

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka Relevan

Bagian ini menyajikan ringkasan singkat dari berbagai penelitian sebelumnya yang memiliki keterkaitan dengan topik penelitian ini. Penelitian menggunakan temuan-temuan dari studi terdahulu tersebut untuk mendukung tujuan dan maksud penelitian yang sedang dijalankan. Beberapa hasil penelitian terdahulu yang dijadikan acuan yakni:

1. Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh **Ibnu Hajar dan Eko Rahman** dalam jurnal Kajian Pemasangan *Lightning Arrester* pada sisi HV Transformator Daya Unit Satu Gardu Induk Teluk Betung, metode yang digunakan Adalah pendekatan kuantitatif dengan perhitungan tegangan *arrester*, arus pelepasan, tegangan sisa, serta analisis jarak optimal antara *arrester* dan transformator. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kesesuaian spesifikasi dan jarak penempatan *lightning arrester* terhadap transformator daya 60 mVA di Gardu Induk Teluk Betung berdasarkan standar SPLN dan IEC 60099-4. Dari hasil penelitian, diketahui bahwa *arrester* tipe ASEA XAR 170A3/144 dengan tegangan nominal 144 kV mampu menahan arus petir hingga 10 kA, dan jarak penempatan 3 meter dari transformator sudah termasuk jarak optimal karena menghasilkan tegangan sisa sebesar 460 kV, masih jauh di bawah nilai *Basic Insulation Level* (BIL) transformator sebesar 650 kV. Peneliti menyimpulkan bahwa penempatan *arrester* yang tepat sangat menentukan efektivitas sistem proteksi terhadap lonjakan tegangan akibat sambaran petir, serta menekankan pentingnya mempertahankan nilai tegangan sisa di bawah batas isolasi transformator agar tidak terjadi kerusakan isolasi. [1]
2. Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh **Yuliana dan Prasetyo** dalam Jurnal Keteknikan Energi dan Kelistrikan PLN, peneliti membandingkan kinerja beberapa tipe *arrester* berdasarkan karakteristik *sparkover voltage*-nya. Penelitian ini menggaris bawahi pentingnya pemilihan *arrester* dengan tegangan percik yang seimbang terhadap tegangan tembus isolasi transformator. Peneliti melakukan uji simulasi koordinasi isolasi untuk membandingkan tingkat

perlindungan antara *arrester* ZnO kelas stasioner dan *arrester* tipe MOV modern. Hasilnya menunjukkan bahwa *arrester* dengan nilai sparkover voltage yang rendah memiliki kemampuan lebih baik dalam menyalurkan energi petir ke tanah sebelum mencapai transformator. *Arrester* ZnO dengan *sparkover voltage* 650 kV menunjukkan performa proteksi 20% lebih baik dibanding *arrester* tipe MOV dengan *sparkover* 720 kV, Tegangan sisa transformator turun dari 310 kV menjadi 240 kV jika menggunakan *arrester* dengan tegangan percik lebih rendah. *Arrester* dengan karakteristik non-linear tinggi ($\alpha > 30$) lebih responsif terhadap gelombang petir pendek ($< 5 \mu s$). Pemilihan *arrester* dengan tegangan percik yang tepat akan menurunkan risiko kerusakan isolasi transformator, tetapi hasilnya sangat tergantung pada lingkungan dan system pentanahan. [2]

3. Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh **Simanjuntak** dalam jurnal Rekayasa Energi Listrik mengenai efektivitas *arrester* terhadap variasi sudut sambaran petir pada GI tegangan tinggi di Sumatera Utara, peneliti mengamati pengaruh sudut sambaran petir terhadap besar tegangan yang diterima peralatan. Melalui simulasi berbasis MATLAB, ia menemukan bahwa semakin besar sudut sambaran, semakin besar energi induksi yang masuk ke system, terutama bila *arrester* dipasang terlalu jauh dari peralatan. Selain itu, Peneliti menyoroti bahwa kelembapan udara dan resistansi tanah berperan penting terhadap waktu hantaran gelombang arus petir. Dari serangkaian percobaan didapati hasil penelitian sebagai berikut, sambaran petir dengan sudut datang 30° menghasilkan puncak tegangan 420 kV, sedangkan sudut 60° naik hingga 490 kV, *arrester* yang ditempatkan pada jarak 7–9 meter dari trafo mampu menurunkan tegangan sisa hingga 230 kV, ketika *arrester* dipasang di atas 12 meter tegangan sisa naik hampir dua kali lipat dan faktor resistansi tanah dan kelembapan juga memperpanjang waktu rambat arus petir sebesar 10–15%. Penting juga ditambahkan bahwa lingkungan tropis sangat mempengaruhi bentuk gelombang dan respon *arrester* terhadap surja petir. [3]
4. Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh **Lumenta** dalam jurnal Analisis Koordinasi Isolasi Sistem 150 kV pada Gardu Induk Bitung, mengintegrasikan aspek resistansi tanah terhadap kinerja *arrester*. Dengan menggunakan software

PSCAD, peneliti mensimulasikan seberapa besar pengaruh resistansi pembumian terhadap tegangan sisa (*residual voltage*) pada terminal transformator. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa jika tahanan pentanahan kurang dari 5 ohm, maka energi lonjakan petir dapat diredam dengan lebih baik dan tegangan sisa turun hingga 30%. peneliti juga menyoroti pentingnya posisi *arrester* yang dekat dengan peralatan utama agar waktu rambat gelombang lebih pendek. Hasil penelitian ini adalah ketika resistansi pentanahan <5 ohm, energi petir yang terlepas ke tanah mencapai 95%, sedangkan pada resistansi 10 ohm hanya 70%, tegangan sisa yang diterima transformator turun dari 300 kV menjadi 210 kV ketika sistem grounding diperbaiki, dan *arrester* yang ditempatkan sejajar dengan terminal trafo menunjukkan waktu tanggap (*response time*) lebih cepat 2–3 μ s dibanding yang ditempatkan menyudut. [4]

5. Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh **Wahyudi** dalam Tugas Akhir yang berjudul Analisis tegangan Percik *Lightning Arrester* pada Sistem 150 kV di GI Banyuwangi dengan tujuan menilai kesesuaian karakteristik *arrester* terhadap koordinasi isolasi transformator. peneliti menggunakan data hasil *Factory Acceptance Test (FAT)* dari pabrikan *arrester* untuk menghitung tegangan percik dan membandingkannya dengan nilai nominal sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, tegangan percik aktual dari hasil FAT adalah 475 kV, sedikit lebih rendah dari nilai nominal pabrikan (490 kV), perbedaan 3% tersebut masih dalam batas toleransi standar IEC 60099-4, *arrester* bekerja efektif selama *performance test* dengan tegangan sisa di terminal trafo tercatat 230 kV, jauh di bawah batas tembus 650 kV dan juga faktor kelembapan udara meningkatkan risiko kebocoran arus permukaan (*surface leakage current*). [5]
6. Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh **Rahman** dalam Tugas Akhir yang berjudul Analisis Sistem Proteksi Petir pada Gardu Induk 150 kV di Sulawesi. Dalam penelitiannya, peneliti menelusuri konfigurasi sistem proteksi petir yang diterapkan pada gardu induk 150 kV menggunakan metode perhitungan sederhana berdasarkan SPLN 60:1985. Fokus utama penelitian adalah bagaimana posisi penempatan *lightning arrester* berpengaruh terhadap kemampuan proteksi terhadap transformator dan peralatan lainnya. Rahman menemukan bahwa

arrester yang ditempatkan terlalu jauh dari terminal transformator menyebabkan tegangan lebih akibat sambaran petir tetap mencapai belitan transformator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, ditemukan penempatan *lightning arrester* dengan jarak lebih dari 15 meter dari terminal transformator menyebabkan tegangan lebih mencapai 400 kV, yang masih bisa menembus isolasi trafo, ketika jarak *arrester* dikurangi menjadi kurang dari 10 meter tegangan lebih turun menjadi di bawah 250 kV atau sekitar 60% lebih kecil dari batas tembus transformator, peneliti juga menunjukkan bahwa posisi *arrester* yang sejajar dengan kabel masuk trafo menghasilkan perlindungan terbaik karena mengurangi efek pantulan gelombang (*reflected surge*). [6]

Tabel 2.1 Kajian Pustaka Relevan

No	Peneliti / Tahun	Fokus Penelitian	Metode	Hasil Utama	Gap Penelitian
1	Ibnu Hajar & Eko Rahman	Penempatan LA pada sisi HV trafo GI Teluk Betung	Perhitungan tegangan arrester, arus pelepasan, tegangan sisa	Arrester 144 kV mampu menahan arus 10 kA, jarak 3 m menghasilkan tegangan sisa 460 kV (< BIL 650 kV)	Belum menganalisis fenomena pantulan gelombang dan kenaikan tegangan akibat jarak
2	Yuliana & Prasetyo	Perbandingan karakteristik sparkover arrester	Simulasi koordinasi isolasi	Arrester dengan sparkover rendah memberi proteksi $\pm 20\%$ lebih baik	Tidak mengkaji pengaruh jarak arrester terhadap trafo
3	Simanjuntak	Pengaruh sudut sambaran petir	Simulasi MATLAB	Sudut sambaran besar meningkatkan tegangan; jarak arrester >12 m menyebabkan tegangan sisa meningkat	Tidak membahas koordinasi isolasi spesifik GI 150 kV

