

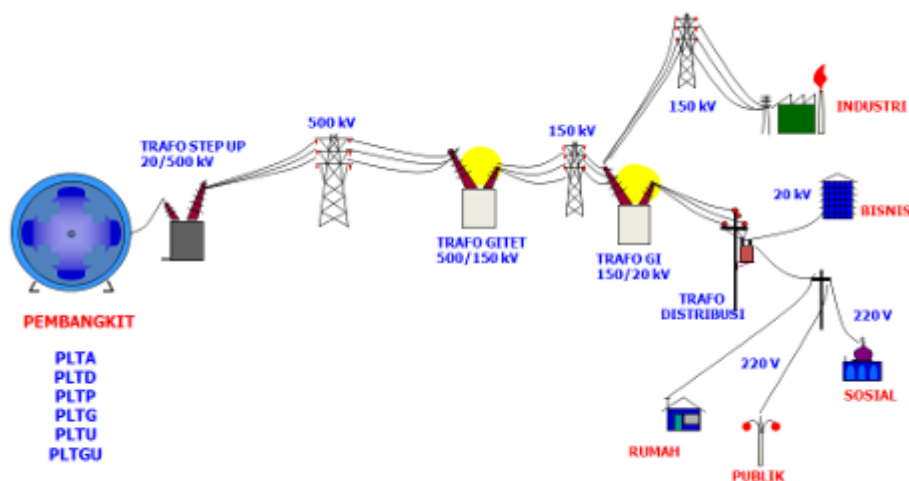
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan yang tersusun atas beberapa komponen utama, seperti pembangkit listrik, saluran transmisi, gardu induk, dan jaringan distribusi, yang saling terhubung dan bekerja secara terpadu untuk menyalurkan serta memenuhi kebutuhan energi listrik bagi para pelanggan. Secara umum, konfigurasi sistem ini dapat dijelaskan melalui suatu skema atau diagram alur sistem tenaga listrik.



Gambar 2. 1 Skema Sistem Tenaga Listrik

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

1. Unit pembangkitan merupakan salah satu komponen utama dalam sistem tenaga listrik yang berperan sebagai sumber awal energi listrik. Pada bagian ini terdapat generator listrik yang digerakkan oleh turbin, di mana turbin tersebut memperoleh tenaga dari berbagai sumber energi primer seperti air (pada PLTA), uap hasil pembakaran batu bara (pada PLTU), panas bumi (pada PLTP), gas, atau minyak bumi (pada PLTD). Fungsi utama unit pembangkitan adalah mengonversi energi

primer menjadi energi listrik melalui proses *elektromechanical* energi mekanik dari turbin diputar untuk menggerakkan rotor generator sehingga menghasilkan tegangan listrik. Dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan, unit pembangkitan memiliki peran sangat vital karena menjadi titik awal dari proses penyaluran energi listrik ke seluruh jaringan transmisi dan distribusi. Selain itu, kinerja dan efisiensi dari unit pembangkitan juga sangat menentukan keandalan serta kestabilan pasokan listrik di suatu wilayah. Oleh karena itu, pemilihan jenis pembangkit, sumber energi, serta sistem kontrol dan proteksinya menjadi aspek penting dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

2. 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.
3. Gardu induk merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai penghubung antara saluran transmisi dan jaringan distribusi. Di dalamnya terdapat berbagai peralatan listrik utama, seperti pemutus dan penghubung tenaga (*circuit breaker* dan *disconnecting switch*) serta transformator daya yang berperan menurunkan tegangan dari tingkat transmisi ke tingkat distribusi agar sesuai dengan kebutuhan sistem di bawahnya.
Selain sebagai titik perubahan level tegangan, gardu induk juga berfungsi untuk mengatur, mengendalikan, serta melindungi aliran energi listrik yang masuk dan keluar dari jaringan. Melalui sistem pengaturannya, gardu induk memastikan agar

penyaluran daya listrik tetap stabil, aman, dan efisien, sehingga kualitas dan kontinuitas pasokan listrik ke konsumen dapat terjaga dengan baik.

4. Jaringan distribusi merupakan salah satu komponen utama dalam sistem tenaga listrik yang berperan sebagai jalur penghantar daya dari gardu induk menuju ke lokasi pelanggan. Komponen ini tersusun atas konduktor dan peralatan pendukung lainnya yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari gardu induk pusat beban ke jaringan konsumen akhir secara aman dan efisien. Fungsi utama jaringan distribusi adalah mendistribusikan energi listrik dari sistem transmisi melalui gardu induk hingga mencapai pengguna akhir, baik rumah tangga, industri, maupun fasilitas umum. Melalui jaringan distribusi inilah listrik yang telah diturunkan tegangannya disalurkan secara merata, sehingga setiap pelanggan dapat memperoleh pasokan energi listrik sesuai kebutuhan dengan kualitas dan keandalan yang terjaga.

2.1.2 Saluran Transmisi

Tegangan transmisi yang umum digunakan adalah tergolong dalam satuan *Extra High Voltage* (EHV) dan *High Voltage* (HV). Dalam sistem tenaga listrik, transmisi tenaga dilakukan melalui saluran udara maupun saluran bawah tanah dengan level tegangan tertentu. Di Indonesia, dikenal dua kategori utama saluran transmisi udara, yaitu SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi) dan SUTET (Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi). Penyaluran listrik pada tegangan tinggi dan ekstra tinggi digunakan sebagai penghubung antara satu pembangkit dengan pembangkit lainnya, atau pembangkit dengan beban yang jauh, biasa disebut dengan sistem penyaluran atau pentransmisian tenaga listrik. Sedangkan pada sistem distribusi tegangannya diturunkan untuk didistribusikan dengan tegangan menengah (*Medium Voltage*) dan tegangan rendah (*Low Voltage*). Tujuan dari penggunaan tegangan tinggi atau ekstra tinggi adalah untuk meningkatkan kualitas penyaluran (mengurangi *drop* tegangan) akibat dari jarak yang jauh.

Standar tegangan transmisi di Indonesia adalah: 66KV, 150KV, 380KV dan 500 KV, sehingga dapat diklasifikasikan menurut tegangan berikut ini:

- a) Tegangan tinggi sampai : 138 KV

b) Tegangan ekstra tinggi (EHV atau SUTET) : 220 sampai dengan 765 KV

c) Tegangan ultra tinggi (UHV atau SUTUT) : diatas 765 KV

1. SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi)

- Merupakan jaringan transmisi yang berfungsi menyalurkan energi listrik pada level 70 kV sampai 150 kV.
- Biasanya digunakan untuk penyaluran daya jarak menengah hingga jauh, dari gardu induk ke gardu induk lain atau dari pusat pembangkit ke gardu induk.
- SUTT menjadi penghubung utama dalam sistem interkoneksi tenaga listrik antarwilayah.

2. SUTET (Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi)

- Merupakan jaringan transmisi listrik dengan level tegangan 220 kV, 275 kV, 500 kV.
- Digunakan untuk penyaluran listrik dalam kapasitas besar dengan jarak jauh, misalnya dari pusat pembangkit besar ke pusat beban di kota-kota besar.
- Dengan tegangan yang lebih tinggi, rugi-rugi daya (losses) dapat diminimalisasi, sehingga efisiensi sistem lebih terjaga.

SUTT dan SUTET merupakan bagian vital dari sistem transmisi tenaga listrik. SUTT lebih banyak digunakan untuk transmisi regional dengan tegangan tinggi (70–150 kV), sedangkan SUTET digunakan untuk transmisi jarak jauh dengan kapasitas daya sangat besar (≥ 220 kV). Keduanya berperan penting dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik dari pembangkit hingga sampai ke sistem distribusi.

2.1.2.1 Peralatan Utama Saluran Transmisi

Sesuai dengan perannya sebagai media penghantar daya listrik, komponen utama dari saluran transmisi adalah kawat konduktor atau penghantar fasa, sementara peralatan lainnya berfungsi sebagai komponen pendukung sistem. Pada saluran transmisi udara yang menggunakan penghantar telanjang, diperlukan perlindungan terhadap gangguan petir karena kawat tersebut terekspos langsung di udara terbuka. Untuk mengantisipasi hal tersebut, di bagian atas kawat fasa biasanya dipasang kawat pelindung yang disebut kawat pentanahan (*ground wire*). Kawat ini berfungsi untuk menangkap dan menyalurkan arus petir ke tanah, sehingga tidak mengenai kawat fasa secara langsung. *Ground wire*

tersebut dihubungkan ke sistem pembumian melalui menara transmisi (tower), guna memastikan keamanan serta menjaga keandalan sistem penyaluran tenaga listrik dari gangguan eksternal.

Apabila terjadi sambaran petir, diharapkan petir terlebih dahulu mengenai kawat pentanahan (*ground wire*) sebelum menyentuh konduktor utama. Dengan demikian, tegangan lebih yang muncul dapat segera dialirkan dan dinetralisir ke tanah, karena kawat tersebut memiliki hubungan langsung dengan sistem pembumian. Cara ini membuat kawat konduktor utama terlindungi dari lonjakan tegangan akibat petir, yang berpotensi mengganggu kestabilan sistem maupun merusak peralatan isolasi pada jaringan transmisi. Selain itu, ketinggian menara transmisi (tower) juga harus dirancang dengan cermat agar medan elektromagnetik yang dihasilkan di sekitar saluran tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan maupun keselamatan manusia di sekitarnya. Perancangan yang tepat akan memastikan sistem transmisi tetap aman, andal, dan ramah terhadap lingkungan.

