

BAB II

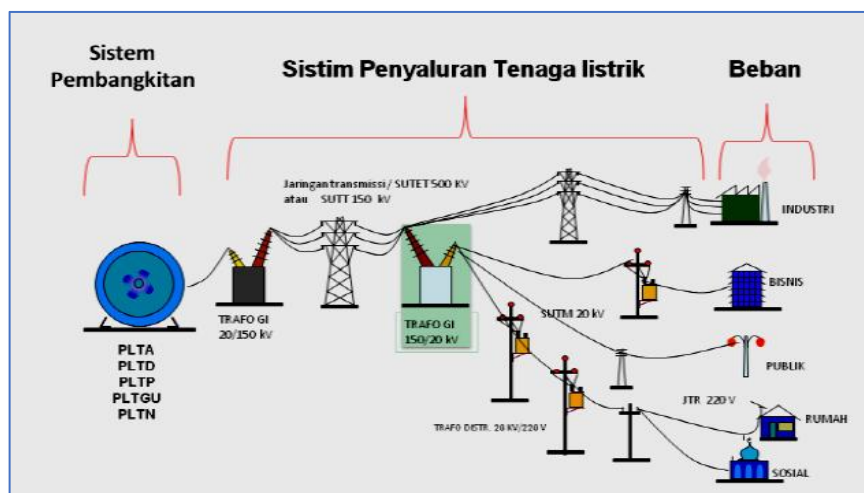
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Kelistrikan

1. Pengertian Sistem Kelistrikan

Sistem kelistrikan merupakan suatu kesatuan komponen yang berfungsi menghasilkan, menyalurkan, dan mendistribusikan energi listrik kepada konsumen secara berkesinambungan dan andal. Menurut [3] sistem tenaga listrik mencakup proses pembangkitan, transmisi, dan distribusi yang harus bekerja secara terpadu agar kontinuitas penyaluran energi tetap terjaga. Selain itu, [10] menjelaskan bahwa sistem kelistrikan modern telah mengalami transformasi besar dengan integrasi energi terbarukan dan teknologi digitalisasi jaringan. [11] menegaskan bahwa stabilitas dan efisiensi sistem kelistrikan ditentukan oleh kemampuan sistem dalam menjaga keseimbangan antara pembangkitan dan beban secara real-time. [12] menyoroti bahwa sistem kelistrikan menghadapi tantangan besar dari penetrasi sumber energi terdistribusi yang menuntut kontrol dan proteksi cerdas. Pembangkit merupakan sumber energi listrik yang akan disalurkan ke Gardu Induk yang kemudian akan disalurkan kembali kepada konsumen [13].



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik [14]

2. Komponen Sistem Kelistrikan

Komponen utama dalam sistem kelistrikan terdiri atas pembangkit listrik, saluran transmisi, jaringan distribusi, serta beban atau konsumen akhir. Menurut [15] pembangkit berperan dalam menghasilkan energi listrik dari berbagai sumber seperti batu bara, gas, air, atau energi terbarukan. Selanjutnya, bagian transmisi bertugas menyalurkan daya listrik dari pembangkit ke pusat beban dengan tegangan tinggi untuk mengurangi rugi daya [3] . Distribusi merupakan tahap penyaluran terakhir menuju konsumen dengan tingkat tegangan yang lebih rendah [16] . Terakhir, komponen beban menjadi bagian yang menerima dan memanfaatkan energi listrik, baik untuk kebutuhan industri, komersial, maupun rumah tangga.

2.1.2 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

1. Pengertian Sistem Transmisi

Sistem transmisi tenaga listrik adalah bagian dari sistem kelistrikan yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari pembangkit menuju pusat beban dengan tegangan tinggi agar kerugian daya (*losses*) dapat diminimalkan. Menurut [17] , transmisi berperan penting dalam menjaga stabilitas daya dan kualitas tegangan selama proses pengiriman energi. [18] menambahkan bahwa sistem transmisi umumnya beroperasi pada tegangan 150 kV, 275 kV, atau lebih, bergantung pada jarak dan kapasitas daya yang dikirimkan. Studi oleh [15] menegaskan pentingnya sistem proteksi pada transmisi tegangan tinggi untuk mencegah kerusakan akibat gangguan petir atau beban lebih. Menurut Dhamala & Ghassemi (2025), integrasi sistem kontrol otomatis seperti SCADA dapat meningkatkan keandalan dan efisiensi operasi transmisi.

Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV umumnya menggunakan konduktor ACSR (*Aluminum Conductor Steel Reinforced*) dan dirancang untuk beroperasi secara andal di berbagai kondisi

lingkungan, termasuk di wilayah dengan tingkat isokeraunik tinggi seperti Kalimantan Timur. Transformasi sistem kelistrikan modern dengan integrasi sumber energi terbarukan semakin meningkatkan pentingnya keandalan saluran transmisi sebagai penghubung antar titikangkitan dan beban.