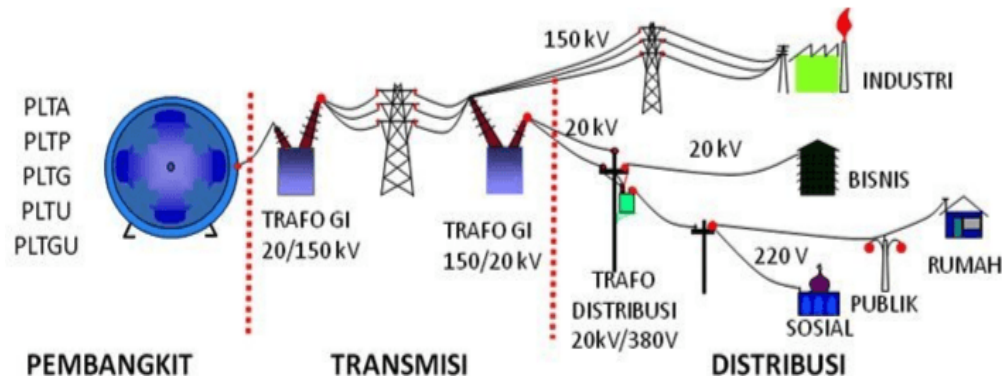
No	Peneliti / Tahun	Fokus Penelitian	Metode	Hasil Utama	Gap Penelitian
4	Lumenta	Pengaruh resistansi tanah terhadap kinerja arrester	Simulasi PSCAD	Grounding $<5 \Omega$ menurunkan residual voltage hingga 30%	Tidak menganalisis penguatan tegangan akibat refleksi
5	Wahyudi	Tegangan percik arrester GI Banyuwangi	Analisis data FAT	Tegangan percik aktual 475 kV, trafo aman (<650 kV)	Tidak mengevaluasi efek jarak arrester
6	Rahman	Sistem proteksi petir GI 150 kV Sulawesi	Perhitungan SPLN	Jarak arrester <10 m menurunkan tegangan lebih hingga 60%	Tidak menggunakan analisis gelombang berjalan
7	Jessika Zacharias	Penentuan jarak optimal <i>lightning arrester</i> terhadap transformator pada GI 150 kV Sirimau Ambon	Studi literatur, pengumpulan data lapangan, dan analisis metode pantulan berulang (<i>travelling wave</i>)	Penelitian skripsi ini akan dibahas di BAB IV	Mengintegrasikan analisis gelombang berjalan berbasis data aktual gardu induk serta evaluasi terhadap standar IEC 60099-4 dan SPLN 7:1978

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik adalah jaringan terpadu yang mengintegrasikan

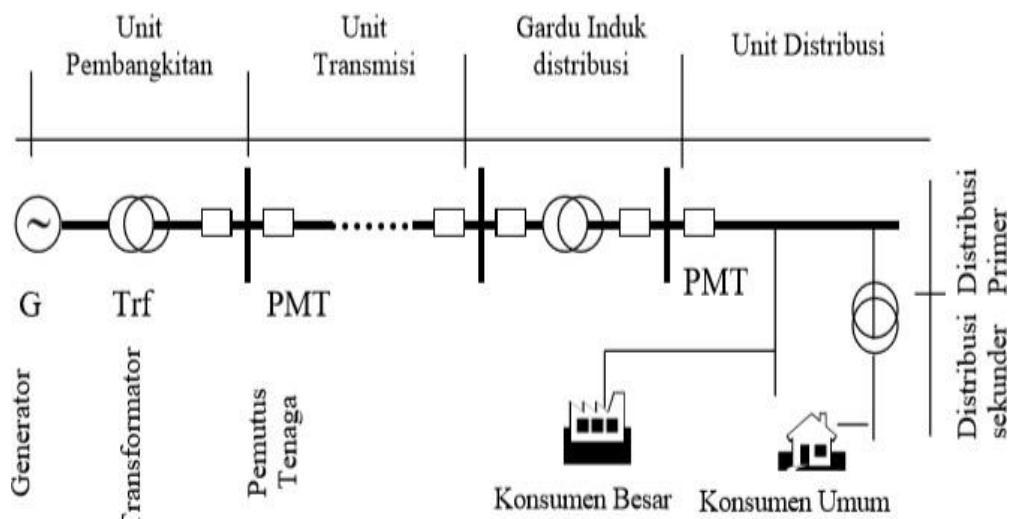
pembangkitan, transformasi, transmisi, distribusi, dan beban dalam satu kesatuan penyaluran energi listrik seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.1**



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sumber : PT.PLN (Persero). Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Perbedaan lokasi pusat pembangkit dan pelanggan yang tersebar luas mendorong penyaluran listrik dengan penanganan teknis yang sistematis seperti dalam blok diagram sistem tenaga listrik pada **Gambar 2.2**:



Gambar 2.2 Blok Diagram Sistem Tenaga Listrik

Sumber : PT. PLN (Persero) Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Energi listrik dihasilkan di berbagai pembangkit (PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, PLTP, PLTD) dan tegangannya ditingkatkan transformator step-up sebelum disalurkan

melalui jaringan transmisi.

Penamaan unit pembangkit listrik di lingkungan PLN berdasarkan jenis energi penggerak awalnya, dimana PLTA digerakkan turbin air dan PLTU digerakkan turbin uap yang memutar generator.

Jaringan penyalur listrik dari pembangkit menuju gardu induk termasuk sistem transmisi menggunakan level tegangan tinggi. Dalam praktik PLN, transmisi dioperasikan pada 70 kV dan 150 kV dengan dominasi penggunaan 150 kV, sedangkan sistem 500 kV merupakan transmisi tegangan ekstra tinggi (SUTET).

PLN mengoperasikan sebagian jaringan transmisi 70 kV, meskipun pengembangannya tidak dilanjutkan. Sistem transmisi menggunakan saluran udara dan kabel tanah, namun saluran udara lebih dominan karena efisiensi biaya meski rentan terhadap gangguan eksternal. Daya listrik di gardu induk diturunkan melalui transformator *step-down* menjadi tegangan distribusi primer 6 kV, 12 kV dan 20 kV menjadi standar pengembangan.

Jaringan distribusi primer merupakan jaringan keluaran gardu induk yang beroperasi pada tegangan menengah (JTM) dan dapat berupa saluran kabel tanah (SKTM), kabel udara (SKUTM), maupun kawat terbuka (SUTM). Tegangan diturunkan melalui transformator distribusi menjadi tegangan rendah dengan standar 380/220 V, sementara standar 220/127 V tidak lagi digunakan. Energi listrik dalam level tersebut disalurkan melalui Jaringan Tegangan Rendah (JTR).

JTR sama dengan JTM yang turut menggunakan beberapa jenis saluran, yaitu SUTR berupa saluran udara dengan kawat terbuka, SKUTR adalah saluran udara menggunakan kabel berisolasi tipe *twisted insulation cable* (TIC), serta SKTR berupa saluran kabel tanah tegangan rendah.

Energi listrik dari Jaringan Tegangan Rendah kemudian disalurkan ke pelanggan melalui Sambungan Pelayanan atau Sambungan Rumah, yang terdiri atas Sambungan Luar Pelayanan dan Sambungan Masuk Pelayanan.

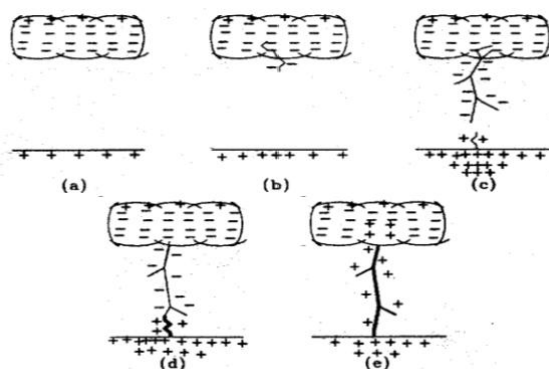
Pelanggan dalam operasional PLN dengan kapasitas daya besar tidak dilayani melalui JTR, tetapi dihubungkan langsung ke JTM. Adapun pelanggan dengan daya sangat besar disambungkan ke jaringan transmisi tegangan tinggi sesuai tingkat daya tersambungannya.

Diagram menunjukkan Pusat Listrik dan Gardu Induk dilengkapi transformator pemakaian sendiri untuk menyuplai kebutuhan internal, seperti penerangan, pengisian baterai, dan pengoperasian motor listrik.