Isolator merupakan salah satu komponen penting pada saluran udara tegangan tinggi yang berfungsi untuk memisahkan secara listrik antara kawat penghantar fasa dengan struktur menara (tower). Komponen ini juga dikenal sebagai isolator gantung, karena selain berperan sebagai pemisah listrik, isolator juga berfungsi menahan dan menggantung kawat penghantar pada tower agar tetap berada pada posisi yang aman dan stabil. Dalam perancangannya, kekuatan dan konstruksi tower harus diperhitungkan dengan baik untuk memastikan ketahanan terhadap beban mekanis, termasuk gaya akibat angin kencang. Selain itu, ketinggian tower perlu disesuaikan agar jarak aman antar kawat fasa maupun antara kawat fasa dengan permukaan tanah tetap terpenuhi, sehingga keamanan dan keandalan sistem transmisi listrik dapat terjaga dengan optimal.

2.1.2.2 Penghantar Saluran Transmisi

Aluminium merupakan bahan penghantar yang paling umum digunakan pada saluran udara tegangan tinggi, karena memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan logam lainnya. Pemilihan aluminium didasarkan pada pertimbangan bahwa harganya lebih ekonomis, tahan terhadap korosi, serta memiliki bobot yang lebih ringan, sehingga memudahkan dalam proses instalasi dan mengurangi beban mekanis pada menara transmisi. Meskipun nilai resistansi aluminium lebih tinggi dibandingkan dengan

tembaga untuk ukuran penampang yang sama, penggunaannya pada saluran udara tetap dianggap lebih efisien dan menguntungkan secara ekonomi. Hal ini karena biaya pembangunan jaringan dengan penghantar aluminium jauh lebih rendah, sementara perbedaan rugi-rugi daya masih dapat ditoleransi. Dengan demikian, dari sisi biaya, daya tahan, dan kemudahan konstruksi, aluminium menjadi pilihan paling ideal untuk digunakan sebagai penghantar utama pada sistem transmisi udara.

Kawat penghantar pejal merupakan jenis penghantar yang hanya terdiri dari satu batang logam utuh tanpa lilitan atau serabut, sehingga proses produksinya lebih sederhana dan biaya pembuatannya lebih rendah dibandingkan jenis kawat berpilin. Karena strukturnya yang solid, kawat ini sering dipilih untuk aplikasi dengan ukuran penampang kecil hingga menengah, di mana kebutuhan fleksibilitas tidak terlalu tinggi.

Namun, pada ukuran diameter yang besar, kawat pejal cenderung bersifat kaku dan sulit dibentuk, sehingga kurang fleksibel saat proses instalasi maupun pemeliharaan. Kekakuan ini membuatnya tidak mudah untuk dibengkokkan atau digulung, sehingga membutuhkan penanganan yang lebih hati-hati dan peralatan tambahan saat pemasangan. Meskipun demikian, kawat pejal tetap digunakan pada kondisi tertentu karena memiliki kekuatan mekanis yang baik, biaya yang lebih murah, serta tahan terhadap kerusakan akibat tekanan fisik.



Gambar 2. 2 Jenis Jenis Kabel Saluran Transmisi

Agar diperoleh kawat penghantar yang lebih lentur dan mudah dibentuk, digunakanlah jenis kawat berlilit atau *stranded conductor*. Pada jenis ini, beberapa kawat berdiameter kecil disusun dan dipilin secara spiral membentuk satu kesatuan penghantar dengan ukuran penampang tertentu. Desain seperti ini membuat kawat lebih fleksibel serta mudah ditangani saat pemasangan, terutama pada saluran udara dengan bentang panjang.

Untuk meningkatkan kekuatan tarik dan ketahanan mekanisnya, bagian inti dari kawat aluminium biasanya diperkuat dengan satu atau beberapa helai kawat baja yang membentang di bagian tengah. Kombinasi ini menghasilkan penghantar tipe ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*) yang tidak hanya fleksibel, tetapi juga memiliki daya tahan tinggi terhadap tegangan mekanis dan kondisi lingkungan ekstrem, sehingga sangat cocok digunakan pada saluran transmisi udara jarak jauh.

Pada saluran transmisi dengan kapasitas daya yang kecil atau jarak penyaluran yang tidak terlalu jauh, umumnya cukup digunakan satu kawat tunggal untuk setiap fasanya. Penggunaan konfigurasi ini dianggap lebih sederhana, mudah dalam pemasangan, serta lebih ekonomis dari segi biaya pembangunan.

Selain itu, pada sistem dengan daya kecil, pengaruh induktansi saluran relatif rendah, sehingga tidak memberikan dampak signifikan terhadap kinerja penyaluran listrik. Oleh karena itu, penerapan kawat tunggal per fasa sudah memadai untuk menjaga efisiensi dan keandalan sistem tanpa memerlukan konstruksi yang kompleks atau biaya tambahan yang besar.

Sementara itu, pada saluran transmisi dengan kapasitas daya besar dan jarak penyaluran yang jauh, pengaruh induktansi dan kapasitansi saluran menjadi cukup signifikan, sehingga perlu dilakukan upaya untuk menguranginya agar aliran daya tetap efisien dan stabil. Salah satu cara yang umum digunakan adalah dengan menerapkan sistem kawat berkas (*bundle conductor*) pada setiap fasanya. Dalam konfigurasi kawat berkas, setiap fasa terdiri dari beberapa penghantar biasanya dua, tiga, atau empat kawat yang disusun sejajar dengan jarak tertentu. Antar kawat tersebut dipisahkan menggunakan spacer atau pemisah mekanis yang dipasang secara berkala di sepanjang bentangan

saluran. Fungsi *spacer* ini adalah untuk menjaga agar masing-masing penghantar tidak saling bersentuhan dan mempertahankan jarak tetap antar kawat, sehingga dapat mengurangi efek induktansi dan rugi-rugi daya, serta meningkatkan kemampuan hantar arus dan kestabilan sistem transmisi tegangan tinggi.

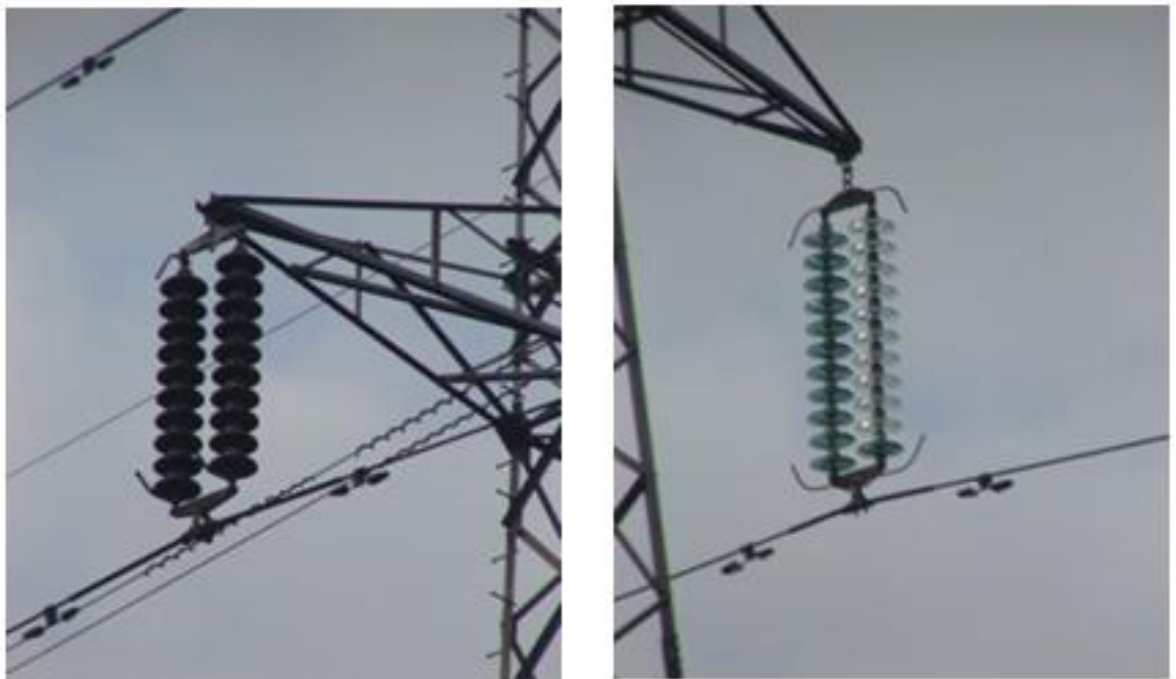
Pemasangan kawat berkas (*bundle conductor*) memang memiliki tingkat kerumitan yang lebih tinggi dibandingkan dengan kawat tunggal, baik dari segi perancangan maupun instalasinya. Namun, penerapan sistem ini dilakukan bukan tanpa alasan. Selain berfungsi untuk mengurangi pengaruh induktansi dan kapasitansi saluran, penggunaan kawat berkas juga bermanfaat dalam meminimalkan terjadinya efek korona. Efek korona merupakan fenomena pelepasan muatan listrik di udara yang terjadi di sekitar penghantar akibat medan elektromagnetik dengan intensitas tinggi, yang dapat menyebabkan kerusakan lapisan dielektrik udara, rugi daya, serta gangguan pada komunikasi radio di sekitarnya. Kondisi ini akan semakin parah apabila udara di sekitar saluran dalam keadaan lembab, misalnya saat hujan deras atau kabut tebal. Dengan menggunakan kawat berkas, distribusi medan listrik di sekitar penghantar menjadi lebih merata, sehingga tegangan gradien permukaan menurun dan potensi terjadinya korona dapat ditekan secara signifikan.