2. Komponen Utama Sistem Transmisi

Komponen utama dalam sistem transmisi terdiri atas konduktor, menara transmisi, isolator, dan transformator. Menurut [20] konduktor berfungsi sebagai media penghantar arus listrik dari pembangkit menuju pusat distribusi. Menara transmisi berperan dalam menopang konduktor agar aman dari permukaan tanah. Isolator berfungsi memisahkan bagian yang bertegangan dengan menara untuk mencegah kebocoran arus ([18]. Transformator digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai kebutuhan system.

a. Konduktor

Kemampuan saluran transmisi dalam menyalurkan daya sangat bergantung pada konduktor yang digunakan. Ketika konduktor dialiri arus listrik, panas dihasilkan sebagai efek dari resistansi konduktor. Besarnya kenaikan suhu ini ditentukan oleh jenis material dan ukuran konduktor. Jenis dan ukuran konduktor juga memengaruhi nilai hambatan per meter. Semakin besar diameter konduktor, maka hambatan terhadap aliran arus menjadi semakin kecil. Ketika terjadi surja, baik karena sambaran petir maupun gangguan hubung singkat pada konduktor, nilai impedansi yang dihasilkan dikenal sebagai impedansi surja. Impedansi ini sangat dipengaruhi oleh konstanta induktansi (L) dan kapasitansi (C) penghantar. Kedua konstanta tersebut merupakan karakteristik fisik penghantar yang bergantung pada material, struktur, serta konfigurasi penghantar dalam sistem transmisi. Kedua faktor ini menentukan respons penghantar terhadap gelombang surja.

b. Isolator

Isolator berfungsi sebagai penahan bagian konduktor terhadap ground. Isolator biasanya terbuat dari bahan porselirkit, gelas dan sintetik. Bahan isolator harus memiliki resistansi yang tinggi untuk melindungi kebocoran arus dan memiliki ketebalan yang cukup untuk mencegah tegangan tembus pada nilai tegangan yang tinggi. Isolator harus tahan terhadap beban konduktor dan guncangan apapun. Isolator pada sistem transmisi berfungsi sebagai penyangga konduktor dan pemisah listrik antara konduktor bertegangan tinggi dengan menara baja yang terhubung ke tanah. Isolator memiliki nilai tingkat isolasi dasar (*Basic Insulation Levels/BIL*) dari suatu bahan isolator.

Pada SUTT 150 kV, umumnya digunakan isolator jenis piring (*disc insulator*) dari material porselen atau kaca yang disusun secara seri untuk membentuk string isolator. Kinerja isolator sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan; pada kondisi basah atau terkontaminasi, arus bocor (*leakage current*) melalui permukaan isolator meningkat signifikan, yang dapat mempercepat degradasi performa listrik isolator. Konfigurasi shed yang tidak seragam dapat memengaruhi distribusi tegangan antar keping.

c. Transformator

Transformator merupakan perangkat listrik yang bersifat statis dan berfungsi untuk mengkonversi serta memindahkan energi listrik dari satu level tegangan ke level tegangan yang berbeda. Sebagai salah satu komponen vital dalam sistem kelistrikan, transformator memiliki keterkaitan langsung dengan jaringan transmisi dan distribusi tenaga listrik hingga sampai ke tangan konsumen [21]. Pada umumnya, transformator daya dan transformator distribusi menggunakan jenis transformator tiga fase. Hal ini dikarenakan tegangan dan arus yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik dan disalurkan ke sistem transmisi merupakan sistem tiga fase, sehingga

transformator yang digunakan pun harus sesuai dengan karakteristik tersebut [22].

3. Keandalan Sistem Transmisi

Keandalan transmisi berkaitan erat dengan kemampuan sistem dalam mengalirkan energi tanpa gangguan. Menurut [23] perencanaan sistem transmisi ekstra tinggi (EHV) harus memperhatikan skenario kontingensi tunggal untuk menjamin stabilitas sistem. Penelitian oleh [24] menunjukkan bahwa pengembangan model terpadu transmisi distribusi (*T-D integrated model*) dapat meningkatkan efisiensi jaringan besar. [25] menjelaskan bahwa strategi *transmission sirkit switching* mampu menurunkan biaya operasi tanpa menurunkan keandalan. Sementara penelitian oleh [26] menunjukkan bahwa pemeliharaan prediktif berbasis sensor getaran dan termografi dapat memperpanjang umur komponen transmisi.

Keandalan sistem transmisi dipengaruhi oleh kemampuan sistem proteksi dalam mengisolasi gangguan secara selektif. Evaluasi proteksi saluran udara 150 kV menunjukkan bahwa pengaturan sistem proteksi memiliki peran penting dalam menjaga kontinuitas penyaluran daya listrik [27]. Oleh karena itu, diperlukan strategi teknis tambahan untuk meningkatkan keandalan sistem transmisi terhadap gangguan eksternal seperti sambaran petir.