2.2.2 Surja Petir

Petir adalah pelepasan muatan yang terjadi antara awan, dalam awan atau antara awan dengan tanah. Dimana dalam awan terdapat muatan positif dan muatan negatif, jika muatan ini bertemu maka akan terjadi tarik menarik yang dapat menimbulkan kilat diawan, begitu juga kalau muatan negatif dan muatan negatif dekat akan terjadi tolak menolak, juga akan terjadi ledakan / kilat. [1]

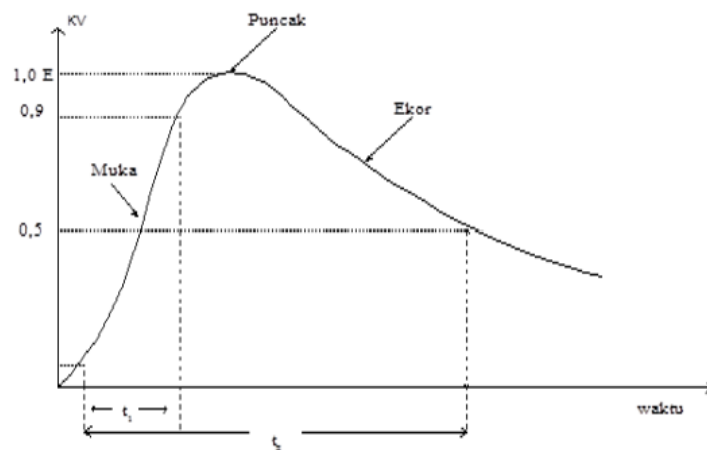
Bumi berperan sebagai tempat penetralan muatan, karena mengandung baik muatan positif maupun negatif. Ketika proses pelepasan muatan di awan terjadi cukup dekat dengan permukaan bumi, maka akan terbentuk jalur hantaran listrik dari awan menuju bumi yang dikenal sebagai sambaran petir. Apabila sambaran petir mengenai langsung suatu penghantar, maka besar kemungkinan penghantar tersebut mengalami kerusakan atau putus karena gelombang tegangan impuls dari petir dapat melampaui **Basic Insulation Level (BIL)** dari penghantar tersebut. Sebaliknya, jika sambaran petir tidak mengenai langsung tetapi menimbulkan induksi elektromagnetik di sekitar jaringan, maka gelombang petir tersebut akan menjalar sepanjang konduktor menuju titik dengan potensial yang dapat menetralkan arus petir, yaitu sistem pentanahan (*grounding system*). Pada **Gambar 2.3** menunjukkan bagaimana proses terjadinya petir.



Gambar 2.3 Proses Terjadinya Petir

Gambar 2.4 menunjukkan bentuk gelombang surja petir standar, yang secara umum digunakan untuk menggambarkan karakteristik tegangan impuls akibat sambaran petir. [7]

Parameter t_1 merepresentasikan *waktu muka gelombang (front time)*, yaitu waktu yang dibutuhkan tegangan impuls untuk naik dari nol hingga mencapai nilai puncak (biasanya 90% dari amplitudo maksimumnya) sedangkan t_2 menunjukkan *waktu ekor gelombang (tail time)*, yaitu waktu yang dibutuhkan tegangan impuls untuk turun dari puncaknya hingga mencapai 50% dari nilai maksimum. Gelombang standar yang digunakan dalam pengujian sistem proteksi biasanya memiliki bentuk 1,2/50 μs , yang berarti waktu muka gelombang sebesar 1,2 μs dan waktu ekor sebesar 50 μs .

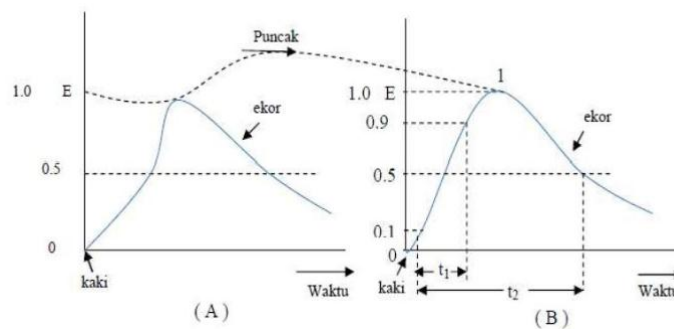


Gambar 2.4 Bentuk Standar Gelombang Surja Petir

Spesifikasi dari suatu **gelombang berjalan (traveling wave)** pada sistem tenaga listrik mencakup beberapa parameter penting yaitu:

1. Puncak gelombang (crest), E (kV), merupakan nilai amplitude maksimum dari tegangan impuls yang terjadi pada gelombang tersebut.
2. Waktu muka gelombang (t_1), merupakan interval waktu dari permulaan gelombang hingga mencapai puncaknya. Dalam praktik pengukuran, waktu muka umumnya dihitung sejak tegangan mencapai 10% hingga 90% dari nilai puncak (E), sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.

3. Ekor gelombang (t_2), merupakan bagian setelah puncak gelombang. Panjang ekor diukur dari awal gelombang hingga titik di mana tegangan turun menjadi 50% dari nilai puncak (E).
4. Polaritas, merupakan arah atau tanda dari gelombang tegangan yang dapat berupa positif atau negatif, tergantung pada arah aliran muatan listrik yang menyebabkan timbulnya gelombang tersebut



Gambar 2.5 Spesifikasi Gelombang Berjalan

Gelombang berjalan (surja) adalah ($E, t_1/t_2$)

Keterangan,

E : Tegangan Puncak

t_1/t_2 : Rasio muka gelombang terhadap ekor gelombang surja

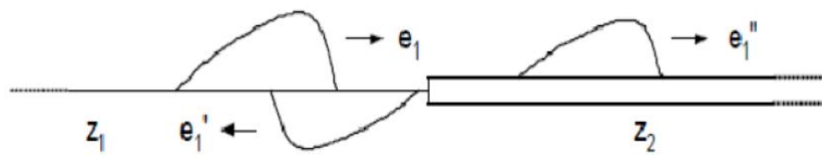
gelombang berjalan dirumuskan secara matematis berikut:

$$E(t) = E(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (2.1)$$

Gelombang surja yang mengenai diskontinuitas impedansi akan terpantul dan diteruskan, serta berpotensi melipatgandakan tegangan dan arus lokal. [10]

Adapun sub bagian gelombang berjalan sebagaimana yang ditunjukkan di **Gambar 2.6**, yaitu:

1. Gelombang datang (*incident wave*)
2. Gelombang pantulan (*reflected wave*)
3. Gelombang terusan (*transmitted wave*)



Gambar 2.6 Perubahan Impedansi pada Titik Peralihan

2.2.3 Gardu Induk

Gardu Induk adalah suatu instalasi yang terdiri dari peralatan listrik (Repositori.kemdikbud.go.id/GARDUINDUK-XI-3, 2013) yang berfungsi untuk:

1. Menyesuaikan level tegangan sistem tegangan tinggi atau menengah.
2. Melaksanakan pemantauan, kendali, pengukuran, dan proteksi sistem tenaga listrik.
3. Mendistribusikan daya ke gardu induk lain dan gardu distribusi melalui jaringan tegangan tinggi dan menengah.



Gambar 2.7 Gardu Induk 150 kV Sirimau

Seperti pada **Gambar 2.7**, peralatan dan fasilitas pada suatu gardu induk pada umumnya terdiri atas:

1. Instalasi transformator tenaga dan peralatan penyaluran tenaga listrik yang terdiri dari:

- a. Trafo tenaga
 - b. Perangkat keras tegangan tinggi pada sisi primer, yang mencakup penangkal petir, batang percikan api, pemutus sirkuit tegangan tinggi (PMT), pemutus sirkuit daya (PMS), transformator arus (CT), dan transformator potensial (PT).
 - c. Peralatan tegangan menengah (sisi sekunder)
 - d. Jenis peralatan pada sisi tegangan menengah umumnya sama dengan peralatan pada sisi tegangan tinggi
 - e. Peralatan kontrol
 - f. Digunakan untuk menjalankan manajemen dan pengawasan fungsional operasi gardu induk dari ruang kendali yang melingkupi gugus panel kontrol, gugus panel relai, alat ukur kuantitatif, perangkat telekomunikasi (telepon, Power Line Carrier, dan radio transmitter), akumulator, serta penyearah arus.
 - g. Peralatan tambahan lainnya seperti petersen coil, reaktor, kapasitor statis, resistor dan peralatan pendukung lainnya yang berfungsi untuk memperbaiki kualitas dan stabilitas sistem penyaluran tenaga listrik
2. Fasilitas gardu induk, yang terdiri atas:
 - a. Gedung kontrol
 - b. Ruangan baterai
 - c. Bangunan-bangunan pendukung lainnya