2.1.2.3 Isolator

Isolator pada saluran transmisi umumnya dibuat dari bahan porselen, karena material ini memiliki daya isolasi listrik yang sangat tinggi serta kekuatan mekanis yang baik untuk menahan beban konduktor. Penggunaan porselen dipilih agar isolator mampu menahan tegangan tinggi antara kawat penghantar dengan struktur menara (tower) pada saluran udara, sekaligus memberikan perlindungan terhadap kemungkinan terjadinya arus bocor atau loncatan listrik. Fungsi utama isolator dalam sistem transmisi udara adalah memisahkan secara listrik antara penghantar dengan tower penopang, sehingga tidak terjadi hubungan langsung antara keduanya. Seiring meningkatnya tegangan operasi saluran, panjang dan tingkat isolasi isolator juga harus ditingkatkan untuk memastikan keamanan sistem. Selain berfungsi sebagai pemisah listrik, isolator juga berperan menopang dan menggantung kawat penghantar pada tower, sehingga posisi konduktor tetap stabil dan aman dari pengaruh gaya mekanis maupun kondisi cuaca ekstrem.

Isolator gantung yang digunakan pada saluran transmisi udara memiliki beberapa bentuk konstruksi tergantung pada kebutuhan dan tingkat tegangan sistem. Pada beberapa instalasi, isolator gantung dibuat dalam bentuk batang panjang tunggal, sedangkan pada sistem lainnya digunakan rangkaian beberapa isolator pendek yang berbentuk seperti mangkuk terbalik yang disusun memanjang secara seri.

Jenis isolator yang terdiri dari beberapa unit mangkuk (*disc insulator*) ini lebih banyak digunakan karena lebih fleksibel dalam penyesuaian panjang maupun tingkat isolasinya. Jumlah unit yang disusun dapat disesuaikan dengan kebutuhan kekuatan isolasi terhadap tegangan sistem, sehingga semakin tinggi tegangan saluran, semakin banyak pula jumlah isolator yang dirangkai. Desain ini juga memudahkan pemeliharaan dan penggantian komponen, karena bila salah satu unit mengalami kerusakan, dapat diganti tanpa perlu mengganti seluruh rangkaian isolator.



Gambar 2. 3 Isolator Gantung Di Saluran Transmisi

Isolator memiliki peran yang sangat krusial dalam sistem transmisi tenaga listrik, yakni sebagai penyangga fisik kawat penghantar sekaligus pemisah elektrik antara kawat bertegangan dengan struktur menara yang terhubung ke tanah. Dalam menjalankan

fungsinya, isolator harus mampu menahan beban mekanis yang berat serta tekanan elektrik yang ekstrem secara terus-menerus. Kegagalan fungsi isolasi pada komponen ini dapat berdampak fatal, mulai dari pemadaman listrik secara luas hingga kerusakan permanen pada aset transmisi yang mahal. Oleh karena itu, memahami karakteristik tegangan lompatan api dan tegangan tembus menjadi fundamental bagi keandalan sistem.

Karakteristik pertama yang harus diperhatikan adalah tegangan lompatan api atau yang sering disebut dengan *flashover voltage*. Fenomena ini didefinisikan sebagai nilai tegangan minimum yang memicu loncatan bunga api listrik melalui udara di sepanjang permukaan luar isolator. Berbeda dengan kerusakan internal, lompatan api terjadi di jalur luar yang menghubungkan penghantar bertegangan dengan lengan tiang transmisi. Kejadian ini biasanya bersifat transien namun dapat memicu kerja sistem proteksi yang menyebabkan terputusnya aliran daya secara mendadak jika tidak segera diatasi.

Kondisi lingkungan memegang peranan utama dalam menentukan besarnya nilai tegangan lompatan api pada sebuah isolator. Ketika permukaan isolator terpapar kelembapan tinggi, air hujan, atau tumpukan polutan seperti debu industri dan uap garam di wilayah pesisir, terbentuklah lapisan konduktif tipis di permukaannya. Lapisan ini secara drastis menurunkan resistansi permukaan isolator, sehingga jalur peluahan listrik menjadi lebih mudah terbentuk. Akibatnya, isolator yang kotor atau basah akan mengalami lompatan api pada level tegangan yang jauh lebih rendah dibandingkan saat kondisi bersih dan kering.

Untuk menjaga agar nilai tegangan lompatan api tetap berada di atas tegangan operasi sistem, program pemeliharaan preventif menjadi sangat vital. Pembersihan isolator secara berkala, baik melalui metode pencucian bertegangan maupun pembersihan manual, bertujuan untuk menghilangkan lapisan polutan yang menempel. Dengan menjaga permukaan isolator tetap bersih, kemampuan dielektrik udara di sekitarnya dapat dipertahankan secara optimal. Langkah ini merupakan strategi kunci dalam mencegah gangguan padam yang disebabkan oleh kegagalan isolasi eksternal, terutama pada wilayah-wilayah dengan tingkat polusi udara yang tinggi.

Karakteristik kedua yang tidak kalah penting adalah tegangan tembus atau *puncture voltage*. Berbeda dengan lompatan api yang terjadi di permukaan luar, tegangan tembus adalah nilai batas elektrik yang menyebabkan arus bocor menembus struktur fisik atau bagian dalam bahan isolator itu sendiri. Ketika tekanan elektrik melebihi ambang batas dielektrik bahan, isolator akan mengalami kegagalan internal yang bersifat destruktif. Peristiwa ini mengakibatkan isolator kehilangan sifat isolasinya secara total dan permanen, sehingga komponen tersebut tidak dapat digunakan kembali dan harus segera diganti.

Nilai tegangan tembus suatu isolator sangat bergantung pada integritas material penyusunnya, seperti porselen, kaca, atau komposit polimer. Kualitas pabrikasi, ketebalan bahan, serta kepadatan struktur molekul di dalamnya menentukan seberapa kuat isolator tersebut menahan stres elektrik. Namun, seiring bertambahnya usia pemakaian, isolator akan mengalami penuaan akibat paparan panas matahari, perubahan cuaca yang ekstrem, dan stres elektrik yang konstan. Faktor-faktor penuaan ini secara bertahap melemahkan ikatan atom dalam bahan isolator, yang pada akhirnya menurunkan nilai tegangan tembusnya dari standar awal saat baru diproduksi.

Sebagai langkah mitigasi risiko, pengujian teknis secara periodik seperti uji tahanan isolasi dan uji tegangan tinggi perlu dilakukan untuk memantau kondisi kesehatan internal isolator. Melalui pengujian ini, gejala kerusakan dini atau penurunan kualitas dielektrik dapat terdeteksi sebelum terjadi kegagalan tembus yang membahayakan sistem. Dengan menggabungkan pemeliharaan kebersihan permukaan dan pemantauan kualitas material secara berkala, keandalan saluran transmisi dapat terjamin, sehingga penyaluran energi listrik kepada konsumen tetap stabil dan aman dari gangguan isolasi.

2.1.3 Keamanan Suplai Tenaga Listrik

Konsep dasar dari keamanan suplai tenaga listrik adalah pada saat kondisi operasinya. Suatu sistem tenaga listrik dapat dikatakan aman jika suplai daya listrik tidak mengalami pemadaman yang menyebabkan terputusnya pasokan daya listrik ke konsumen. Keamanan suplai tenaga listrik juga didefinisikan sebagai kemampuan

sistem tenaga listrik untuk menyediakan tenaga listrik sampai pada pengguna akhir (konsumen) dengan level kontinuitas dan kualitas tertentu secara berkelanjutan, yang berkaitan dengan standar yang ada dan perjanjian kontrak pada titik-titik pengiriman.

2.1.4 Keandalan Sistem Tenaga Listrik

Keandalan merupakan suatu ukuran probabilitas bahwa suatu peralatan atau sistem mampu beroperasi sesuai dengan fungsi yang direncanakan dalam rentang waktu tertentu dan pada kondisi operasi yang telah ditetapkan. Dalam konteks sistem tenaga listrik, konsep keandalan berkaitan erat dengan dua istilah utama, yaitu ketersediaan (*availability*) dan ketidaktersediaan (*unavailability*), yang menggambarkan sejauh mana suatu sistem dapat beroperasi secara normal dalam periode pengamatan tertentu misalnya selama satu tahun. Ketersediaan (*availability*) diartikan sebagai rasio antara total waktu operasi sistem tenaga listrik yang berfungsi dengan baik terhadap total waktu pengamatan. Dengan kata lain, semakin besar nilai ketersediaan, semakin andal sistem tersebut dalam menyediakan pasokan energi listrik secara kontinu. Sebaliknya, ketidaktersediaan (*unavailability*) merupakan perbandingan antara waktu total sistem tidak beroperasi (*downtime*) dengan total waktu pengamatan, yang menunjukkan seberapa sering sistem mengalami gangguan atau tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Tingkat keandalan sistem tenaga listrik menjadi indikator penting dalam menilai kualitas pelayanan penyedia energi listrik terhadap konsumen. Semakin tinggi tingkat keandalan, semakin kecil kemungkinan terjadinya gangguan pasokan listrik, sehingga kebutuhan energi konsumen dapat terpenuhi secara stabil, aman, dan efisien.