4. Gangguan Sistem Transmisi

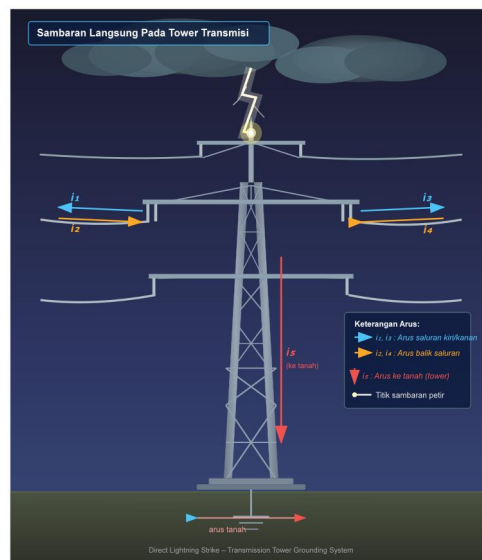
Interuption (gangguan) merupakan hilangnya tegangan atau arus sehingga dapat menyebabkan pemadaman. Terjadinya *interruption* dapat diukur sesuai ketentuan waktu dimulai dari sesaat (0,5 – 30 cycle), seketika (30 cycle – 2 second), sementara (2 second – 2 menit) dan permanen (lebih dari 2 menit) [28].

Gangguan pada jaringan transmisi 150 kV merupakan salah satu penyebab utama terjadinya pemadaman listrik yang berdampak langsung pada penurunan keandalan sistem tenaga. Pemadaman listrik terjadi

ketika aliran daya listrik ke pelanggan terhenti akibat kegagalan pada sistem pembangkitan, transmisi, atau distribusi. Gangguan pada saluran transmisi dapat disebabkan oleh kegagalan mekanik pada konduktor, isolator, menara transmisi, serta gangguan eksternal seperti sambaran petir, pohon tumbang, atau tanah longsor yang mengakibatkan hubungan singkat [29].

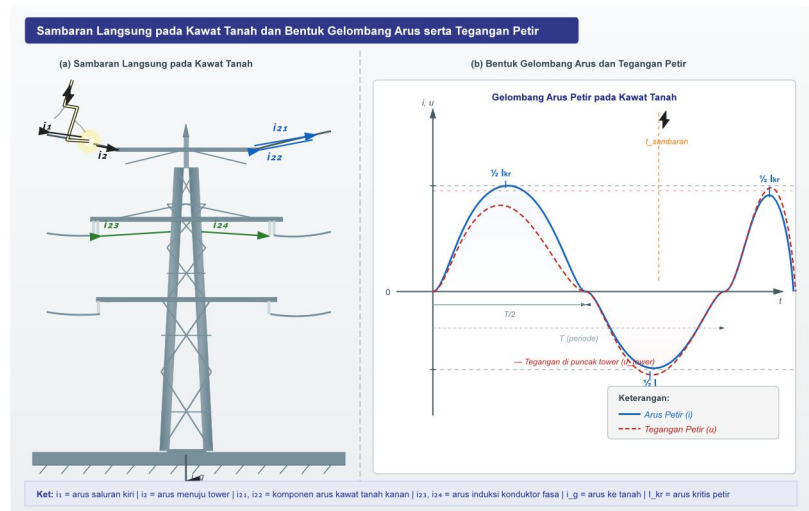
Sambaran petir pada saluran transmisi dapat menyebabkan gangguan melalui tiga cara, yaitu [29]:

- a. Sambaran langsung pada tower transmisi. Sambaran terjadi langsung pada tower, nilai arus puncak petir yang melewati struktur merupakan percabangan arus yang melewati tower dan kawat tanah. Tegangan yang ditimbulkan pada struktur tower adalah penjumlahan dari tegangan yang ditimbulkan akibat nilai resistansi tower dikalikan dengan nilai arus puncak dan perkalian antara nilai induktansi tower dikalikan dengan kecuraman arus. Apabila nilai tegangan yang dibangkitkan pada struktur melebihi nilai tegangan tembus isolator maka dapat menyebabkan *backflashover*.



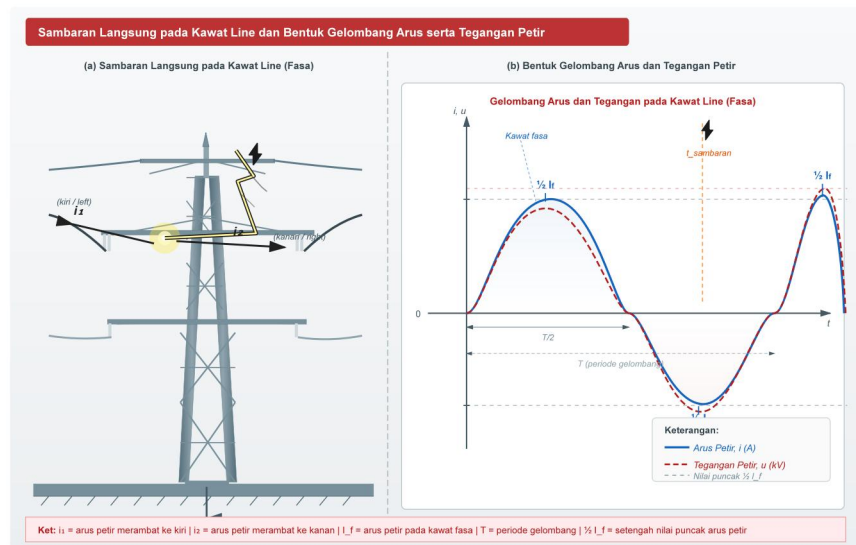
Gambar 2.2 Sambaran Langsung Pada Tower Transmisi [29].

