi strategis untuk mentransfer daya lintas pulau dengan rugi-rugi yang lebih rendah. Dengan sistem transmisi yang kokoh dan terinterkoneksi secara luas, fleksibilitas operasional antar wilayah dapat ditingkatkan, sehingga jika terjadi gangguan di satu pembangkit, pasokan energi dapat dialihkan dari wilayah lain untuk menjaga kontinuitas layanan listrik bagi masyarakat.

3. Gardu Induk

Dari sisi desain dan operasional, gardu induk memiliki konfigurasi *busbar* yang bervariasi tergantung pada tingkat keandalan dan fleksibilitas yang dibutuhkan. Beberapa

konfigurasi umum seperti *single busbar*, *double busbar*, hingga *one-and-a-half breaker* menentukan bagaimana aliran daya diarahkan dan bagaimana prosedur pemeliharaan dilakukan tanpa harus memadamkan aliran listrik ke konsumen. Pemilihan konfigurasi ini sangat krusial, terutama pada gardu induk yang berfungsi sebagai simpul utama (hub) dalam sistem interkoneksi, di mana kontinuitas pelayanan menjadi prioritas tertinggi untuk mencegah terjadinya pemadaman meluas akibat kegagalan satu komponen.

Aspek perlindungan atau proteksi merupakan jantung dari keamanan operasional gardu induk. Selain pemutus tenaga (PMT), gardu induk dilengkapi dengan sistem relai proteksi canggih yang mampu mendeteksi gangguan seperti arus lebih, hubung singkat, atau kegagalan isolasi dalam hitungan milidetik. Sistem ini terintegrasi dengan transformator arus (CT) dan transformator tegangan (PT) yang memberikan data akurat mengenai kondisi kelistrikan secara *real-time*. Jika terjadi ketidaknormalan, relai akan mengirimkan perintah kepada PMT untuk mengisolasi area yang terganggu, sehingga kerusakan pada peralatan mahal seperti transformator daya dapat dicegah dan kestabilan sistem di area lainnya tetap terjaga.

Seiring dengan kemajuan teknologi digital, peran gardu induk kini bertransformasi menuju konsep *Smart Grid* melalui implementasi Gardu Induk Transmisi Digital. Digitalisasi ini melibatkan penggunaan protokol komunikasi internasional seperti IEC 61850 yang memungkinkan integrasi data antarperalatan secara lebih cepat dan efisien melalui kabel serat optik. Dengan adanya sistem otomatisasi gardu induk (Substation Automation System/SAS), operator dapat memantau dan mengendalikan seluruh parameter kelistrikan dari jarak jauh (Remote Control) melalui sistem SCADA. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga mempercepat proses pemulihan sistem jika terjadi gangguan, yang pada akhirnya meningkatkan kualitas layanan energi secara keseluruhan.



Gambar 2. 4 Gardu Induk

Penerapan sistem proteksi yang terkoordinasi di gardu induk merupakan garda terdepan dalam meminimalkan dampak gangguan pada jaringan luas. Grigsby (2017) menekankan bahwa koordinasi antara relai proteksi dan pemutus tenaga (PMT) sangat menentukan kemampuan sistem untuk melakukan *fault clearance* secara cepat dan selektif. Dengan mengisolasi bagian jaringan yang terganggu saja, gardu induk mencegah terjadinya fenomena pemadaman berantai (*cascading failure*), sehingga stabilitas sistem di wilayah lain tetap terjaga meskipun terjadi gangguan permanen pada salah satu penyulang.

Selain aspek proteksi, konfigurasi fisik *busbar* di dalam gardu induk memberikan fleksibilitas operasional yang sangat krusial bagi keandalan sistem. Menurut kajian teknis dalam Grigsby (2017), pemilihan konfigurasi seperti *double busbar* atau *one-and-a-half breaker* memungkinkan personel lapangan untuk melakukan pemeliharaan rutin tanpa harus memutus aliran daya ke beban. Hal ini memastikan bahwa indeks keandalan seperti SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dan SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) dapat ditekan seminimal mungkin melalui manajemen manuver beban yang efisien di tingkat gardu induk.

Dalam konteks modern, gardu induk juga berfungsi sebagai pusat pengendalian kualitas daya melalui pengaturan tegangan dan kompensasi daya reaktif. Penggunaan peralatan seperti *On-Load Tap Changer* (OLTC) pada transformator daya dan pemasangan kapasitor bank atau reaktor shunt di area gardu memungkinkan operator untuk menjaga profil tegangan dalam batas standar yang diizinkan. Integrasi teknologi digital dan sistem otomasi sebagaimana disinggung dalam literatur Grigsby (2017) memperkuat peran gardu induk sebagai simpul cerdas yang mampu memberikan data diagnostik secara *real-time*, yang pada akhirnya menjamin kontinuitas pasokan energi bagi sektor industri maupun domestik dengan tingkat presisi yang tinggi.