Faktor yang mempengaruhi keandalan :

Tujuan utama dari sistem tenaga listrik adalah untuk membangkitkan, menyalurkan, dan mendistribusikan energi listrik ke jaringan yang luas sehingga dapat digunakan secara andal dan berkelanjutan oleh konsumen. Agar fungsi tersebut dapat berjalan dengan optimal, keandalan sistem tenaga listrik menjadi faktor yang sangat penting. Keandalan menggambarkan kemampuan sistem untuk beroperasi secara konsisten dan sesuai dengan fungsi yang direncanakan, tanpa mengalami gangguan yang dapat menghambat penyaluran energi listrik.

1. Probabilitas

Peluang atau probabilitas digunakan sebagai dasar untuk menentukan nilai kuantitatif dari tingkat keandalan suatu sistem tenaga listrik. Melalui pendekatan probabilistik, dapat dihitung seberapa besar kemungkinan suatu peralatan atau sistem berfungsi dengan baik (sukses) maupun mengalami kegagalan dalam periode waktu tertentu. Analisis ini umumnya didasarkan pada data historis kinerja peralatan di masa lalu, seperti frekuensi gangguan, waktu perbaikan, dan lama waktu operasi tanpa kegagalan. Dari data tersebut dapat diperoleh pola perilaku sistem yang menggambarkan kecenderungan keberhasilan atau kegagalan operasi di masa mendatang. Selain itu, perkiraan beban sistem juga menjadi indikator penting dalam menentukan keandalan. Nilai beban yang digunakan biasanya merupakan hasil proyeksi berdasarkan data historis pemakaian listrik sebelumnya, kemudian dikombinasikan dengan perkiraan pertumbuhan beban untuk masa depan. Dengan demikian, sistem dapat dirancang agar tetap andal dan mampu menanggung peningkatan kebutuhan energi secara berkelanjutan tanpa mengurangi stabilitas maupun efisiensi operasionalnya.

2. Unjuk Kerja / Bekerja sesuai fungsinya

Konsep unjuk kerja atau *performance* dalam sistem tenaga listrik merupakan parameter fundamental yang digunakan oleh para teknisi untuk mengevaluasi efektivitas suatu aset dalam menjalankan peran teknisnya. Sebuah peralatan dianggap berhasil menjalankan fungsinya apabila ia mampu beroperasi secara kontinu di bawah tekanan elektrik dan mekanik sesuai dengan desain awal. Sebaliknya, kegagalan unjuk kerja tidak selalu berarti kerusakan fisik total; kegagalan dapat didefinisikan sebagai ketidakmampuan peralatan untuk mempertahankan parameter operasi yang telah ditetapkan, yang jika dibiarkan, akan memicu efek domino terhadap stabilitas jaringan secara keseluruhan.

Penilaian terhadap performa ini tidak dilakukan secara subjektif, melainkan mengacu pada standar teknis yang ketat seperti standar IEEE, IEC, atau regulasi lokal seperti *Grid Code*. Standar-standar ini berfungsi sebagai garis batas

toleransi yang menentukan apakah sebuah deviasi masih dianggap wajar atau sudah masuk dalam kategori kritis. Batas toleransi ini sangat penting karena setiap komponen dalam sistem kelistrikan memiliki titik jenuh operasional; melampaui batas tersebut, meskipun hanya dalam waktu singkat, dapat mempercepat penuaan material isolasi dan menurunkan umur ekonomis peralatan.

Salah satu indikator utama yang paling sering digunakan untuk memantau unjuk kerja sistem adalah variasi tegangan. Tegangan yang stabil merupakan cerminan dari keseimbangan daya reaktif dalam jaringan. Jika terjadi penyimpangan tegangan yang signifikan dari nilai nominal, hal tersebut mengindikasikan bahwa sistem sedang mengalami beban berlebih atau adanya gangguan pada kompensasi daya reaktif. Penurunan tegangan yang drastis (*undervoltage*) dapat menyebabkan motor-motor industri mengalami *overheating*, sementara kenaikan tegangan yang ekstrem (*overvoltage*) berisiko merusak lapisan isolasi pada transformator dan kabel.

Selain tegangan, variasi frekuensi merupakan indikator kesehatan sistem yang sangat sensitif karena mencerminkan keseimbangan antara daya aktif yang dibangkitkan dengan beban yang dikonsumsi. Frekuensi yang berfluktuasi di luar batas standar (misalnya di bawah atau di atas 50 Hz di Indonesia) menunjukkan adanya ketidakstabilan pada sisi pembangkitan atau pelepasan beban yang tidak terduga. Kegagalan mempertahankan frekuensi dalam rentang sempit dapat menyebabkan gangguan pada sinkronisasi generator dan kerusakan pada peralatan elektronik presisi milik konsumen yang sangat bergantung pada kestabilan siklus arus bolak-balik.

Pemantauan unjuk kerja secara berkala, baik melalui sistem otomatis seperti SCADA maupun pengujian manual di lapangan, menjadi kunci utama dalam strategi pemeliharaan prediktif. Dengan menganalisis tren data unjuk kerja dari waktu ke waktu, teknisi dapat mendeteksi gejala penurunan performa sebelum kegagalan katastrofik terjadi. Misalnya, peningkatan suhu operasional yang tidak lazim pada *bushing* transformator dapat menjadi sinyal awal adanya

degradasi unjuk kerja yang memerlukan intervensi segera guna menghindari kerusakan yang lebih mahal dan luas.

Secara keseluruhan, menjaga unjuk kerja peralatan tetap sesuai spesifikasi adalah tulang punggung dari keandalan penyaluran energi listrik. Sistem yang memiliki unjuk kerja tinggi tidak hanya memberikan jaminan keamanan bagi infrastruktur itu sendiri, tetapi juga memberikan kepastian layanan bagi masyarakat dan industri. Dengan memastikan setiap komponen bekerja dalam koridor teknis yang benar, efisiensi sistem dapat dimaksimalkan, susut daya dapat ditekan, dan kontinuitas pasokan listrik dapat terjaga demi mendukung aktivitas ekonomi dan sosial yang berkelanjutan.

3. Selang Waktu Pengamatan

Selang waktu pengamatan merupakan parameter temporal yang sangat menentukan akurasi dalam perhitungan indeks keandalan sebuah sistem tenaga listrik. Periode ini mencakup total waktu di mana suatu peralatan, seperti transformator atau saluran transmisi, berada dalam pengawasan aktif untuk dicatat setiap kejadian operasionalnya. Tanpa batasan waktu yang jelas, data mengenai kegagalan atau pemeliharaan tidak akan memiliki nilai statistik yang berarti, karena keandalan pada dasarnya adalah probabilitas suatu perangkat menjalankan fungsinya dalam jangka waktu tertentu di bawah kondisi operasi yang spesifik.

Dalam industri ketenagalistrikan global, penggunaan satuan waktu satu tahun telah disepakati sebagai standar emas untuk melakukan tinjauan performa. Penggunaan siklus tahunan ini bukan tanpa alasan; siklus satu tahun mampu menangkap berbagai fluktuasi variabel lingkungan dan operasional, mulai dari perubahan cuaca ekstrem di musim penghujan yang memicu gangguan petir, hingga kondisi beban puncak yang biasanya terjadi pada bulan-bulan tertentu. Dengan merangkum data selama 365 hari, para engineer mendapatkan gambaran utuh mengenai ketangguhan sistem dalam menghadapi berbagai anomali musiman.

Indikator utama yang dinilai selama periode pengamatan ini meliputi frekuensi gangguan, durasi pemadaman, serta waktu rata-rata yang dibutuhkan untuk pemulihan sistem. Data ini kemudian diolah menjadi indeks keandalan standar seperti SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) dan SAIDI (System Average Interruption Duration Index). Dengan membagi total kejadian gangguan terhadap periode pengamatan tahunan, manajemen dapat melihat apakah tren kegagalan sistem cenderung menurun atau meningkat, yang mana hal ini menjadi sinyal penting untuk menentukan kesehatan aset secara keseluruhan.

Meskipun pengumpulan data di lapangan sering kali dilakukan dalam jangka waktu yang lebih panjang, misalnya tiga atau lima tahun untuk mendapatkan sampel statistik yang lebih kuat, hasil akhirnya tetap akan dikonversi dan dinyatakan dalam satuan per tahun. Standarisasi ini bertujuan untuk menciptakan konsistensi dalam pelaporan teknis, sehingga performa Gardu Induk di satu wilayah dapat dibandingkan secara "apel-ke-apel" dengan wilayah lainnya. Selain itu, basis data tahunan mempermudah auditor teknik dalam memverifikasi apakah suatu penyulang telah mencapai target kinerja yang ditetapkan dalam kontrak tingkat layanan atau Service Level Agreement.