- b. Sambaran langsung pada kawat tanah. Sambaran terjadi pada kawat tanah, nilai arus puncak petir yang melewati struktur adalah setengah dari arus puncak yang kemudian dibagi sesuai merupakan percabangan arus yang melewati tower dan kawat tanah. Nilai arus yang melewati struktur tower pada sambaran ini lebih rendah dibandingkan pada saat sambaran pada tower, tetapi nilai tegangan yang ditimbulkan menjadi lebih besar karena mendapatkan tambahan tegangan efek dari perkalian setengah arus puncak petir dengan impedansi surja kawat tanah.



Gambar 2.3 Sambaran Langsung pada Kawat Tanah dan Bentuk Gelombang Arus Serta Tegangan Petir [29]

- c. Sambaran langsung pada kawat line. Sambaran ini diakibatkan karena kegagalan sudut perlindungan petir. tegangan yang ditimbulkan akibat sambaran ini adalah setengah nilai arus puncak dikalikan nilai impedansi surja kawat line. Apabila nilai tegangan yang dibangkitkan akibat sambaran ini melebihi nilai tegangan tembus isolator maka dapat menyebabkan shielding failure.



Gambar 2.4 Sambaran Langsung pada Kawat line dan Bentuk Gelombang Arus Serta Tegangan Petir [29]

Kegagalan isolator merupakan salah satu penyebab utama pemadaman listrik pada saluran transmisi 150 kV. Isolator berfungsi sebagai pemisah konduktor bertegangan tinggi dari menara penyangga agar tidak terjadi arus bocor ke tanah. Kegagalan isolator akibat tegangan lebih petir dapat terjadi dalam dua mekanisme utama: (1) *flashover* langsung, di mana sambaran petir secara langsung menyebabkan tegangan melebihi nilai *withstand voltage isolator*; dan (2) *back flashover*, di mana arus petir yang mengalir melalui menara dan sistem pentanahan mengakibatkan kenaikan potensial menara (*tower footing voltage rise*) yang membalik polaritas tegangan pada isolator sehingga terjadi *flashover* dari menara ke konduktor. Ghaly et al. (2024) menjelaskan bahwa mekanisme *back flashover* sangat dipengaruhi oleh nilai tahanan pentanahan dan impedansi *surge* menara [30].

Paparan suhu ekstrem, kelembapan tinggi, dan tingkat polusi permukaan dapat menurunkan tegangan tembus (*flash-over voltage*) isolator secara signifikan. Peningkatan suhu dari 15 °C menjadi 35 °C meningkatkan probabilitas kegagalan isolator hingga 95%, sedangkan perubahan sudut kemiringan dari 90° menjadi 30° memperpendek jarak

loncatan listrik dan memperkuat intensitas medan listrik lokal. Kondisi tersebut memperbesar risiko terjadinya trip sistem transmisi, yang mengakibatkan pemadaman tak terencana pada jaringan 150 kV [30].

Hasil penelitian lanjutan oleh Salem et al. (2023) mengonfirmasi bahwa distribusi kontaminasi yang tidak merata pada permukaan isolator menghasilkan jalur konduktif yang mempercepat terjadinya flashover. Polusi seperti garam laut, debu industri, dan partikel logam menyebabkan peningkatan arus bocor dan pelepasan sebagian (*partial discharge*), yang dapat berlanjut menjadi kegagalan dielektrik total dan pemadaman jaringan. Untuk meminimalkan risiko tersebut, Salem et al. (2023) [31] merekomendasikan pemantauan berbasis arus bocor (*leakage current monitoring*) guna mendeteksi dini degradasi isolator dan mendukung strategi pemeliharaan prediktif.

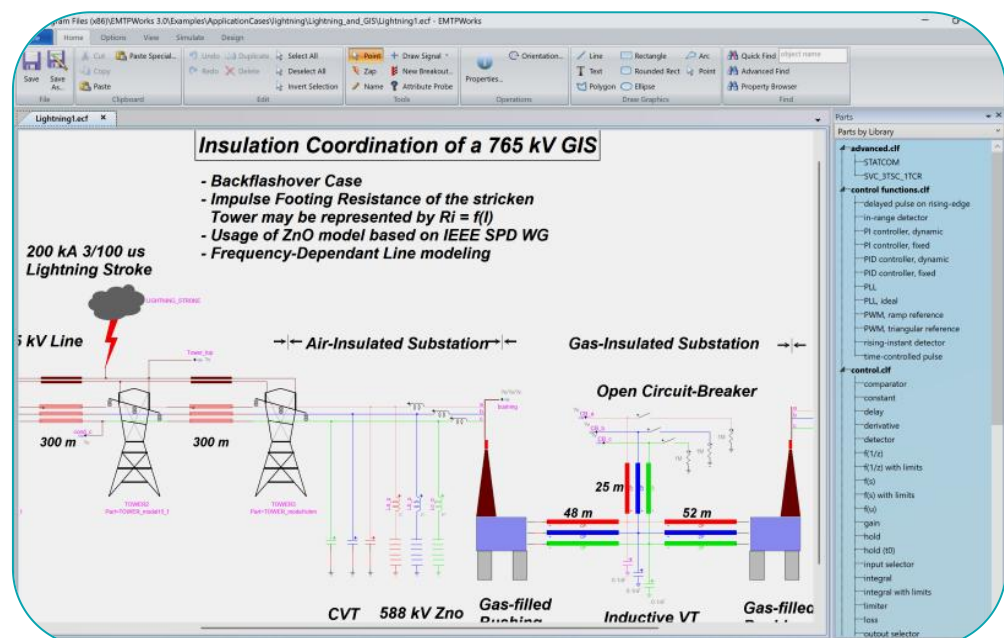
2.1.3 Electromagnetic Transients Program (EMTP)