2.2.4 *Lightning Arrester*

Lightning Arrester merepresentasikan sebuah perangkat protektif yang dirancang untuk melindungi komponen dalam sistem tenaga listrik dari lonjakan tegangan berlebih, yang dapat timbul akibat sambaran petir atau gangguan operasional sistem. Perangkat ini bekerja dengan menciptakan jalur pintas di sekeliling isolasi, menyediakan rute dengan resistansi rendah bagi arus petir, sehingga mencegah terjadinya tegangan berlebih pada peralatan. Jalur proteksi ini harus dirancang agar tidak menginterferensi operasi normal sistem pada frekuensi 50 Hertz. Dalam kondisi operasi normal, *Lightning Arrester* berfungsi layaknya isolator; namun, ketika terpapar oleh sambaran petir, ia bertransformasi menjadi konduktor dengan resistansi yang sangat rendah, memfasilitasi disipasi arus lonjakan ke tanah. Pasca hilangnya fenomena lonjakan, sangat krusial bagi

penangkal petir untuk segera kembali mengadopsi fungsi isolatornya, dengan tujuan mencegah pemutus daya (PMT) untuk membuka sirkuit secara tidak tepat. [11]

1. Komponen – Komponen *Lightning Arrester* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.8:**

Beberapa bagian penting dari sebuah *arrester* yaitu:

- a. Elektroda

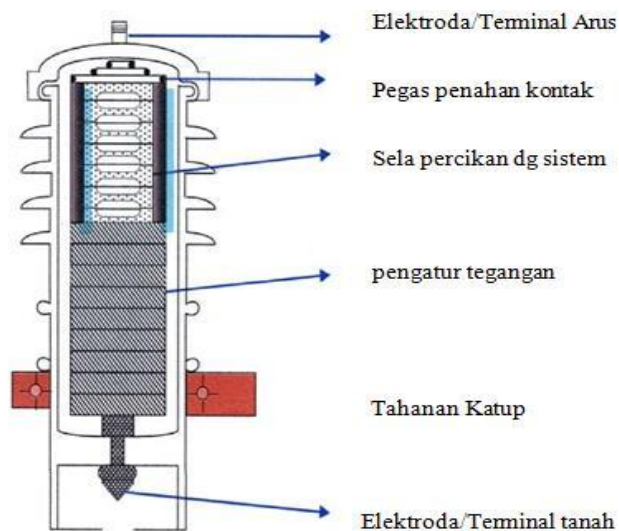
Elektroda berfungsi sebagai titik koneksi terminal *arrester*; elektroda superior terhubung pada sisi bertegangan tinggi, sedangkan elektroda inferior dikoneksikan ke sistem pembumian.

- b. Sela Percikan Api

Dalam kasus terjadinya tegangan lebih akibat sambaran petir atau lonjakan hubung pada *arrester* yang terpasang, sela percikan api (*spark gap*) akan memicu pelepasan busur api yang kemudian diarahkan keluar oleh ekspansi gas yang dihasilkan dari dekomposisi tabung serat.

- c. Tahanan Katup / Resistor Non-Linear

Resistor yang diaplikasikan dalam konfigurasi *arrester* ini merupakan material khusus yang karakteristik resistansinya mengalami perubahan signifikan sebagai respons terhadap fluktuasi tegangan.



Gambar 2.8 Bagian-Bagian *Lightning Arrester*

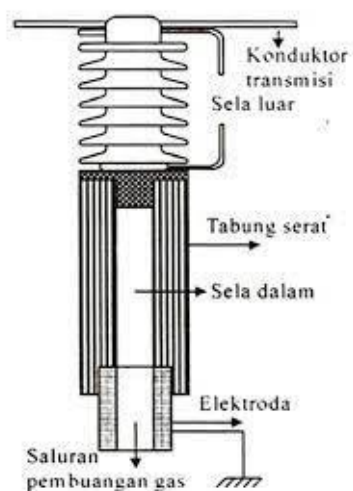
2. Prinsip Kerja *Lightning Arrester*

Alat proteksi sambaran petir, merupakan sebuah perangkat yang dirancang guna perlindungan alat dalam sistem tenaga listrik dari lonjakan tegangan karena sambaran petir. Berfungsi dalam menyediakan lintasan alternatif (*by pass*) yang mengelilingi isolasi. Penangkal petir menciptakan jalur yang impedansinya rendah bagi arus kilat, sehingga mencegah timbulnya tegangan lebih yang berlebihan pada peralatan daya. Jalur alternatif *lightning arrester* dirancang agar tidak mengganggu arus sistem 50 Hz. *Arrester* bersifat isolator dalam operasi normal, namun saat *overvoltage* akibat surja petir maka impedansinya menurun sehingga menyalurkan arus ke tanah hingga *Residual Voltage* mencapai tegangan kerja, kemudian *arrester* kembali ke kondisi isolatif untuk melindungi peralatan [12].

3. Jenis-Jenis *Lightning Arrester*

a. *Lightning Arrester* Ekspulsi

Lightning arrester tipe *expulsion* digunakan pada sistem hingga 33 kV dan terdiri atas dua sela seri, yaitu *outer* dan *inner gap*. *Inner gap* ditempatkan dalam *fiber tube* dengan elektroda pipa yang terhubung ke tanah membuat penahanan tegangan frekuensi daya tanpa korona dan *leakage current*. Tegangan tembus *outer gap* dan *inner gap* dirancang lebih rendah dari *flashover isolator* dan *fiber tube*, sehingga *arrester* efektif meredam surja petir.



Gambar 2.9 *Lightning Arrester* Ekspulsi

Ketika tegangan impuls dari sambaran kilat mencapai terminal penangkal petir, percikan api akan muncul pada celah internal dan eksternal, yang memungkinkan aliran arus kilat mengalir ke tanah. Arus kilat ini menciptakan busur listrik di kedua celah tersebut. Mengingat durasi arus kilat yang sangat singkat, hanya dalam hitungan mikrosekon, energi panas yang dihasilkan oleh busur listrik tergolong terbatas. Setelah arus kilat mencapai nol, maka tegangan frekuensi daya memicu *follow current* dalam orde milisekon dan busur listrik menghasilkan energi panas yang signifikan.

Energi panas dari busur ini kemudian disebarkan menuju tabung serat. Vaporisasi material *fiber tube* akibat panas busur menghasilkan gas bertekanan yang mengalir ke tanah dan mendinginkan dan mendisosiasi inner gap. *Follow current* bersifat sinusoidal, busur padam saat arus nol dan secara general berhenti dalam setengah periode dengan durasi maksimum dua periode.

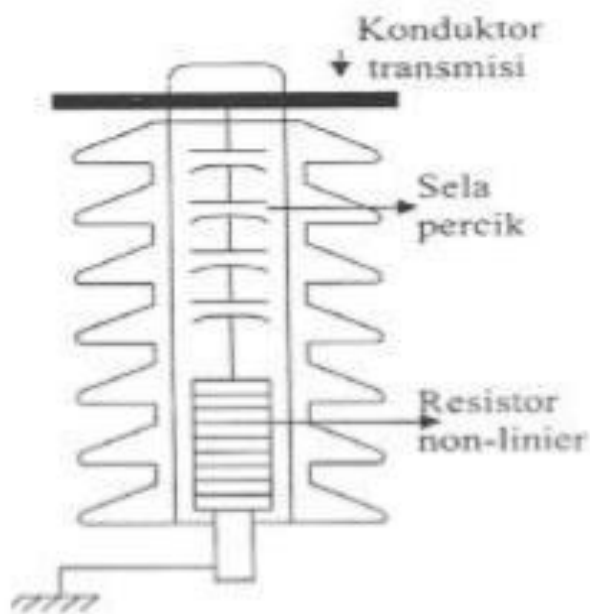
Efektivitas gas dalam memadamkan busur api ditentukan energi termal busur sesuai besar *follow current* yang dipengaruhi tegangan dan impedansi sistem. Jika *follow current* terlalu tinggi, busur menjadi dominan sehingga gas dari *fiber tube* tidak dapat memadamkan dan arus susulan terus berlanjut.

Lightning arrester diaplikasikan pada sistem berkapasitas hubungan singkat rendah dan secara general mencapai 33 kV efektif melindungi transformator distribusi 3–15 kV belum memadai untuk transformator daya. Adapun dapat digunakan dalam saluran transmisi guna menekan tegangan impuls petir yang menuju gardu induk.

b. *Lightning Arrester* Katup

Arrester jenis ini terdiri atas sela percik yang disusun seri dengan tahanan nonlinier (valve resistor). Sesuai dengan **Gambar 2.10**, Resistor tersebut memiliki karakteristik bahwa tahanannya akan menurun drastis saat dialiri arus besar, dan kembali tinggi ketika arus kecil. Pada kondisi normal, *arrester* bersifat isolatif; namun saat surja datang, percikan akan terjadi pada sela dan arus petir dialirkan melalui resistor nonlinier menuju tanah. Karena

seluruh komponen ditempatkan dalam tabung isolasi tertutup, kinerjanya tidak dipengaruhi oleh kondisi udara luar. Jenis katup umumnya digunakan untuk melindungi transformator daya pada gardu induk.



Gambar 2.10 *Lightning Arrester Katup*

Kedua komponen utama tersebut-sela percik dan resistor nonlinier ditempatkan di dalam tabung isolasi tertutup, sehingga kinerjanya tidak terpengaruh oleh kondisi lingkungan atau udara luar. Jenis *arrester* ini banyak digunakan untuk melindungi peralatan bernilai tinggi, terutama transformator daya pada sistem tenaga listrik.