Secara analitis, perhitungan yang dinyatakan dalam ukuran per tahun ini memudahkan para perencana sistem dalam melakukan pemodelan prediktif. Dengan mengetahui laju kegagalan tahunan, tim pemeliharaan dapat menyusun jadwal Life Cycle Management untuk setiap komponen. Misalnya, jika sebuah isolator menunjukkan tren penurunan performa yang signifikan dalam dua tahun terakhir berdasarkan data pengamatan, maka tindakan penggantian dapat direncanakan sebelum peralatan tersebut mencapai akhir masa pakainya, sehingga risiko pemadaman total dapat dihindari.

Sebagai penutup, selang waktu pengamatan yang terstandarisasi merupakan fondasi bagi pengambilan keputusan strategis dalam investasi infrastruktur. Data tahunan yang akurat membantu perusahaan listrik untuk mengalokasikan anggaran perbaikan pada titik-titik jaringan yang memiliki

tingkat gangguan tertinggi. Dengan demikian, sistem kelistrikan—seperti yang sedang dikembangkan di wilayah Lampung—tidak hanya dibangun untuk memenuhi kebutuhan saat ini, tetapi juga dipantau kinerjanya secara berkelanjutan agar tetap andal dan efisien dalam jangka panjang bagi seluruh konsumen.

4. Kondisi Operasi

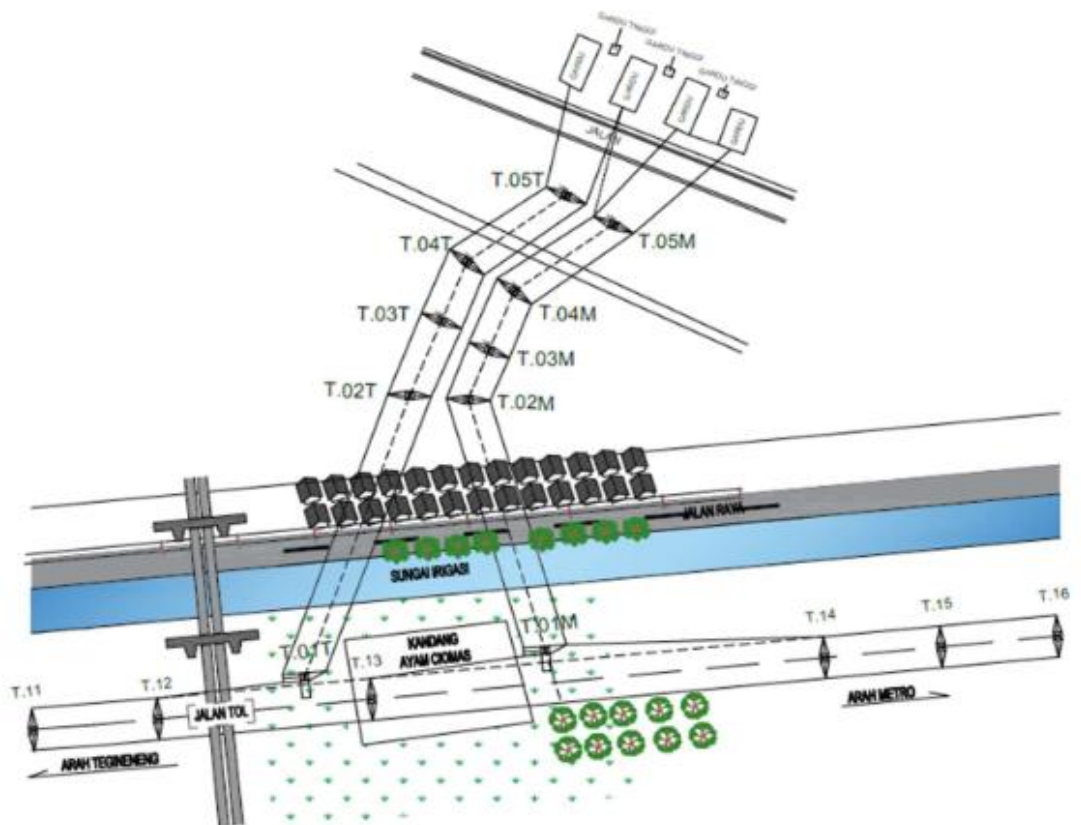
Kondisi operasi merupakan keadaan atau lingkungan tempat suatu peralatan listrik beroperasi, yang sangat mempengaruhi kinerja serta tingkat keandalannya. Setiap peralatan dalam sistem tenaga listrik dapat memiliki kondisi operasi yang berbeda-beda, tergantung pada lokasi, fungsi, dan jenis beban yang dilayaninya.

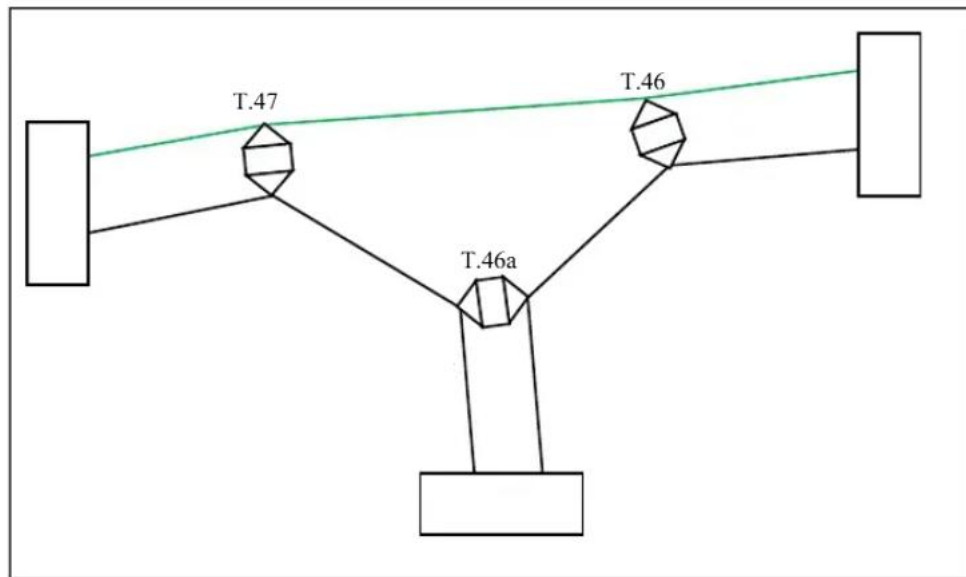
Sebagai contoh, sebuah generator yang beroperasi pada kondisi tegangan lebih akan mengalami tekanan listrik yang lebih tinggi dari batas normalnya, sehingga berpotensi menurunkan umur pakai dan meningkatkan risiko kegagalan. Demikian pula, peralatan listrik yang dipasang di luar ruangan (outdoor) dan berada di wilayah dengan intensitas petir tinggi akan lebih rentan terhadap gangguan, seperti lonjakan tegangan atau kerusakan isolasi akibat sambaran petir langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penilaian terhadap perilaku dan keandalan suatu peralatan listrik tidak dapat dilepaskan dari kondisi operasinya. Faktor-faktor seperti lingkungan, suhu, kelembapan, tegangan, arus, serta frekuensi gangguan eksternal perlu diperhitungkan secara menyeluruh agar kinerja sistem tenaga listrik dapat dipertahankan secara optimal dan keandalannya tetap terjaga dalam jangka panjang.

2.1.5 Cut Off Single Phi Incomer

Konsumsi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan setiap tahunnya, seiring dengan pertumbuhan ekonomi nasional yang semakin berkembang. Kenaikan kebutuhan energi listrik ini mendorong perlunya peningkatan kapasitas sistem tenaga listrik, baik dari sisi peralatan pembangkit, jaringan transmisi, maupun sistem distribusi,

agar dapat menjamin keandalan pasokan dan memenuhi kebutuhan listrik masyarakat secara optimal. Saat ini Subsistem Lampung menerima transfer daya dari Subsistem Sumatera Selatan melalui jaringan 150 kV (SUTT 150 kV Gumawang – Pakuan Ratu – Menggala dan SUTT 150 kV Baturaja – Martapura – Blambangan Umpu). Hal ini dikarenakan beban Lampung lebih besar daripada jumlah daya pembangkit yang tersedia di Subsistem Lampung. Dalam upaya menjaga kestabilan dan kontinuitas penyaluran energi, dilakukan peningkatan (*uprating*) pada konduktor maupun komponen sistem lainnya. Konfigurasi merupakan langkah untuk memenuhi kebutuhan daya pada kondisi beban yang belum terlalu besar. Dengan perubahan SUTT Eksisting Terkait maka terdapat saving dari sisi losses transmisi serta kontinuitas listrik yang mengalir ke pelanggan dapat terjaga dengan baik seiring dengan meningkatnya keandalan akibat beroperasinya proyek tersebut.