Electromagnetic Transients Program (EMTP) adalah perangkat lunak simulasi domain waktu (*time-domain simulation*) yang dirancang secara khusus untuk menganalisis fenomena transien elektromagnetik yang sangat cepat pada sistem tenaga listrik dan rangkaian listrik yang kompleks. Fenomena transien ini biasanya terjadi dalam rentang waktu mikrodetik hingga milidetik, seperti yang diakibatkan oleh sambaran petir, operasi pensaklaran (*switching*), atau gangguan mendadak lainnya. EMTP memiliki peran krusial dalam rekayasa sistem tenaga, karena analisis transien tidak dapat dilakukan secara memadai menggunakan analisis aliran daya (*power flow*) atau stabilitas, yang umumnya beroperasi di domain steady-state (keadaan tunak) [32].

Selain digunakan untuk menganalisis fenomena transien, *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) juga berperan penting dalam pemodelan keandalan sistem transmisi dan distribusi karena mampu mensimulasikan efek dari gangguan sesaat seperti *Unbalance dielektrik*, sambaran petir, dan *switching surge* yang berpotensi memengaruhi nilai

indeks keandalan sistem. Dengan memanfaatkan model sistem yang akurat, EMTP dapat meniru perilaku sistem nyata untuk menganalisis efek arus lebih, tegangan lebih, serta waktu pemulihan setelah gangguan. Pendekatan ini telah digunakan dalam berbagai penelitian modern untuk mengkaji hubungan antara fenomena transien dan indikator keandalan sistem tenaga listrik, sehingga hasil simulasi dapat digunakan untuk meningkatkan strategi proteksi, penjadwalan pemeliharaan, serta efisiensi energi pada jaringan transmisi 150 kV.

Pemodelan komputer dari saluran transmisi dan gardu induk membantu Engineer memahami bagaimana sistem proteksi berperilaku selama gangguan. Setiap gangguan transien, seperti sambaran petir yang mengenai penghantar line, dapat dianalisis dengan menggunakan gelombang berjalan. Sambaran petir ke penghantar atau penutupan CB menghasilkan gelombang berjalan tegangan $u(t)$ dan arus $i(t)$ yang berhubungan dengan impedansi *Surja Z* yang dinyatakan dengan rumus tertentu dan bergerak sepanjang penghantar dengan kecepatan cahaya c .



Gambar 2.5 Simulasi EMTP [32].

2.1.4 Basic Insulation Level (BIL) pada Sistem Transmisi

Basic Insulation Level (BIL) merupakan nilai tegangan impuls petir standar yang digunakan sebagai acuan kemampuan isolasi suatu peralatan atau sistem tenaga listrik dalam menahan tegangan lebih akibat sambaran petir. BIL dinyatakan dalam bentuk tegangan puncak (kV) dengan gelombang impuls standar 1,2/50 μ s, yang merepresentasikan karakteristik gelombang petir alamiah.

Dalam praktik koordinasi isolasi, nilai BIL digunakan untuk memastikan bahwa peralatan dan sistem isolasi memiliki tingkat ketahanan yang memadai terhadap tegangan impuls petir, sehingga dapat mencegah terjadinya kegagalan isolasi atau *flash over* yang berpotensi menyebabkan gangguan pada sistem transmisi. Oleh karena itu, BIL menjadi parameter penting dalam perancangan dan evaluasi sistem isolasi pada jaringan transmisi tenaga listrik.

1. Standar BIL Menurut IEC 60076

Berdasarkan IEC 60076 (*Power Transformers*), *Basic Insulation Level (BIL)* digunakan sebagai bagian dari koordinasi isolasi untuk menentukan tingkat ketahanan isolasi peralatan tenaga listrik terhadap tegangan impuls petir. Dalam standar ini, BIL didefinisikan sebagai *Lightning Impulse Withstand Voltage*, yaitu tegangan impuls maksimum yang dapat ditahan oleh sistem isolasi tanpa mengalami tembus listrik (*breakdown*).

Pengujian BIL menurut IEC dilakukan menggunakan gelombang impuls standar 1,2/50 μ s dengan nilai puncak tertentu sesuai tingkat tegangan nominal sistem. Untuk sistem transmisi 150 kV, IEC menetapkan nilai BIL nominal yang digunakan sebagai acuan dalam perancangan, pengujian, dan evaluasi kinerja isolasi peralatan sistem tenaga listrik.