Secara konstruksi sesuai dengan **Gambar 2.10**, *valve arrester* dilengkapi dengan celah api (*spark gap*) yang disusun seri dengan resistor nonlinier (*valve resistor*). Salah satu ujung celah api terhubung ke konduktor fasa, sedangkan ujung lainnya dihubungkan ke tanah (*ground*) melalui resistor katup. Ketika terjadi tegangan lebih (*overvoltage*), loncatan bunga api muncul pada celah tersebut, sehingga arus petir dapat dialirkan ke tanah.

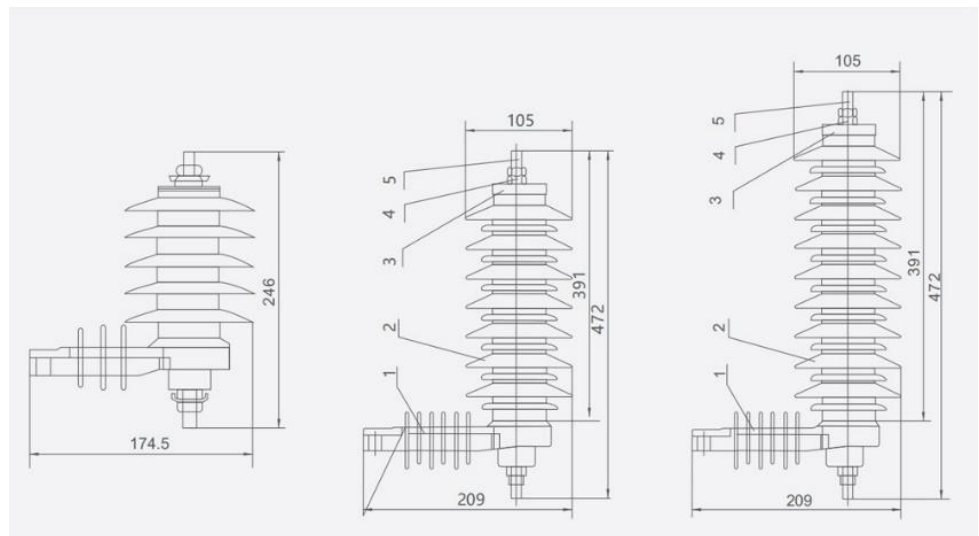
Setelah lonjakan tegangan mereda, resistor nonlinier berfungsi memadamkan busur api yang masih tersisa dengan menaikkan kembali nilai tahananannya. Ketika tegangan sistem meningkat, tahanan katup menurun

secara drastis, sehingga tegangan jatuh (*voltage drop*) dapat dibatasi meskipun arus yang mengalir cukup besar.

Arrester tipe ini umumnya terdiri dari beberapa sela seri yang dikombinasikan dengan elemen tahanan nonlinier. Tegangan sistem normal pada frekuensi dasar tidak akan menyebabkan loncatan pada sela tersebut. Namun, ketika gelombang surja dengan amplitudo tinggi datang, sela seri akan menembus dan *arrester* menjadi konduktor, menyalurkan arus lebih ke tanah. Dalam proses ini, resistor nonlinier berperan penting untuk mencegah arus susulan (*follow current*) dengan karakteristik bahwa tahananannya rendah untuk arus besar dan tinggi untuk arus kecil. Hubungan antara tegangan dan arus dari *arrester* ini digambarkan melalui karakteristik volt-ampere (V-I) yang menunjukkan perilaku nonliniernya.

c. *Lightning Arrester* Seng Oksida

Arrester tipe ini merupakan pengembangan dari *arrester* katup dengan material aktif berupa blok seng oksida (ZnO) tanpa menggunakan sela percik. Material ZnO memiliki sifat sangat nonlinier sehingga mampu menahan tegangan sistem dan sekaligus menghantarkan arus surja besar tanpa rusak. Keunggulan *arrester* jenis ini adalah respon yang sangat cepat terhadap tegangan impuls serta kemampuan menahan arus pelepasan berulang tanpa degradasi. Karena keandalan dan kemudahan perawatannya, tipe ini menjadi standar utama di sistem transmisi modern, termasuk pada GI 150 kV Sirimau Ambon. Secara prinsip kerja, *arrester* jenis ini memiliki sela percik yang ditempatkan di dalam tabung serat serta sela percik di udara terbuka (sela seri). Ketika tegangan surja mencapai nilai yang melebihi batas pengenalan *arrester*, kedua sela tersebut baik yang di dalam maupun di luar tabung akan tembus secara serentak, membentuk jalur penghantar berbentuk busur api (*arc discharge*). Pada saat itu, *arrester* bersifat konduktif dengan impedansi rendah, sehingga mampu menyalurkan arus surja petir dan arus sistem ke tanah secara bersamaan.

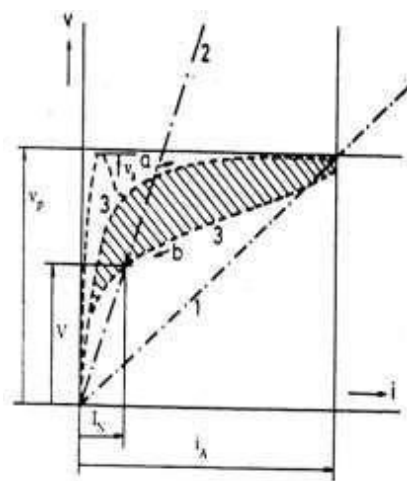


Gambar 2.11 *Lightning Arrester Seng Oksida*

4. Karakteristik *Lightning Arrester*

Karakteristik dipenuhi *arrester* untuk bekerja optimal yaitu:

- Bekerja pada tegangan nominal dan frekuensi tetap 50 Hz.
- Menahan respon tegangan dalam batas tertentu saat dialiri arus petir.
- Dibatasi kemampuan termal maksimum.



i_A = Arus surja i_N = Arus susulan

V = Tegangan Dasar

V_a = Tegangan Gagal sela

V_p = Tegangan Sisa

a = Arus Menaik

b = Arus Menurun

1, 2 = Tahanan linier

3 = Tahanan Tak Linear

Gambar 2.12 Karakteristik Arus Tegangan

Dari karakteristik tersebut berdasarkan pada **Gambar 2.12** batas termal salah satu aspek terpenting adalah kemampuan *arrester* dalam menyalurkan arus lonjakan berulang tanpa menyebabkan peningkatan suhu yang berlebihan. *Arrester* modern mampu mengalirkan arus impuls dengan amplitudo antara 65 hingga 100 kA, namun kemampuan untuk menahan rangkaian lonjakan berulang (repetitive surge discharge) menjadi lebih krusial, terutama pada saluran transmisi yang panjang dan memiliki kapasitas daya besar.

Berdasarkan Gambar 2.12, hubungan antara arus surja (i_a) dan arus susulan (i_n) dapat diamati pada fase kenaikan arus (a) dan penurunan arus (b) terhadap tegangan dasar (V). Selain itu, terdapat pula tegangan gagal sela (V_a), tegangan sisa (V_p), serta perbedaan karakteristik antara tahanan linier (1 dan 2) dan tahanan tak linier (3).

Hubungan matematis antara arus pelepasan (I_a) dari *arrester* terhadap besaran tegangan dan impedansi sistem dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$I_a = \frac{2V - V_a}{Z} \quad (2.2)$$

Keterangan:

I_a = Arus pelepasan *arrester* (A)

V = Tegangan surja datang (kV)

V_a = Tegangan terminal *arrester* (kV)

Z = Impedansi surja saluran transmisi (Ω)

Dari persamaan tersebut dapat dijelaskan bahwa tegangan kerja *arrester* meningkat seiring dengan naiknya arus pelepasan. Namun demikian, kenaikan tegangan ini dibatasi oleh sifat tahanan nonlinier *arrester*, sehingga tegangan sisa (residual voltage) yang diteruskan ke peralatan tetap berada pada batas aman. Dengan demikian, resistor nonlinier berperan penting dalam menjaga agar energi impuls petir dapat dilepaskan ke tanah tanpa menyebabkan kerusakan pada sistem tenaga listrik.

Hubungan antara tegangan maksimum (V_t) dan tegangan pelepasan *arrester* (V_a) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$V_t = V_a + 2 \left(\frac{dv}{dt} \right) \frac{L}{1000}$$

Dari persamaan tersebut dapat diturunkan menjadi:

$$V_a = V_t - 2 \left(\frac{dv}{dt} \right) \frac{L}{1000} \quad (2.3)$$

Keterangan:

V_a = Tegangan pelepasan arrester (kV)

V_t = Tegangan maksimum (kV)

$\frac{dv}{dt}$ = Kecuraman gelombang atau rate of rise of voltage (kV/ μ s)

L = Panjang atau jarak antara *arrester* dan ujung konduktor (ft)

Persamaan ini menunjukkan bahwa tegangan pelepasan *arrester* (V_a) bergantung pada tegangan puncak sistem (V_t), kecuraman kenaikan gelombang surja (dv/dt), dan panjang saluran antara *arrester* dan titik sambaran. Semakin besar nilai kecuraman gelombang atau semakin jauh jarak *arrester* dari peralatan, maka tegangan pelepasan akan semakin menurun, karena sebagian energi surja terserap sepanjang saluran transmisi.