Gambar 2. 4 *Single Phi Incomer*

Sistem transmisi dengan konfigurasi *single phi* atau penyulang tunggal memiliki kerentanan struktur yang sangat tinggi dalam hierarki keandalan sistem tenaga listrik. Dalam skema ini, aliran daya dari sumber menuju beban hanya bergantung pada satu jalur penghantar fisik tanpa adanya jalur alternatif atau redundansi. Secara teknis, kondisi ini menempatkan seluruh beban yang dipikul oleh Gardu Induk (GI) terkait pada posisi yang berisiko tinggi, karena tidak adanya toleransi terhadap kegagalan komponen tunggal (*single point of failure*) yang dapat mengakibatkan terputusnya suplai energi secara mendadak.

Risiko utama dari sistem *single phi* adalah potensi kehilangan pasokan daya secara total apabila terjadi gangguan permanen maupun temporer pada salah satu bagian saluran, baik disebabkan oleh faktor internal seperti kerusakan isolator, maupun faktor eksternal seperti sambaran petir atau pohon tumbang. Karena tidak adanya jalur cadangan (*backup line*), sistem tidak memiliki kemampuan untuk melakukan manuver beban secara otomatis atau manual ke penghantar lain. Hal ini mengakibatkan arus listrik terputus sepenuhnya, yang dalam skala luas dapat memicu kondisi *blackout* pada gardu induk penerima dan menghentikan seluruh aktivitas penyaluran daya ke konsumen.

Hadirnya proyek *Incomer* 150 kV Lampung-1 beserta perubahan SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi) eksisting merupakan langkah revolusioner untuk mengubah topologi jaringan dari sistem radial yang rapuh menjadi sistem yang lebih terinterkoneksi dan *robust*. Dengan adanya *incomer* baru, sistem kelistrikan Lampung kini memiliki jalur ganda atau *loop system* yang memungkinkan aliran daya tetap terjaga meskipun salah satu saluran mengalami gangguan. Transformasi ini secara drastis meningkatkan indeks keandalan sistem, memastikan bahwa durasi dan frekuensi pemadaman dapat ditekan hingga level minimum.

Selain aspek keandalan, pengoperasian proyek ini memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi energi berupa *saving* atau penghematan dari sisi *losses* (rugi-rugi) transmisi. Dalam hukum kelistrikan, penambahan jalur penghantar baru secara paralel akan menurunkan nilai impedansi total jaringan. Penurunan impedansi ini secara langsung mengurangi energi yang terbuang menjadi panas di sepanjang kabel transmisi, sehingga efisiensi penyaluran daya meningkat. Dana yang sebelumnya terbuang akibat susut teknis kini dapat dikonversi menjadi ketersediaan daya yang lebih besar untuk dialokasikan kepada pelanggan.

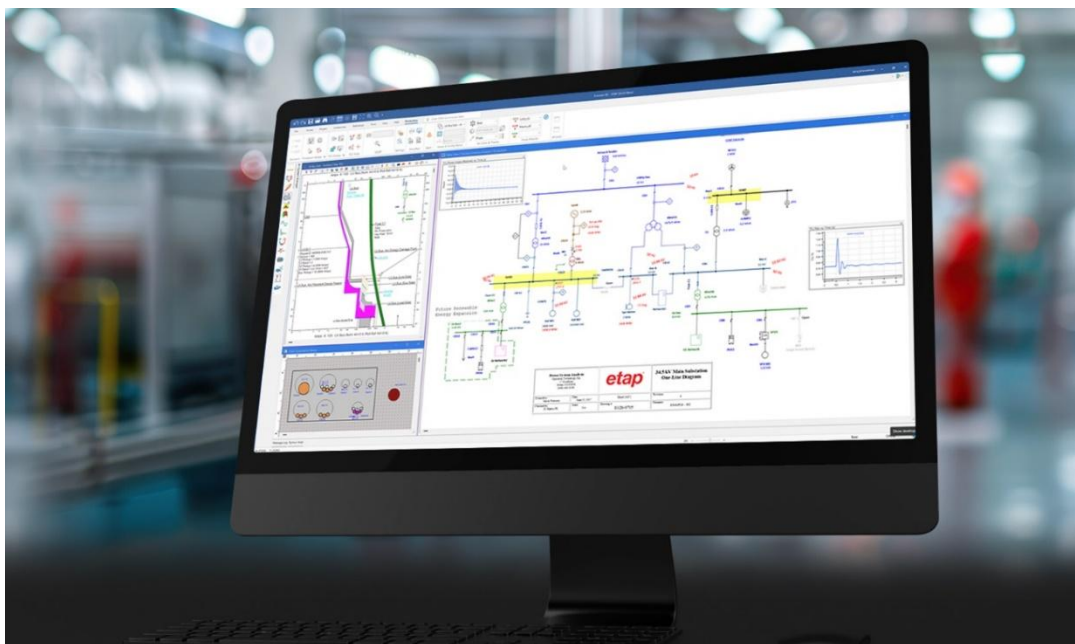
Peningkatan kapasitas hantar arus melalui proyek ini juga menjamin bahwa kebutuhan listrik masyarakat dan industri di wilayah Lampung dapat terpenuhi dengan kualitas yang lebih baik. Dengan distribusi beban yang lebih merata di antara jalur-jalur transmisi yang ada, risiko beban lebih (*overload*) pada penghantar eksisting dapat dihindari. Stabilitas aliran daya yang dihasilkan memastikan bahwa peralatan listrik konsumen menerima suplai yang kontinu tanpa adanya fluktuasi yang sering kali merugikan sektor bisnis dan manufaktur yang sangat bergantung pada kualitas daya listrik.

2.1.6 ETAP

ETAP, atau *Electrical Transient Analyzer Program*, merupakan perangkat lunak analisis sistem tenaga listrik yang paling komprehensif dan banyak digunakan oleh para profesional di seluruh dunia. Software ini dirancang untuk membantu teknisi listrik dalam

merancang, mensimulasikan, mengoperasikan, dan mengoptimalkan sistem tenaga listrik, mulai dari skala pembangkitan, transmisi, hingga distribusi industri. Dengan antarmuka berbasis grafis yang intuitif, ETAP memungkinkan pengguna untuk membangun model *Single Line Diagram* (SLD) secara digital yang merepresentasikan kondisi nyata di lapangan, sehingga analisis teknis dapat dilakukan dengan tingkat presisi yang sangat tinggi.

Kekuatan utama ETAP terletak pada kemampuannya untuk melakukan berbagai jenis analisis stasioner dan dinamis secara terintegrasi. Fitur yang paling mendasar dan sering digunakan adalah *Load Flow Analysis* (aliran daya), yang berfungsi untuk menghitung aliran arus, daya aktif, daya reaktif, serta jatuh tegangan pada setiap titik dalam jaringan. Melalui simulasi ini, perencana sistem dapat mengetahui apakah kabel, transformator, dan peralatan proteksi lainnya bekerja dalam batas kapasitasnya atau justru mengalami beban lebih (*overload*) yang berisiko merusak infrastruktur.



Gambar 2. 5 Menu ETAP

Selain analisis aliran daya, ETAP sangat krusial dalam melakukan studi hubung singkat (*Short Circuit Analysis*). Fitur ini memungkinkan pengguna untuk menghitung

arus gangguan maksimum yang mungkin terjadi pada berbagai titik di sistem kelistrikan. Data dari hasil simulasi hubung singkat ini menjadi landasan utama dalam menentukan rating pemutus sirkuit (*Circuit Breaker*) dan koordinasi proteksi. Dengan ETAP, risiko kegagalan sistem yang katastrofik dapat dimitigasi sejak tahap perencanaan karena teknisi dapat memastikan bahwa sistem proteksi mampu mengisolasi gangguan secara cepat dan tepat.

Dalam konteks modernisasi jaringan seperti yang dilakukan di wilayah Lampung, ETAP berperan sebagai alat validasi terhadap rencana pengembangan sistem. Sebelum infrastruktur fisik seperti Gardu Induk atau saluran transmisi baru dibangun, para engineer melakukan simulasi "What-If" untuk melihat dampak penambahan komponen tersebut terhadap profil tegangan dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Hal ini membantu dalam mengambil keputusan investasi yang akurat, menghindari kesalahan desain yang mahal, serta memastikan bahwa penambahan aset baru benar-benar memberikan perbaikan signifikan terhadap stabilitas tegangan di area yang dituju.

Fleksibilitas ETAP juga mencakup analisis stabilitas transien dan kualitas daya. Software ini mampu mensimulasikan bagaimana sistem merespons perubahan mendadak, seperti pelepasan beban (*load shedding*), start motor besar, atau peralihan sumber energi terbarukan yang bersifat intermiten. Dengan modul yang sangat detail, ETAP dapat mengidentifikasi masalah harmonisa dan fluktuasi frekuensi yang bisa mengganggu kinerja peralatan elektronik sensitif. Kemampuan simulasi dinamis ini menjadikan ETAP standar emas dalam menjaga keandalan sistem kelistrikan di sektor industri berat, kilang minyak, hingga jaringan utilitas skala besar.