Tabel 2.1 Nilai Standar BIL menurut IEC 60076

Tegangan Nominal Sistem (kV)	BIL / <i>Lightning Impulse Withstand</i> <i>Voltage (kV)</i>
72,5 kV	325 kV
123 kV	550 kV
145 / 150 kV	650 kV
245 kV	1050 kV
420 kV	1425 kV

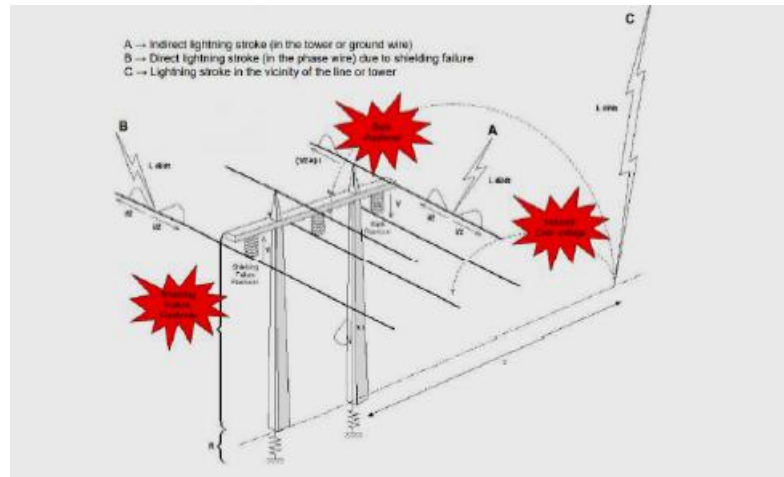
2. Konsep BIL Menurut CIGRE

Berbeda dengan IEC yang menetapkan nilai BIL secara numerik, CIGRE tidak secara langsung mendefinisikan BIL dalam bentuk nilai standar tertentu. Dalam berbagai dokumen teknis CIGRE, kekuatan isolasi saluran transmisi terhadap tegangan petir direpresentasikan melalui parameter tegangan *flashover*, yaitu:

a. U_{50rp} (50% Flashover)

Tegangan *flashover* 50% *rod-plane* (U_{50rp}) merupakan nilai tegangan impuls yang menyebabkan terjadinya flashover pada celah udara model batang–bidang (*rod-plane*) dengan probabilitas 50%. *Back flashover* adalah salah satu jenis gangguan yang terjadi ketika terjadinya loncatan listrik pada sistem transmisi, yang disebabkan oleh tegangan lebih (*overvoltage*) pada saluran transmisi. Fenomena ini terjadi akibat sambaran petir langsung ke struktur tower atau kabel tanah [33]. Struktur tower akan membaca arus puncak dan kecuraman arus petir yang akan membangkitkan tegangan pada struktur. Apabila nilai tegangan yang dibangkitkan melebihi nilai BIL isolator, maka arus petir dengan amplitudo tinggi dan kecuraman sangat tinggi akan dilepaskan ke kawat line [34]. Proses backflashover dimulai pada saat petir menyambar tower, arus petir akan mengalir melalui struktur

menuju bumi, pada saat melewati struktur arus petir akan membaca nilai induktansi (L) dan resistansi (R) tower yang akan membangkitkan elevasi tegangan. Apabila nilai elevasi tegangan yang dibangkitkan melebihi nilai BIL isolator maka akan menyebabkan lompatan arus dari struktur menuju kawat line atau *backflashover* [5].



Gambar 2.6 Sambaran Petir Pada Saluran Transmisi [5].

Model *rod-plane* digunakan sebagai pendekatan dasar dalam analisis kekuatan isolasi udara karena bentuknya sederhana dan hasil pengujiannya telah distandarkan secara internasional. Untuk impuls petir polaritas negatif, yang paling dominan terjadi pada sistem transmisi tenaga listrik, nilai U_{50rp} dapat dihitung menggunakan persamaan empiris: [35].

$$U_{50rp} = 950 \cdot d^{0,8}$$

Dimana:

1. U_{50rp} = Tegangan *flashover* 50% *rod-plane* (kV)
2. d = Panjang celah udara ekuivalen (meter)
3. 950 dan 0,8 = Konstanta empiris hasil pengujian laboratorium pada kondisi atmosfer standar

b. *Critical Flashover Voltage/CFO (U_{50})*

CIGRE menyatakan bahwa dalam studi kinerja petir saluran transmisi, kekuatan isolasi lebih tepat dianalisis menggunakan pendekatan probabilistik, di mana isolasi didefinisikan berdasarkan tegangan yang menyebabkan *flashover* dengan probabilitas sebesar 50%, bukan berdasarkan nilai *withstand* mutlak sebagaimana pada koordinasi isolasi konvensional.

Pendekatan ini mempertimbangkan variasi statistik karakteristik petir dan perilaku *flashover* isolasi di lapangan, sehingga lebih representatif untuk menganalisis kejadian gangguan akibat petir pada saluran transmisi, khususnya pada daerah dengan tingkat isokeraunik tinggi.