5. Parameter-Parameter Lightning Arrester

a. Tegangan Sistem Tertinggi

Rating tegangan *arrester* didefinisikan sebagai tegangan bolak-balik maksimum (maximum permissible AC voltage) yang dapat diterapkan secara kontinu pada terminal *lightning arrester*. Tegangan ini merupakan batas tertinggi yang masih memungkinkan *arrester* untuk memutus arus susulan (*power follow current*) yang muncul pada saat terjadi percikan atau loncatan pada *arrester*. Penentuan nilai tegangan ini penting untuk memastikan ketahanan *arrester* terhadap kondisi kerja sistem tenaga listrik, sekaligus mengetahui tegangan maksimum yang mungkin timbul di gardu induk. Secara umum, tegangan sistem maksimum ditetapkan sebesar 110% dari tegangan nominal sistem sesuai dengan standar perhitungan yang dijelaskan oleh [7].

$$V_m = 1,1 \times V_n \quad (2.4)$$

b. Koefisien Pembumian

Rating tegangan *arrester* ditentukan koefisien pembumian yang dipengaruhi metode pentanahan netral serta impedansi urutan sistem. Nilai koefisien 0,8 digunakan pada pembumian efektif (*arrester* 80%) seperti di GI Sirimau, sedangkan koefisien 1,0 pada sistem tanpa pentanahan langsung (*arrester* 100%) (Ibnu & Eko, 177)

c. Arus Pelepasan *Lightning Arrester*

Discharge current adalah batas arus puncak untuk dialirkan *lightning arrester* tanpa mengalami kerusakan. Berdasarkan klasifikasinya, nilai arus pelepasan dibedakan menjadi beberapa kelas sesuai dengan tingkat tegangan sistem dan kebutuhan proteksi, yaitu:

Arrester kelas 10 kA diterapkan pada gardu induk besar dengan intensitas petir tinggi dan tegangan > 70 kV, kelas 5 kA untuk sistem < 70 kV; kelas 2,5 kA untuk gardu kecil bertegangan < 22 kV guna efisiensi biaya, dan kelas 1,5 kA dalam proteksi transformator berdaya kecil.

Arus pelepasan yang timbul selama perambatan gelombang berjalan dihitung menggunakan rumus:

$$I_a = \frac{2U_d - U_a}{Z} \quad (2.5)$$

Keterangan:

I_a = Arus pelepasan *arrester* (kA)

U_d = Tegangan gelombang berjalan (kV)

U_a = Tegangan kerja atau tegangan sisa *arrester* (kV)

Z = Impedansi karakteristik saluran transmisi (Ω)

Nilai **tegangan gelombang datang** diperoleh berdasarkan data standar yang terdapat pada **tabel F.O.V. of Standard of Disc.**

Tegangan kerja penangkap petir akan naik, dengan naiknya arus pelepasan, tetapi kenaikan ini sangat dibatasi oleh tahanan linear dari penangka petir.

$$\begin{aligned} V_t &= V_a + 2 \frac{dv}{dt} \frac{L}{1000}, \text{ jadi} \\ V_a &= V_t - 2 \frac{dv}{dt} \frac{L}{1000} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Keterangan:

V_a = Tegangan pelepasan *arrester* (kV)

V_t = Tegangan maksimum (kV)

$\frac{dv}{dt}$ = Kecuraman gelombang (kV/s)

L = Jarak *arrester* dan ujung kawat (ft)

d. Pemilihan Tingkat Isolasi Dasar (TID)

Agar sistem proteksi bekerja efektif, tegangan sisa yang timbul pada *arrester* harus selalu lebih rendah dari **Tingkat Isolasi Dasar (TID)** peralatan yang dilindungi. TID merupakan batas maksimum tegangan yang masih dapat ditahan oleh isolasi peralatan tanpa mengalami kerusakan. Dalam penentuan nilai TID, perlu mengacu pada prinsip-prinsip koordinasi isolasi agar tingkat ketahanan isolasi peralatan sejalan dengan kemampuan *arrester* dalam menahan dan mengalirkan tegangan lebih.

Pada **Tabel 2.1**, ditunjukkan perbandingan antara nilai Tingkat Isolasi Dasar (TID) dengan tegangan sistem maksimum, yang menjadi acuan dalam menentukan spesifikasi *lightning arrester* yang sesuai.

Tabel 2.2 Perbandingan TID dengan Tegangan Sistem

Unom	150 kV	275 kV	500 kV
Um	170	300	550
BIL	750	1050	1550

Nilai puncak surja petir yang mencapai sistem pembangkit berasal dari saluran transmisi, dan besarnya dibatasi oleh Tingkat Isolasi Dasar (TID) saluran tersebut. Dalam praktik perencanaan koordinasi isolasi, perlu diperhitungkan variasi tegangan flashover serta probabilitas tembusnya isolator akibat lonjakan tegangan petir.

Untuk menjaga keandalan dan keselamatan sistem, maka diterapkan faktor keamanan sebesar 20% terhadap nilai TID. Dengan demikian, Faktor Perlindungan (FP) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$FP = 1,2 \times TID \quad (2.7)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa Faktor Perlindungan (FP) bernilai 1,2 kali lebih besar dari Tingkat Isolasi Dasar (TID). Hal ini berarti

sistem proteksi harus mampu menahan tegangan impuls hingga 20% lebih tinggi dari batas isolasi nominal, untuk mengantisipasi variasi tegangan akibat kondisi atmosfer dan sifat acak dari sambaran petir.

e. Impedansi Surja

Pada saluran transmisi 150 kV di Gardu Induk Sirimau, digunakan jenis konduktor ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) dengan ukuran 435/55. Berdasarkan data sheet manufaktur KBMI serta acuan SPLN 41-7:1981, konduktor tipe 435/55 memiliki diameter sebesar 28,80 mm.

Hasil wawancara dengan operator Gardu Induk Sirimau menunjukkan bahwa tinggi rata-rata konduktor terhadap permukaan tanah adalah 17,5 meter. Nilai ini digunakan sebagai parameter dalam menghitung impedansi surja (surge impedance) dari penghantar udara.

Menurut Hutaeruk (1991), impedansi surja untuk penghantar udara dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Z = 60 \ln \left(\frac{2h}{r} \right) (\Omega) \quad (2.8)$$

Keterangan:

h = Tinggi rata-rata konduktor terhadap permukaan tanah (m)

r = Jari-jari kawat penghantar (m)

Secara umum, nilai impedansi surja untuk penghantar udara berada pada kisaran 400 – 600 Ω , sedangkan untuk kabel bawah tanah atau kabel berisolasi, nilai impedansinya jauh lebih kecil, yaitu sekitar 50 – 60 Ω (Hutaeruk, 1989:4). Dengan demikian, parameter tinggi konduktor dan jari-jari kawat berperan penting dalam menentukan besarnya impedansi karakteristik (Z) yang memengaruhi propagasi gelombang surja di sepanjang saluran transmisi. Semakin besar jarak konduktor dari tanah atau semakin kecil jari-jari penghantar, maka nilai impedansi surja akan meningkat, yang berarti gelombang petir akan lebih mudah dipantulkan dibandingkan disalurkan.

f. Kecepatan Gelombang Berjalan

Suatu gelombang yang merambat sepanjang konduktor dengan memiliki induktansi (L) dan kapasitansi (C) per satuan panjang, akan

menyebabkan gelombang tegangan dan arus merambat dengan kecepatan yang sama di sepanjang saluran tersebut. Kecepatan rambat ini tidak hanya bergantung pada jenis gelombang yang menjalar, tetapi juga ditentukan oleh karakteristik fisik konduktor, seperti induktansi dan kapasitansi per satuan panjang yang membentuk konstanta transmisi saluran. [7]

Menurut kecepatan rambat gelombang pada kawat udara dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$V = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.9)$$

Keterangan:

V = Kecepatan rambat gelombang (m/s)

L = Induktansi per satuan panjang saluran (H/m)

C = Kapasitansi per satuan panjang saluran (F/m)

Dari persamaan tersebut dapat dijelaskan bahwa kecepatan rambat gelombang (V) berbanding terbalik dengan akar hasil kali antara induktansi dan kapasitansi saluran ($\sqrt{LC}$). Artinya, semakin besar nilai induktansi atau kapasitansi konduktor, maka kecepatan rambat gelombang akan semakin rendah. Sebaliknya, jika nilai kedua parameter tersebut kecil, maka gelombang listrik dapat merambat lebih cepat di sepanjang saluran transmisi.