Terakhir, ETAP terus bertransformasi menjadi platform cerdas yang mendukung konsep *Digital Twin* dan sistem otomatisasi real-time. Melalui integrasi data lapangan secara langsung, ETAP tidak hanya digunakan untuk perencanaan di atas kertas, tetapi juga untuk pemantauan kondisi aset secara langsung dan pemeliharaan prediktif. Dengan dukungan standar internasional seperti IEEE dan IEC, ETAP memberikan jaminan bahwa hasil analisis yang dikeluarkan telah memenuhi kaidah keteknikan yang diakui secara global, menjadikannya instrumen vital bagi keberlangsungan energi yang aman dan efisien.

2.1.7 Menu Load Flow Analysis ETAP

Menu Load Flow Analysis merupakan fitur paling fundamental dan krusial dalam ekosistem software ETAP, yang dirancang untuk mensimulasikan aliran daya listrik dalam kondisi tunak (steady-state). Analisis ini bekerja dengan menghitung aliran daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) di seluruh jaringan, serta menentukan profil tegangan di setiap bus atau gardu induk. Melalui menu ini, para engineer dapat memvisualisasikan bagaimana energi mengalir dari sumber pembangkit melalui transformator dan saluran transmisi hingga mencapai beban akhir di sisi konsumen.

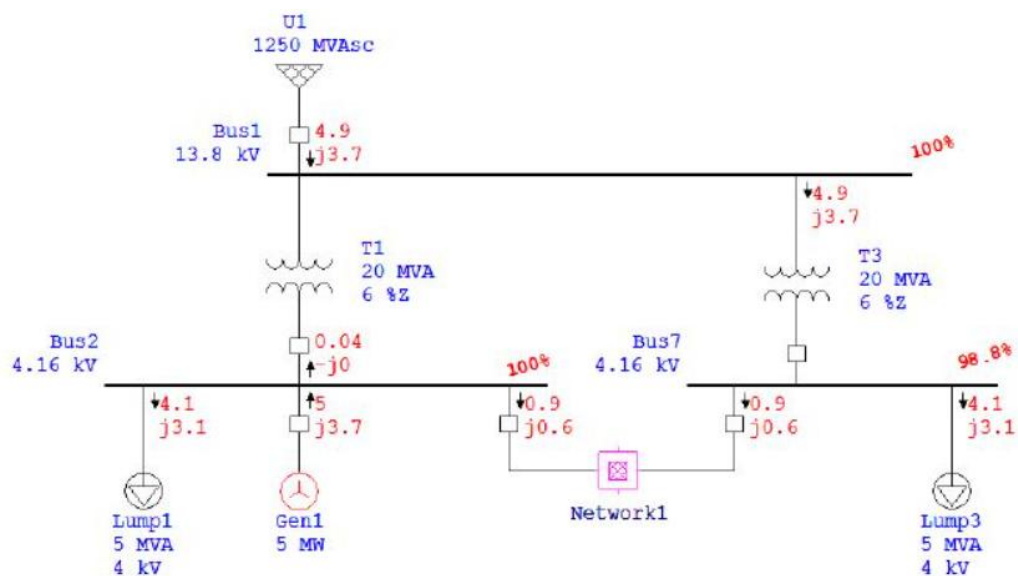
Saat mengakses menu ini, pengguna akan disuguhkan dengan Toolbar Load Flow yang berisi berbagai parameter konfigurasi simulasi. Salah satu komponen utamanya adalah Study Case Editor, di mana pengguna dapat menentukan metode perhitungan yang akan digunakan, seperti Newton-Raphson, Fast Decoupled, atau Gaus-Seidel. Pemilihan metode ini sangat penting karena setiap algoritma memiliki karakteristik konvergensi yang berbeda-beda, tergantung pada kompleksitas dan ukuran jaringan yang sedang dianalisis, guna memastikan hasil perhitungan memiliki akurasi numerik yang tinggi.

Fitur unggulan lainnya dalam menu Load Flow adalah kemampuan untuk melakukan pemantauan kondisi peralatan secara real-time melalui indikator visual. Jika suatu komponen seperti kabel atau transformator mengalami pembebanan berlebih (overload), atau jika suatu bus mengalami jatuh tegangan di luar batas toleransi, ETAP akan memberikan peringatan otomatis berupa perubahan warna pada simbol komponen di Single Line Diagram. Hal ini memudahkan pengguna untuk segera mengidentifikasi titik lemah dalam sistem tanpa harus memeriksa ribuan baris data secara manual.

Selain pemantauan visual, menu ini dilengkapi dengan fitur Alert View yang memberikan ringkasan mendetail mengenai pelanggaran batas operasional yang terjadi. Pengguna dapat mengatur ambang batas kritis (critical) dan marginal untuk tegangan bus serta pembebanan perangkat sesuai dengan standar yang berlaku, seperti IEEE atau IEC. Dengan adanya daftar peringatan yang terorganisir, proses optimasi jaringan—seperti penentuan posisi tap transformer atau pemasangan bank kapasitor untuk perbaikan faktor daya—dapat dilakukan dengan jauh lebih terarah dan efisien.

Output dari menu Load Flow Analysis tidak hanya terbatas pada tampilan grafis, tetapi juga mencakup laporan teknis yang sangat komprehensif melalui Report Manager. Laporan ini menyajikan data tabulasi mengenai rugi-rugi daya pada saluran (line losses), aliran arus pada setiap cabang, serta ringkasan konsumsi daya total pada sistem. Data-data ini sangat vital bagi manajemen energi untuk mengevaluasi efisiensi sistem kelistrikan dan merencanakan pengembangan kapasitas di masa depan agar sistem tetap andal meskipun terjadi peningkatan beban.

Terakhir, fleksibilitas menu ini terlihat dari kemampuannya untuk menjalankan simulasi dalam berbagai skenario operasional yang berbeda, atau yang dikenal sebagai Scenario Wizard. Pengguna dapat membandingkan kondisi sistem saat beban puncak, beban minimum, atau saat terjadi pemadaman pada salah satu jalur transmisi hanya dengan beberapa klik. Kemampuan analitis ini menjadikan Load Flow Analysis di ETAP sebagai instrumen pengambilan keputusan yang sangat kuat bagi para praktisi kelistrikan dalam menjaga stabilitas dan kualitas daya di lingkungan industri maupun utilitas publik.



Gambar 2. 6 Tampilan *Load Flow*

2.1.8 Metode Kalkulasi ETAP

Metode kalkulasi Load Flow pada ETAP merupakan algoritma fundamental yang digunakan untuk menentukan parameter operasional sistem tenaga listrik dalam kondisi stabil. Fokus utama dari kalkulasi ini adalah untuk menemukan nilai besaran tegangan dan sudut fasa pada setiap titik pertemuan atau bus, serta menghitung aliran daya aktif dan reaktif pada setiap saluran transmisi maupun transformator. Dengan menjalankan metode ini, para teknisi dapat memvalidasi apakah infrastruktur baru di Lampung mampu menyalurkan energi secara optimal tanpa melampaui batas kapasitas fisik penghantar yang tersedia.

Algoritma yang paling mendasar dan sering menjadi pilihan utama di dalam perangkat lunak ETAP adalah metode Newton-Raphson. Metode ini bekerja dengan menggunakan pendekatan berulang atau iteratif untuk menyelesaikan persamaan aliran daya yang tidak linear. Keunggulan teknisnya terletak pada kemampuan penyelesaian yang sangat cepat dan stabil, terutama untuk sistem kelistrikan yang memiliki konfigurasi jaringan yang rapat dan kompleks. Dalam simulasi sistem di wilayah Lampung, Newton-Raphson sangat efektif untuk mendeteksi penyimpangan tegangan yang sangat kecil sekalipun pada pusat-pusat beban.

Selain itu, ETAP juga menyediakan metode Fast-Decoupled yang merupakan bentuk penyederhanaan dari algoritma sebelumnya. Metode ini memanfaatkan karakteristik fisik sistem tenaga listrik di mana aliran daya aktif memiliki hubungan yang kuat dengan sudut fasa tegangan, sedangkan aliran daya reaktif sangat dipengaruhi oleh besaran tegangan. Dengan memisahkan kedua aspek perhitungan tersebut, beban kerja perangkat komputer menjadi lebih ringan dan proses simulasi berjalan jauh lebih cepat. Metode ini sangat ideal digunakan untuk simulasi jaringan transmisi skala luas di mana efisiensi waktu menjadi prioritas utama.