Nilai CFO pada isolator saluran transmisi diperoleh dari hasil koreksi terhadap nilai U_{50rp} , karena konfigurasi isolator nyata tidak berbentuk rod-plane ideal, melainkan berupa rangkaian keping isolator (string insulator) dengan distribusi medan listrik yang berbeda. Hubungan antara U_{50} dan U_{50rp} dinyatakan sebagai berikut [35].

$$U_{50} = U_{50rp} \cdot 0,776$$

Dimana:

U_{50} = *Critical flash over (CFO)*

U_{50rp} = Polaritas negatif

0,776 = Nilai konstanta untuk koreksi celah *rod-plane*

3. Keterkaitan Konsep BIL dengan *Unbalance Dielektrik*

Dalam penerapan metode *Unbalance dielektrik*, nilai BIL nominal sistem sebagaimana ditetapkan oleh IEC tetap dipertahankan, namun secara praktis terjadi perbedaan kekuatan isolasi efektif antar sirkit akibat perbedaan jumlah keping isolator. Perbedaan ini menyebabkan nilai CFO atau U_{50} antar sirkit menjadi tidak sama.

Berdasarkan pendekatan CIGRE, kondisi tersebut dimanfaatkan untuk mengendalikan perilaku *flashover* akibat sambaran petir, sehingga *flashover* diharapkan terjadi terlebih dahulu pada sirkit dengan nilai CFO lebih rendah. Dengan demikian, penerapan *Unbalance dielektrik* bertujuan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya gangguan dua sirkit secara bersamaan (*double circuit trip*) dan meningkatkan keandalan sistem transmisi.

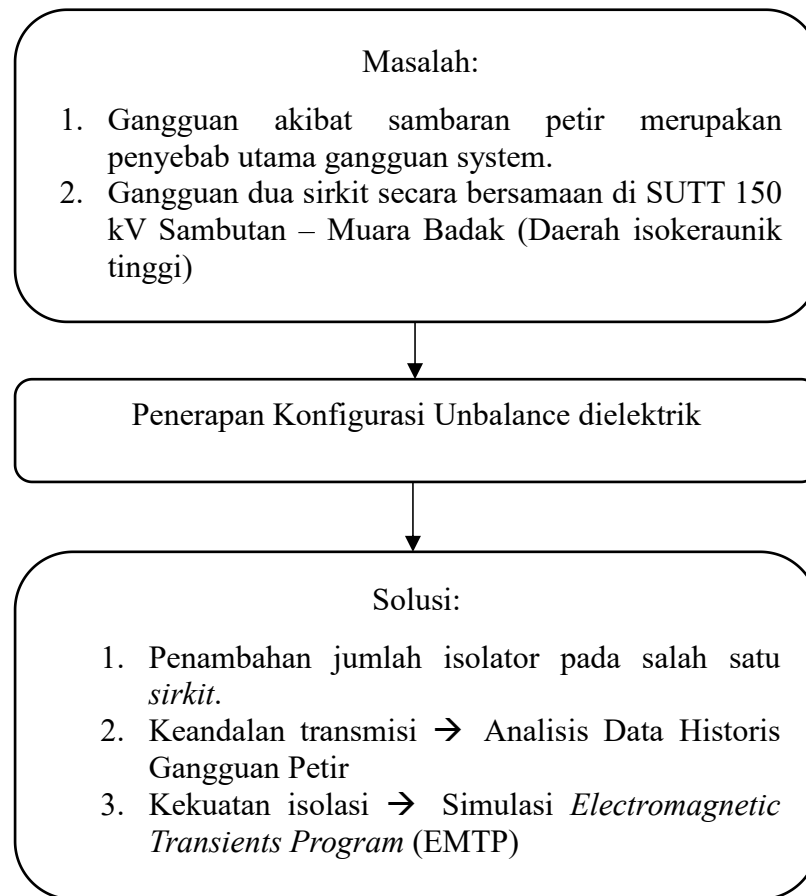
2.2 Penelitian yang Relevan

Tabel 2.2 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	<i>Analisis Shielding Failure pada SUTT 150 kV Gandul-Serpong Menggunakan Metode Elektrogeometri [6]</i>	Tingginya gangguan petir pada SUTT 150 kV akibat kegagalan perlindungan kawat tanah (shielding failure) yang menyebabkan <i>flashover</i> isolator dan gangguan sistem transmisi	Analisis shielding failure menggunakan metode elektrogeometri dengan pendekatan perhitungan probabilistik sambaran petir	Ditemukan bahwa kegagalan shielding kawat tanah meningkatkan potensi <i>flashover</i> isolator dan gangguan pada sistem transmisi 150 kV	Penelitian belum membahas penerapan metode <i>Unbalance dielektrik</i> sebagai strategi untuk meningkatkan selektivitas gangguan dan keandalan sistem transmisi
2.	<i>Analisis Statistik Gangguan Akibat Sambaran Petir pada Saluran Transmisi 150 kV [7]</i>	Tingginya frekuensi gangguan saluran transmisi 150 kV akibat sambaran petir berdasarkan data historis	Analisis statistik data gangguan petir pada jaringan transmisi 150 kV selama beberapa tahun	Sambaran petir menjadi penyebab dominan gangguan saluran transmisi dan berkontribusi terhadap penurunan keandalan sistem	Penelitian bersifat statistik dan belum mengevaluasi solusi teknis seperti metode <i>Unbalance dielektrik</i>