Secara praktis, pada saluran udara tegangan tinggi (overhead line), kecepatan rambat gelombang mendekati kecepatan cahaya di udara, yaitu sekitar 300.000 km/detik, tergantung pada kondisi medan elektromagnetik di sekitar penghantar.

g. Tegangan Sisa

Tegangan sisa adalah nilai tegangan yang harus dapat dialirkan oleh *arrester* setelah nilai tegangan puncak. Tegangan sisa *arrester* dapat dicari dengan persamaan berikut

$$V = I \times R \quad (2.10)$$

dimana:

V = Tegangan sisa

I = Arus pelepasan

R = Tahanan dalam *arrester*

2.2.5 Metode Pantulan Berulang

Metode pantulan berulang (*repetitive reflection method*) yang umumnya digambarkan dalam bentuk diagram tangga (*lattice diagram*) merupakan pendekatan yang digunakan untuk menganalisis perilaku gelombang surja berjalan pada suatu saluran transmisi.

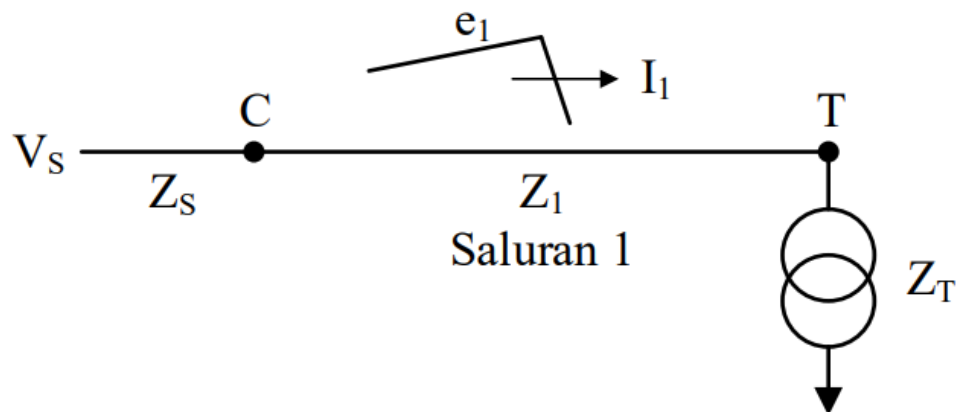
Metode ini memungkinkan pengamatan secara sistematis terhadap proses pemantulan dan perambatan gelombang di sepanjang saluran dengan memanfaatkan representasi grafis.

Dalam diagram tersebut, sumbu horizontal digunakan untuk menunjukkan arah dan posisi pantulan gelombang di sepanjang saluran, sedangkan sumbu vertikal menggambarkan perubahan waktu, dengan interval tertentu sesuai dengan waktu tempuh gelombang surja dalam satu arah, yaitu sebesar S/v , dimana:

S = panjang saluran transmisi (m)

v = kecepatan rambat gelombang (m/s).

Melalui diagram tangga ini, dapat ditentukan besarnya tegangan surja total pada setiap titik dan pada setiap momen waktu tertentu, karena pantulan dan transmisi gelombang di setiap ujung saluran dapat divisualisasikan secara berurutan. Metode pantulan berulang ini sangat efektif digunakan untuk menentukan besaran tegangan surja dan arus surja yang terjadi pada konfigurasi rangkaian tertentu, seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2.13** Pendekatan ini juga membantu memahami interaksi antara gelombang datang, gelombang pantul, dan gelombang terusan, terutama ketika saluran mengalami perubahan impedansi atau kondisi ujung saluran (terbuka, tertutup, atau terhubung ke beban).



Gambar 2.13 Rangkaian Satu Saluran

Pada **Gambar 2.13**, titik C dan T menggambarkan dua lokasi yang menghubungkan dua nilai impedansi surja berbeda, yaitu antara saluran-1 dengan impedansi surja Z_1 dengan panjang total S dari titik C hingga titik T. Pada sistem ini, Z_s merepresentasikan impedansi surja sisi sumber dan Z_t impedansi sisi beban. Pemberian tegangan surja pada saluran-1 menimbulkan gelombang tegangan e_i dan arus i_1 yang merambat dari titik C ke T [7]. Saat mencapai *junction point* dengan impedansi berbeda dan gelombang mengalami refleksi dan transmisi. Gelombang datang menghasilkan gelombang pantul di titik T yang kembali ke C dan memicu refleksi berulang pada interval waktu berikutnya. Ketika gelombang tersebut mencapai titik T pada waktu $3t$, proses pemantulan serupa kembali terjadi. Siklus pemantulan ini berlangsung berulang-ulang antara titik C dan titik T, hingga energi gelombang surja terdisipasi seluruhnya di sepanjang saluran.

Dalam waktu tertentu, total tegangan surja atau arus surja di sepanjang saluran merupakan penjumlahan dari seluruh komponen gelombang (datang, pantul, dan terusan) yang terjadi pada titik dan waktu tersebut. Waktu diperlukan gelombang surja guna menempuh jarak dari titik C ke titik T ataupun sebaliknya dapat dinyatakan dengan rumus berikut [7]:

$$t = \frac{S}{v} = \frac{150 \times 10^2}{v} \quad (2.10)$$

Keterangan:

t = Waktu rambat gelombang (detik)

v = Kecepatan rambat gelombang surja (m/ μ detik)

S = Panjang saluran transmisi (m)

Dari **Gambar 2.13** dapat dilihat bahwa gelombang surja petir datang dari arah kiri, dan ketika mencapai titik pemasangan lightning *arrester*, sebagian gelombang akan dipantulkan kembali ke arah sumber, sedangkan sebagian lainnya akan diteruskan ke arah beban. Proses inilah yang menjadi dasar analisis pemantulan dan transmisi gelombang surja dalam sistem proteksi petir pada saluran transmisi. Untuk menentukan tegangan percik *lightning arrester* harus ditentukan terlebih dahulu operator pantulan dan terusan.

$$a = \frac{Z_c - Z_1}{Z_c + Z_1} \quad a' = \frac{2Z_c}{Z_c + Z_1} \quad b = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_c + Z_1} \quad b' = \frac{2Z_1}{Z_c + Z_1}$$

Keterangan :

Z_1 = Impedansi surja untuk penghantar udara (Ω)

Z_c = Impedansi surja untuk kabel (Ω)

a = Operator pantulan untuk gelombang yang datang dari kiri

b = Operator pantulan untuk gelombang yang datang dari kanan

a' = Operator terusan untuk gelombang yang datang dari kiri

b' = Opeartor terusan untuk gelombang yang datang dari kanan

Penentuan kecuraman gelombang datang pertama diawali dengan menetapkan waktu propagasi gelombang surja menuju gardu induk atau transformator. Pada perhitungan ini, waktu kecuraman gelombang (t) diasumsikan 2 μ detik, sedangkan besar tegangan surja petir (A) diambil sebesar 1.000 kV. Berdasarkan asumsi tersebut, faktor redaman (a) kemudian dihitung untuk memperoleh karakteristik gelombang

$$a = A \times a' \quad (2.12)$$

Perhitungan tegangan pada titik pertemuan antara kabel dan kawat udara diawal pada kondisi awal saat $t = 0$. Untuk interval waktu berikutnya, besaran tegangan diperoleh

dengan menjumlahkan nilai tegangan sebelumnya dengan komponen redaman yang terjadi pada sistem. Dengan asumsi tidak terdapat *lightning arrester*, maka nilai tegangan pada titik sambungan kabel udara dihitung untuk setiap selang waktu 2 μ detik [7] :

$$\begin{aligned}
 t = 0 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_0 = 0 \\
 t = 2 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_2 = e_0 \text{ arrester} + (A \times a') \\
 t = 4 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_4 = e_2 \text{ arrester} \times 1 \\
 t = 6 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_6 = e_4 \text{ arrester} + e_2 \text{ arrester} + (e_4 \text{ arrester} \times b) \\
 t = 8 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_8 = e_6 \text{ arrester} \times 1 \\
 t = 10 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_{10} = e_8 \text{ arrester} + (e_4 \text{ arrester} \times b) + (e_4 \text{ arrester} \times b \times b) \\
 t = 12 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_{12} = e_{10} \text{ arrester} \times 1
 \end{aligned}$$

Waktu percik *lightning arrester* (t_{s0}) pada Lokasi pemasangan *arrester* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut

$$t_{s0} = 8 + \Delta t \quad (2.13)$$

Keterangan :

t_{s0} = Waktu percik *lightning arrester* (μ detik)

8 = Waktu pada saat 8 μ detik

Δt = Waktu tegangan berdasarkan waktu muka gelombang (μ detik)

Waktu tegangan berdasarkan waktu muka gelombang *lightning arrester* (Δt) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [7]

$$\Delta t = (E_a - e_{t=8}) / b' \left(\frac{E_4 \text{ Arrester} \times b}{2} \right) \quad (2.14)$$

Keterangan :

Δt = Waktu tembus atau waktu lompatan api (μ detik)

E_a = Tegangan percik *arrester* (kV)