4. Jaringan Distribusi



Gambar 2. 5 Jaringan Distribusi

Jaringan distribusi merupakan salah satu komponen utama dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai sarana penyaluran energi listrik dari gardu induk menuju pelanggan akhir. Jaringan ini tersusun atas konduktor serta peralatan pendukung lainnya yang dirancang untuk mendistribusikan daya listrik yang telah diturunkan tingkat tegangannya agar sesuai dengan kebutuhan konsumen. Penyaluran energi listrik melalui jaringan distribusi mencakup berbagai sektor pengguna, seperti rumah tangga, industri, dan fasilitas umum, sehingga peran jaringan distribusi sangat menentukan kualitas pelayanan tenaga listrik kepada masyarakat.

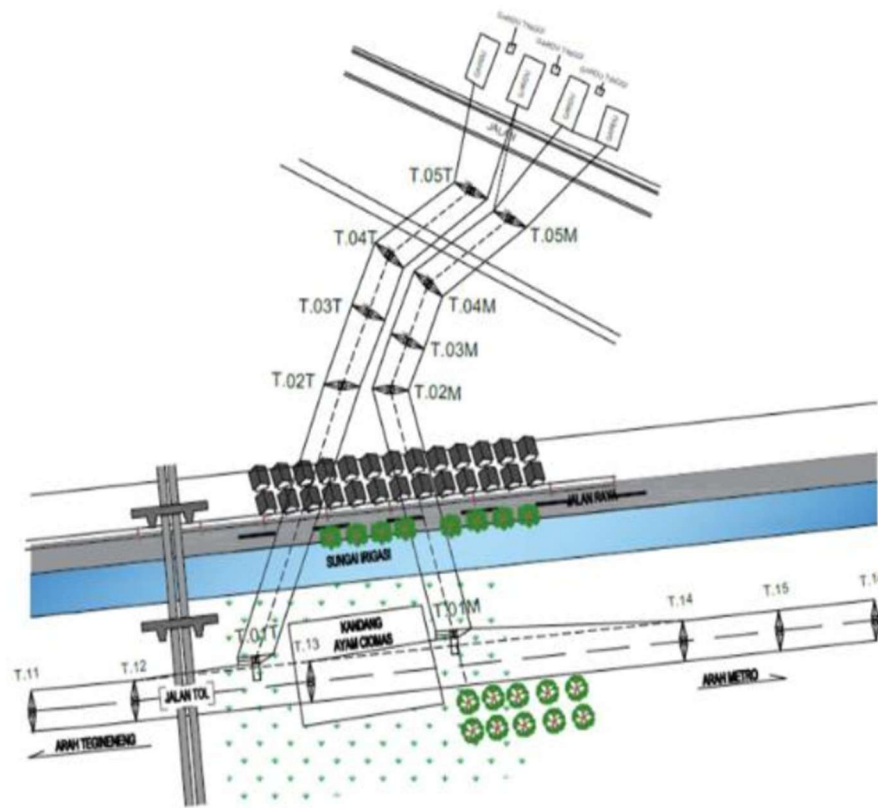
Selain sebagai media penyaluran daya, jaringan distribusi juga berperan penting dalam menjaga kualitas dan keandalan pasokan energi listrik. Kinerja jaringan distribusi yang baik dapat meminimalkan rugi-rugi daya, menjaga kestabilan tegangan, serta mengurangi frekuensi dan durasi gangguan pada sistem. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang menyatakan bahwa keandalan sistem tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh desain, konfigurasi, dan pengelolaan jaringan distribusi, karena jaringan distribusi merupakan bagian sistem yang paling dekat dengan konsumen dan paling sering mengalami gangguan operasional (**Laubst, 1985**).

2.2.2 Incomer 150 kV

Incomer 150 kV merupakan jalur masuk pada gardu induk yang berperan sebagai penghubung antara jaringan transmisi tegangan tinggi dengan sistem busbar. Melalui incomer, gardu induk menerima suplai daya dari sistem transmisi untuk kemudian disalurkan ke feeder keluar, transformator daya, maupun peralatan lain sesuai kebutuhan operasi sistem tenaga listrik. Dengan fungsi tersebut, incomer memiliki peran yang sangat penting dalam menjamin kontinuitas penyaluran energi listrik serta mendukung pengaturan aliran daya pada jaringan transmisi agar tetap stabil dan andal.