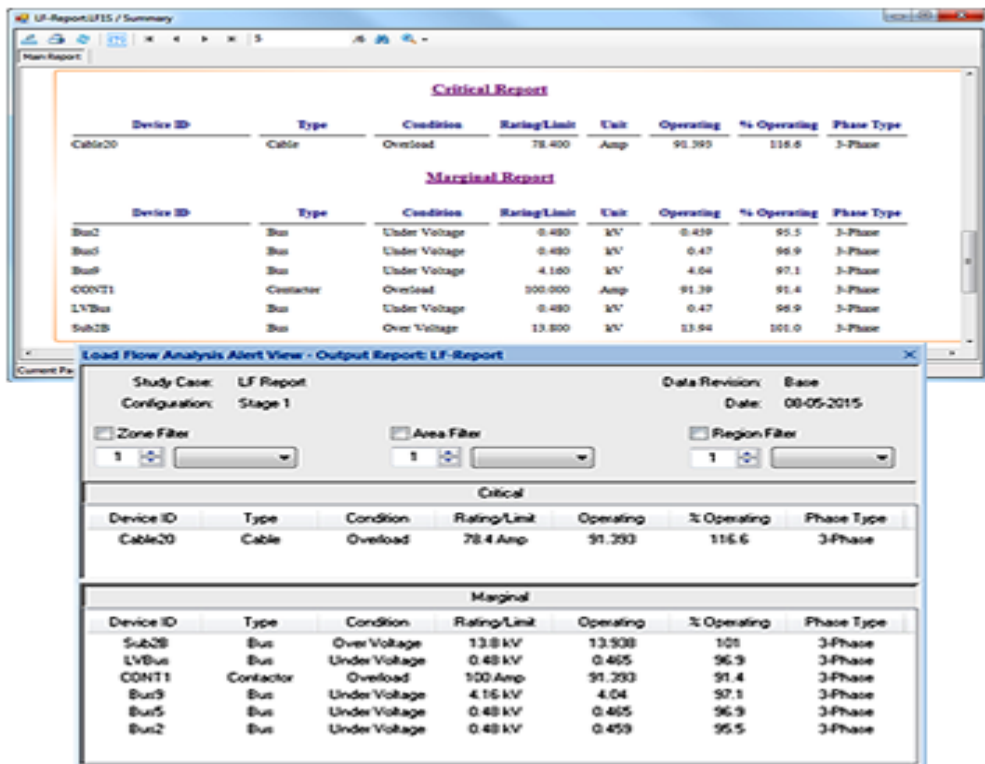
Metode selanjutnya yang tersedia adalah Gauss-Seidel, yang merupakan metode perhitungan berulang paling klasik dalam teknik elektro. Berbeda dengan Newton-Raphson, metode ini tidak memerlukan matriks turunan yang rumit, sehingga secara matematis lebih sederhana namun membutuhkan langkah pengulangan yang jauh lebih banyak untuk mencapai hasil akhir yang stabil. Meskipun saat ini jarang digunakan untuk

analisis sistem transmisi besar karena sifat pencarian hasilnya yang lambat, metode ini terkadang masih relevan digunakan sebagai pembanding dalam studi akademis mengenai perilaku aliran listrik.

Sangat penting bagi seorang perencana sistem untuk mengatur kriteria konvergensi di dalam pengaturan studi ETAP sebelum memulai kalkulasi. Kriteria ini menentukan tingkat ketelitian hasil akhir, di mana simulasi akan berhenti secara otomatis jika selisih daya pada langkah terakhir sudah berada di bawah ambang batas yang ditentukan. Pengaturan yang presisi memastikan bahwa hasil tegangan pada Gardu Induk Metro dan Sribawono bukan sekadar angka perkiraan, melainkan hasil perhitungan yang telah mencapai titik kesetimbangan energi yang nyata di dalam jaringan.

ETAP juga memiliki fitur Adaptive Newton-Raphson, sebuah metode cerdas yang secara otomatis menyesuaikan langkah perhitungan jika sistem menghadapi kondisi yang sulit mencapai titik temu atau hasil yang stabil. Hal ini biasanya terjadi saat sistem sangat terbebani atau memiliki hambatan yang sangat tinggi pada saluran. Fitur ini memastikan simulasi tetap berjalan lancar tanpa mengalami kegagalan sistem, sehingga analisis terhadap penambahan Gardu Induk baru tetap menghasilkan data yang akurat meskipun struktur jaringan berubah dari sistem satu arah menjadi sistem interkoneksi yang lebih rumit.

Secara keseluruhan, pemahaman terhadap berbagai metode kalkulasi aliran daya di ETAP memberikan jaminan bahwa hasil analisis teknis yang dilakukan memiliki tingkat akurasi tinggi dan dapat dipertanggungjawabkan. Hasil simulasi berupa profil tegangan dan data rugi-rugi daya merupakan representasi nyata dari kondisi fisik yang dihitung secara sistematis. Dengan demikian, keputusan pembangunan infrastruktur kelistrikan di Lampung didasarkan pada perhitungan ilmiah yang kuat untuk memastikan investasi tersebut benar-benar mampu meningkatkan kualitas pelayanan listrik bagi masyarakat secara berkelanjutan.



Gambar 2. 7 Report *Load Flow*

2.2. Penelitian yang Relevan

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

1. Menurut Rizky Oktavian. 2017, dalam jurnal yang berjudul "Analisis Keandalan Sistem Transmisi 150 kV Wilayah Bali Menggunakan Metode Monte Carlo" menyatakan bahwa untuk meningkatkan keandalan sistem 150 kV di Bali dapat dilakukan dengan cara memperkecil nilai dari FOR dari pembangkit yang memiliki nilai FOR paling besar dan meningkatkan daya cadang yang ada dengan prediksi beban yang akan bertumbuh ditahun selanjutnya [1].
2. Menurut Bawa Adiputra. 2014, dalam jurnal yang berjudul "Studi Keamanan dan Keandalan Suplai Sistem Kelistrikan Bali Sesuai Rencana Operasi SUTET 500 kV" menyatakan bahwa Kriteria keandalan sistem kelistrikan Bali terutama pada jaringan SUTET 500 kV interkoneksi Jawa- Bali mengacu pada data Statistik PT PLN (Persero) tahun 2011 per kilometer per tahun dengan ruang lingkup daerah transmisi P3B Jawa-Bali. Analisis SAIFI menunjukkan jaringan SUTET 500 kV interkoneksi Jawa-Bali berpotensi mengalami pemadaman sebanyak 2,0022 kali/tahun pada Skenario 1, pada Skenario 2 sebanyak 3,119 kali/tahun dan pada Skenario 3 sebanyak 3,3015 kali/tahun . [2].
3. Menurut Yoppi Kurnia Putra. 2023, dalam jurnal yang berjudul "Analisis Kemampuan Pentanahan Menara SUTT Terhadap Sambaran Petir Langsung Yang Mengakibatkan *Backflashover* Pada Saluran Transmisi Ponorogo - Manisrejo" menyatakan bahwa Pada kondisi awal nilai resistansi kaki menara $2,24 \Omega$ dengan karakteristik arus sambaran sebesar 20 kA dan tegangan lengan yang terjadi sebesar 147,808 kV sedangkan karakteristik arus sambaran 180 kA tegangan lengan yang terjadi sebesar 1324,31 kV . sehingga pada arus sambaran petir sebesar 180 kA telah melebihi dari tegangan lompatan api yang sebesar 1315,46 kV, maka ini akan terjadi *backflashover*. Dengan menambah panjang elektroda pentanahan sepanjang 20 meter didapatkan hasil nilai resistansi baru sebesar 0,84 Ω . Sehingga tegangan lengan menara turun dari 1324,31 kV menjadi 1292,25 kV dengan karakteristik arus sambaran 180 kA. Dengan mengurangi nilai resistansi pentanahan menara dari 2,24

O menjadi 0,84 Ohm ini dapat menurunkan gangguan tegangan lebih akibat dari sambaran petir langsung. [3]

4. Menurut Idris A. 2021 dalam jurnal yang berjudul “Analisis Penerapan metode *Counterpoise* Pada Tower Transmisi Saluran Udara Tegangan Tinggi 70 Kv *Line* Mandai - Pangkep” menyatakan Perbaikan nilai tahanan pentanahan tower transmisi dengan metode *counterpoise* mengakibatkan perubahan nilai tahanan pentanahan tower 70 sebesar 73,44 % dari 6,93 Ω menjadi 1,84 Ω dan Tower 39 sebesar 76,33 % dari 10,14 Ω menjadi 2,4 Ω . Dengan kecilnya nilai tahanan pada suatu pentanahan transmisi maka dapat menurunkan gangguan tegangan lebih (*backflashover*) akibat dari sambaran petir langsung. [4]
5. Menurut Junaedi J. 2024, dalam jurnal yang berjudul “Peninjauan Keandalan Sistem Pentanahan Tower SUTT 150 kV Jakabaring – Keramasan Terhadap Arus Gangguan” menyatakan bahwa Sistem pentanahan yang baik terbukti dapat menurunkan nilai potensial listrik yang mengalir pada permukaan tanah, terutama di area di bawah kaki *tower*. Nilai resistansi pentanahan sangat berpengaruh dalam menyalurkan tegangan listrik ke dalam tanah. Resistansi yang rendah dapat mengurangi potensial tegangan yang terjadi pada permukaan tanah. Simulasi menggunakan Cymgrd menunjukkan bahwa semakin besar nilai arus gangguan yang terjadi, semakin besar pula potensial tegangan yang mengalir di permukaan tanah. Pada fasa R, nilai tegangan sentuh sebesar 3,94377 volt lebih besar dibandingkan dengan fasa T yang memiliki nilai tegangan sentuh sebesar 0,377308 volt. Besarnya potensi *Ground Potential Rise* (GPR) yang ditimbulkan saat terjadi gangguan pada transmisi masih dalam batas aman sesuai dengan hasil simulasi. Berdasarkan standar SPLN T5.012:2020 Lampiran A, batas maksimum untuk tegangan langkah (E_s) adalah 2800 V dan tegangan sentuh (E_{touch}) adalah 787.[5]