3.	<i>Insulation Evaluasi Nilai Setting Rele Jarak sebagai Proteksi Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV [27]</i>	Ketidaktepatan pengaturan proteksi rele jarak yang dapat menurunkan keandalan sistem transmisi 150 kV saat terjadi gangguan	Evaluasi setting rele jarak berdasarkan data sistem dan analisis koordinasi proteksi	Hasil menunjukkan bahwa penyesuaian setting rele jarak meningkatkan selektivitas dan keandalan proteksi saluran transmisi	Penelitian tidak mengkaji pengaruh konfigurasi isolator maupun metode Unbalance dielektrik terhadap gangguan petir
4.	<i>Analisis Koordinasi Isolasi di Gardu Induk Kuta Terhadap Tegangan Lebih Akibat Sambaran Petir Pada Saluran Transmisi 150 KV [9]</i>	Tegangan lebih akibat sambaran petir pada saluran transmisi 150 kV yang berpotensi merusak peralatan di gardu induk akibat koordinasi isolasi yang kurang optimal	Tegangan lebih akibat sambaran petir pada saluran transmisi 150 kV yang berpotensi merusak peralatan di gardu induk akibat koordinasi isolasi yang kurang optimal	Tegangan lebih akibat sambaran petir pada saluran transmisi 150 kV yang berpotensi merusak peralatan di gardu induk akibat koordinasi isolasi yang kurang optimal	Tegangan lebih akibat sambaran petir pada saluran transmisi 150 kV yang berpotensi merusak peralatan di gardu induk akibat koordinasi isolasi yang kurang optimal
5.	<i>Analisis Jumlah Gangguan Petir Akibat Back flashover Dengan Metode Hilemen Pada SUTT 150 kV Gardu Induk Payakumbuh-Koto Panjang [5]</i>	Tingginya jumlah gangguan petir pada SUTT 150 kV akibat terjadinya back flashover pada isolator saluran transmisi	Analisis gangguan petir menggunakan metode Hilemen untuk menghitung frekuensi back flashover pada saluran transmisi	Hasil analisis menunjukkan bahwa back flashover menjadi penyebab utama gangguan petir pada SUTT 150 kV dengan karakteristik tertentu	Penelitian berfokus pada perhitungan jumlah gangguan, belum mengevaluasi strategi mitigasi gangguan seperti penerapan metode Unbalance dielektrik

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.7 Kerangka Pemikiran

Gangguan dua sirkit secara bersamaan di SUTT 150 kV Sambutan – Muara Badak (Daerah isokeraunik tinggi), menyebabkan potensi padam meluas dan kehilangan energi yang signifikan (kasus Kasongan – SKS). Koordinasi isolasi merupakan upaya untuk mengatur tingkat ketahanan isolasi peralatan terhadap tegangan lebih akibat gangguan petir. Salah satu pendekatan dalam koordinasi isolasi adalah penerapan metode Unbalance dielektrik, yaitu strategi rekayasa dengan membuat jumlah keping isolator antar sirkit tidak seimbang untuk menciptakan perbedaan tingkat kekuatan isolasi. Pendekatan ini bertujuan agar gangguan petir hanya mempengaruhi satu sirkit sehingga keandalan sistem transmisi dapat ditingkatkan.

Oleh karena itu, diperlukan penerapan Penerapan Konfigurasi *Unbalance dielektrik* pada SUTT 150 kV Sambutan – Muara Badak dengan jumlah keping isolator dibuat tidak seimbang sirkit 1: 11 keping dan sirkit 2: 13 keping. Konfigurasi ini dapat

meningkatkan margin tegangan tembus (*flashover voltage*) dan membuat tingkat isolasi kedua sirkit berbeda. Penelitian ini diharapkan meningkatkan keandalan sistem transmisi tenaga listrik, khususnya untuk SUTT yang melintasi wilayah dengan tingkat isokeraunik tinggi di Kalimantan dengan menganalisis data historis gangguan akibat petir dan simulasi EMTP untuk mengevaluasi kekuatan isolasi (*flashover strength*) dan pengaruh langsung konfigurasi unbalance terhadap tegangan tembus.

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas solusi tersebut melalui dua jalur analisis yang saling melengkapi: (1) Simulasi EMTP untuk membuktikan mekanisme teknis selektivitas gangguan secara kuantitatif, dan (2) Analisis data historis 2021–2025 untuk mengkonfirmasi dampak nyata di lapangan. Kedua jalur analisis ini kemudian disintesis untuk menghasilkan kesimpulan tentang efektivitas metode *Unbalance dielektrik* dan rekomendasinya bagi sistem transmisi dengan karakteristik serupa.