Dalam proses pembangunan gardu induk baru maupun penguatan jaringan yang telah beroperasi, pemasangan incomer umumnya dilakukan melalui metode pemotongan jalur transmisi eksisting atau cut-off line. Jalur transmisi yang sebelumnya menghubungkan dua gardu induk secara langsung dialihkan sehingga melewati gardu induk baru yang akan

diintegrasikan ke dalam sistem. Melalui konfigurasi ini, gardu induk baru tidak hanya berfungsi sebagai titik penyaluran beban, tetapi juga menjadi simpul interkoneksi tambahan yang berperan dalam memperkuat sistem penyaluran tenaga listrik pada wilayah pelayanan. Proses integrasi tersebut memerlukan perencanaan yang matang agar kontinuitas suplai tetap terjaga selama tahap konstruksi hingga proses energisasi.



Gambar 2. 6 Skema Masuknya Incomer Ke GI Lampung 1

Penambahan incomer melalui pemotongan jalur transmisi eksisting memberikan dampak langsung terhadap perubahan konfigurasi jaringan dan kondisi operasi sistem transmisi. Sebelum dilakukan pemotongan, aliran daya biasanya mengalir secara langsung dari satu gardu induk ke gardu induk lainnya. Setelah gardu induk baru terhubung, jalur aliran daya akan terbagi dan melewati busbar gardu induk tersebut. Perubahan ini menyebabkan

redistribusi aliran daya yang dipengaruhi oleh impedansi saluran, besarnya beban, serta kondisi pembangkitan pada sistem interkoneksi.

Ketersediaan jalur masuk tambahan memberikan alternatif penyaluran daya yang meningkatkan fleksibilitas operasi sistem, baik pada kondisi normal maupun saat terjadi gangguan atau pemeliharaan peralatan. Beban yang sebelumnya terpusat pada satu jalur transmisi dapat dibagi ke beberapa jalur sehingga tingkat pembebanan pada setiap saluran menjadi lebih seimbang. Kondisi ini berpotensi mengurangi risiko overload pada peralatan transmisi serta meningkatkan margin operasi sistem.

Selain itu, perubahan konfigurasi jaringan akibat penambahan incomer juga dapat memengaruhi profil tegangan pada bus tertentu. Dengan adanya jalur suplai tambahan, jatuh tegangan pada saluran dapat berkurang sehingga kualitas tegangan pada gardu induk menjadi lebih baik. Di sisi lain, pembagian arus pada beberapa jalur transmisi juga berpotensi menurunkan rugi-rugi daya sistem, mengingat besarnya losses pada saluran sangat dipengaruhi oleh arus yang mengalir pada penghantar.

Meskipun memberikan berbagai manfaat, perubahan konfigurasi jaringan akibat penambahan incomer juga memerlukan evaluasi teknis yang komprehensif. Redistribusi aliran daya dapat menyebabkan perubahan tingkat pembebanan pada saluran dan peralatan lain, serta memengaruhi koordinasi sistem proteksi. Oleh karena itu, diperlukan analisis aliran daya (load flow analysis) untuk mengevaluasi kondisi operasi sistem sebelum dan sesudah penambahan incomer. Analisis ini bertujuan memastikan bahwa sistem tetap beroperasi dalam batas aman sesuai standar operasi serta mendukung peningkatan keandalan dan efisiensi penyaluran tenaga listrik secara keseluruhan.

2.2.3 Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya dalam sistem tenaga listrik merupakan analisis yang mengungkapkan kinerja suatu sistem tenaga listrik dan aliran daya (nyata dan reaktif) untuk keadaan tertentu ketika sistem bekerja (**Nigara & Primadiyono, 2015**). Kajian ini dilakukan untuk menggambarkan karakteristik penyaluran daya pada sistem transmisi

maupun distribusi dalam kondisi operasi normal, sehingga dapat diketahui performa sistem secara menyeluruh pada suatu periode tertentu. Dalam studi aliran daya, perhitungan dilakukan untuk memperoleh nilai tegangan pada setiap bus, sudut tegangan, serta distribusi aliran daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada saluran transmisi maupun transformator yang terhubung dalam sistem.

Selain menentukan profil tegangan, analisis load flow juga digunakan untuk mengevaluasi tingkat pembebanan peralatan sistem, seperti saluran transmisi dan transformator daya, sehingga dapat diketahui apakah suatu elemen bekerja dalam batas kemampuan termal dan batas operasi yang diizinkan. Dengan demikian, studi ini berperan penting dalam mengidentifikasi kondisi kritis, seperti bus yang mengalami deviasi tegangan (undervoltage atau overvoltage) maupun saluran yang berpotensi mengalami *overload*. Tidak hanya itu, analisis aliran daya juga menghasilkan informasi rugi-rugi daya (*losses*) pada jaringan yang muncul akibat resistansi penghantar dan elemen sistem lainnya, sehingga dapat digunakan sebagai indikator efisiensi penyaluran tenaga listrik.

Dalam konteks perencanaan dan evaluasi sistem transmisi, hasil analisis load flow menjadi dasar pengambilan keputusan teknis, terutama untuk menilai dampak perubahan konfigurasi jaringan, penambahan peralatan baru, maupun perubahan pola pembebanan. Oleh karena itu, analisis aliran daya sering digunakan untuk membandingkan kondisi sistem sebelum dan sesudah dilakukan penguatan jaringan, seperti pembangunan incomer, penambahan jalur transmisi, maupun perubahan koneksi SUTT eksisting. Melalui pendekatan ini, dapat diperoleh gambaran perubahan distribusi daya, perbaikan atau penurunan profil tegangan, perubahan pembebanan saluran, serta perubahan losses sistem, sehingga evaluasi kinerja sistem dapat dilakukan secara objektif dan terukur.

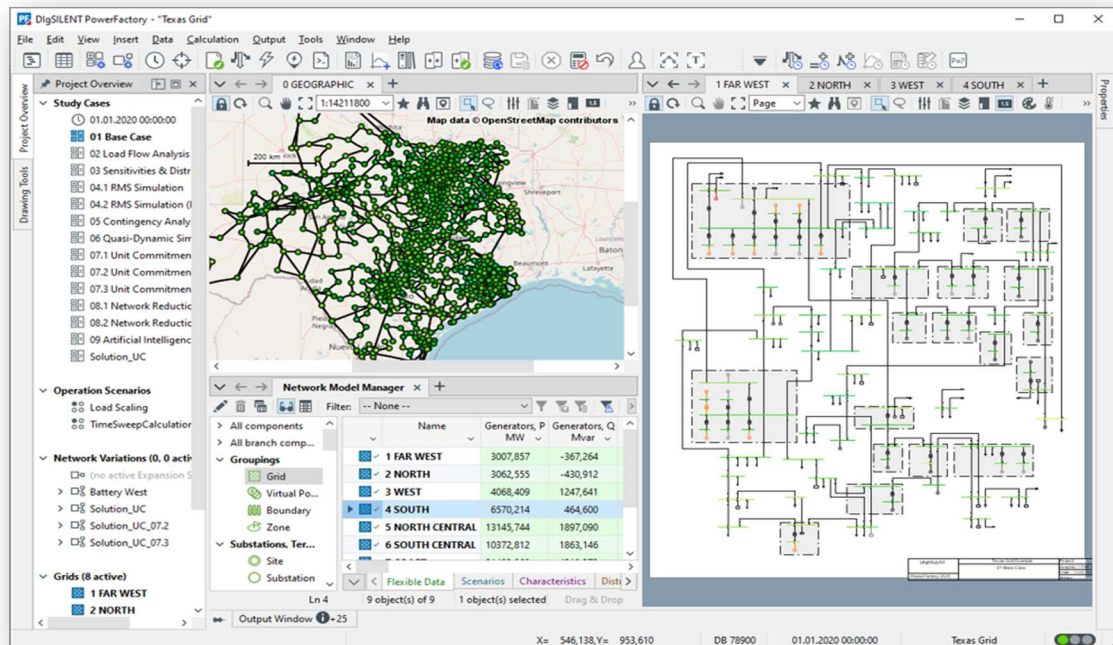
2.2.4 DIgSILENT PowerFactory

DIgSILENT PowerFactory merupakan perangkat lunak analisis sistem tenaga listrik terkemuka yang menjadi standar industri dalam kegiatan perencanaan (*planning*) maupun evaluasi operasi (*operation*) jaringan tenaga listrik. Menurut Manukallo (2024), aplikasi ini

memainkan peran krusial dalam industri tenaga listrik modern karena mampu menangani kompleksitas sistem yang terus berkembang. Keunggulan utamanya terletak pada integrasi berbagai fungsi analisis dalam satu platform tunggal, sehingga memungkinkan para insinyur untuk melakukan studi mendalam tanpa perlu berpindah antar aplikasi yang berbeda.

Aplikasi ini menawarkan kemampuan pemodelan sistem yang sangat komprehensif, mencakup seluruh rantai nilai tenaga listrik mulai dari unit pembangkitan, jaringan transmisi tegangan tinggi, hingga sistem distribusi ke konsumen akhir. Fleksibilitas pemodelannya memungkinkan pengguna untuk merepresentasikan berbagai komponen seperti energi terbarukan, sistem penyimpanan energi, dan kendali otomatis secara detail. Dengan tingkat akurasi yang tinggi, PowerFactory mampu mensimulasikan kondisi sistem agar sangat mendekati kondisi aktual di lapangan, termasuk perilaku transien yang kompleks.

Selain aspek teknis simulasi, perangkat lunak ini berfungsi sebagai basis data terpadu yang mendukung pengelolaan aset dan pemantauan performa jaringan secara kontinu. Dengan kemampuan manajemen skenario yang canggih, pengguna dapat mengevaluasi berbagai kemungkinan perubahan beban atau gangguan tanpa risiko nyata pada sistem fisik. Hal ini memastikan bahwa setiap langkah mitigasi dan strategi pengembangan infrastruktur didasarkan pada perhitungan yang presisi, guna menjamin stabilitas dan keberlangsungan pasokan energi bagi masyarakat luas di masa depan.



Gambar 2. 7 Menu Pemodelan DigSilent PowerFactory

Analisis sistem transmisi melalui simulasi DigSilent akan memberikan skenario terbaik untuk perbaikan tegangan (Raka Trialviano Bagus & Irawan, 2023). Salah satu fitur utama DIGSILENT PowerFactory adalah simulasi aliran daya (*load flow analysis*) yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi operasi sistem pada keadaan tunak (*steady state*). Hasil simulasi load flow memberikan informasi penting terkait profil tegangan pada setiap bus, besaran aliran daya aktif dan reaktif pada saluran, tingkat pembebanan elemen sistem seperti saluran transmisi dan transformator, serta rugi-rugi daya (*losses*) yang terjadi pada jaringan. Informasi tersebut menjadi indikator kinerja sistem dalam menyalurkan daya secara efisien dan aman sesuai batas operasi yang ditetapkan.

Dalam penelitian ini, DIGSILENT PowerFactory digunakan sebagai alat bantu utama untuk menganalisis karakteristik aliran daya pada sistem transmisi 150 kV Subsistem Lampung. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi jaringan sebelum dan sesudah pembangunan Incomer 150 kV Lampung-1 serta perubahan konfigurasi SUTT eksisting

terkait. Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran teknis mengenai perubahan distribusi aliran daya, peningkatan performa tegangan, perubahan tingkat pembebanan saluran, serta perubahan losses sistem sebagai dampak dari penguatan jaringan yang dilakukan.

2.3 Kerangka Pemikiran

Penelitian ini diawali dengan studi literatur guna memahami konsep sistem transmisi 150 kV, karakteristik analisis aliran daya (load flow), prinsip keandalan sistem tenaga listrik, serta peran incomer dalam meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi operasi jaringan. Kajian pustaka juga mencakup teori terkait redistribusi aliran daya, profil tegangan, tingkat pembebanan saluran, serta rugi-rugi daya pada sistem transmisi.

Berdasarkan landasan teoritis tersebut, dilakukan identifikasi permasalahan pada Subsistem Lampung yang masih bergantung pada transfer daya dari Subsistem Sumatera Selatan melalui jaringan backbone 150 kV. Kondisi ini menyebabkan meningkatnya pembebanan saluran, bertambahnya losses, serta terbatasnya fleksibilitas operasi ketika terjadi gangguan. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data sistem yang meliputi data pembangkitan, data beban, parameter saluran transmisi, konfigurasi jaringan eksisting, serta data operasi sebagai dasar pemodelan sistem.

Tahap berikutnya adalah pemodelan jaringan transmisi 150 kV Subsistem Lampung menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory. Simulasi aliran daya dilakukan pada dua kondisi, yaitu sebelum dan sesudah pembangunan Incomer 150 kV Lampung-1. Perubahan konfigurasi jaringan akibat penambahan incomer dianalisis untuk mengetahui dampaknya terhadap distribusi aliran daya, profil tegangan setiap bus, tingkat pembebanan saluran, serta besarnya rugi-rugi daya sistem.

Hasil simulasi kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi efektivitas pembangunan Incomer 150 kV Lampung-1 dalam meningkatkan kinerja sistem transmisi. Penilaian difokuskan pada penurunan losses, perbaikan profil tegangan, serta peningkatan margin operasi dan keandalan sistem.

Temuan dari analisis tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penyusunan kesimpulan dan rekomendasi teknis terkait dampak penguatan jaringan melalui pembangunan Incomer 150 kV Lampung-1, serta potensi penerapannya sebagai solusi peningkatan keandalan dan efisiensi sistem transmisi pada wilayah dengan karakteristik serupa.