$e_{t=8}$ = Tegangan pada titik sambungan pada waktu 8 μ detik

b' = Operator terusan untuk gelombang yang datang dari kanan

Tahap berikutnya adalah menentukan nilai tegangan pelepasan atau tegangan operasi *lightning arrester* ($e_t = t_{s0}$). Besaran ini berperan penting dalam menentukan

efektivitas sistem proteksi terhadap surja petir. Apabila tegangan operasi arrester berada di bawah BIL peralatan yang diamankan, maka sistem proteksi dinilai mampu memberikan margin keamanan yang memadai sehingga perlindungan optimal dapat tercapai. Nilai tegangan pelepasan *lightning arrester* selanjutnya dihitung menggunakan persamaan berikut [7]

$$e_t = t_{s0} + \Delta t$$

$$e_t = 8 + \left(\frac{e_{t=10} - e_{t=8}}{2} \right) \Delta t \quad (2.15)$$

2.2.6 Naik Tegangan Pada Transformator

Tegangan lebih pada transformator muncul sebagai akibat dari peristiwa surja hubung yang merambat menuju peralatan. Apabila nilai tegangan yang terjadi tidak melampaui Tingkat Isolasi Dasar (TID) transformator, maka sistem proteksi dianggap bekerja secara efektif. Nilai kenaikan tegangan tersebut selanjutnya ditentukan melalui persamaan berikut. [7]

$$\begin{aligned} t = 0 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_0 = 0 \\ t = 2 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_2 = 0 \\ t = 4 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_4 = e_2 \text{ arrester} + (2 \times A \times a') \\ t = 6 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_6 = e_4 \text{ arrester} \times 1 \\ t = 8 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_8 = e_6 \text{ arrester} \times (1 + b) \\ t = 10 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_{10} = e_8 \text{ arrester} \times 1 \\ t = 12 \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_{12} = e_{10} \text{ arrester} (1 + b + b)^2 \\ t = 10 + \Delta t \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_{10, \Delta t} = e_{t=10} + \left(\frac{e_{t=12} - e_{t=8}}{2} \right) \Delta t \\ t = 12 + \Delta t \text{ } \mu\text{detik}; & \quad e_{12, \Delta t} = e_{t=10, \Delta t} + \left(\frac{e_{t=12} - e_{t=8}}{2} \right) (2\mu t - \Delta) \end{aligned}$$

2.2.7 Jarak *Lightning Arrester* Menurut Teori Pantulan Berulang

Secara teoritis, ditematkannya *lightning arrester* yang paling efektif adalah sedekat mungkin dengan peralatan yang dilindungi guna meminimalkan kenaikan tegangan akibat surja. Namun dalam kondisi di lapangan, keterbatasan tata letak gardu induk seringkali menyebabkan jarak pemasangan *arrester* tidak dapat dibuat sangat dekat. Apabila jarak antara *arrester* dan peralatan semakin besar, maka tegangan lebih yang tiba pada terminal peralatan cenderung meningkat akibat efek rambatan dan refleksi

gelombang. Dengan demikian, besarnya tegangan yang diterima oleh peralatan yang dilindungi berbanding lurus dengan jarak pemasangan lightning *arrester*.

$$E_r = E_a + \frac{A \cdot S}{v}$$

$$S = (E_r - E_a) v / 2 A \quad (2.16)$$

Keterangan :

S = Jarak maksimum *arrester* terhadap transformator

E_r = Tegangan maksimum yang masih diizinkan di terminal trafo (BIL)

E_a = Tegangan pelepasan *arrester*

v = Kecepatan rambat gelombang

A = Kecuraman gelombang datang

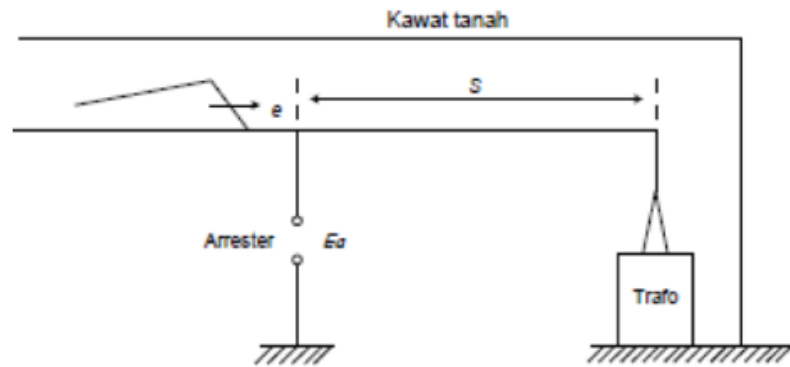
2.2.8 Penempatan *Lightning Arrester* pada Gardu Induk

Penempatan lightning *arrester* pada gardu induk sangat penting untuk diperhitungkan, berdasarkan SPLN-7 : 1978 bahwa bilamana dipilih penangkap petir kelas 138 kV maka jarak antar penangkap petir dengan transformator antara 80 m sampai dengan 120 m, untuk penangkap petir dengan transformator tidak melebihi 80 m.

Upaya pencegahan flashover menuntut agar *lightning arrester* ditempatkan pada posisi yang berdekatan dengan peralatan yang dilindungi. Panjang jarak instalasi tersebut menentukan besar kecilnya tegangan sisa yang mencapai peralatan. Semakin jauh posisi *arrester*, semakin besar kemungkinan tegangan lebih yang tidak melebihi nilai tegangan yang dapat ditoleransi oleh sistem isolasi . [9]

Pada gardu induk, pemasangan lightning *arrester* umumnya ditempatkan pada dua titik utama, yakni pada bay saluran (line bay) serta bay transformator (transformer bay). Kedua lokasi tersebut berperan sebagai sistem proteksi untuk menjaga peralatan vital dari tegangan lebih yang timbul akibat sambaran petir maupun kejadian switching. [9] Namun, jarak antara *arrester* dengan transformator daya tidak selalu sama pada setiap gardu induk, karena bergantung pada tata letak fisik, konfigurasi saluran, dan kondisi ruang instalasi. Pada umumnya, jarak penempatan *arrester* di bay penghantar terhadap transformator berada dalam kisaran 20 hingga 30 meter.

Untuk memperjelas konfigurasi tersebut, **Gambar 2.14** berikut menunjukkan konfigurasi jarak antara *lightning arrester* dan transformator daya pada sistem gardu induk.



Gambar 2.14 Jarak Antara *Arrester* dan Transformator sebesar S

Secara umum, jarak pemasangan antara lightning arrester dan transformator berada pada rentang 20 sampai 30 meter. Akan tetapi, untuk memperoleh tingkat perlindungan yang optimal, penentuan jarak tersebut harus mempertimbangkan parameter gelombang surja, kecepatan perambatan, serta nilai tegangan percik. Hubungan matematis jarak optimum diberikan oleh:

$$S = \frac{(V_t - V_a) v}{2A} \quad (2.17)$$

Keterangan:

S = Jarak antara *arrester* dan transformator (m)

V_t = Tegangan pada terminal transformator (kV)

V_a = Tegangan percik *arrester* (kV)

A = Kecuraman muka gelombang tegangan impuls (kV/ μ s)

v = Kecepatan rambat gelombang (m/ μ s)

Persamaan ini digunakan untuk menghitung jarak maksimum yang masih dapat memberikan perlindungan efektif terhadap transformator daya. Prinsipnya, jarak penempatan *arrester* harus diatur sedemikian rupa sehingga tegangan impuls (surja) yang tiba di terminal transformator tidak melebihi nilai isolasi dasar (TID) dari peralatan tersebut. Nilai A menunjukkan tingkat kecuraman gelombang surja petir, sedangkan

v menggambarkan kecepatan rambat gelombang di sepanjang saluran udara. Semakin curam bentuk gelombang (semakin besar A), maka jarak aman (S) antara *arrester* dan transformator harus semakin pendek, agar tegangan sisa yang diterima transformator tidak melampaui batas isolasinya. Sebaliknya, apabila tegangan percik *arrester* mendekati tegangan terminal transformator, maka jarak penempatan dapat dibuat lebih jauh karena perbedaan potensial yang perlu diredam relatif kecil. [1]

Dari Persamaan (2.11) kita dapat menghitung tegangan yang tiba pada transformator sebagai berikut:

$$E_p = E_a + 2 \frac{AS}{v} \quad (2.18)$$

Keterangan:

E_p = Tegangan puncak pada terminal transformator (kV)

E_a = Tegangan percik *arrester* (kV)

A = Kecuraman muka gelombang impuls (kV/ μ s)

S = Jarak antara *arrester* dan transformator (m)

v = Kecepatan rambat gelombang (m/ μ s)

2.2.9 Syarat Pemasangan *Lightning Arrester*

Berdasarkan Pedoman Pemeliharaan Peralatan Gardu Induk PT PLN (Persero), terdapat beberapa syarat penting yang harus diperhatikan dalam pemasangan *lightning arrester* agar sistem proteksi terhadap tegangan lebih dapat berfungsi secara optimal, yaitu sebagai berikut:

1. Tegangan pada terminal *lightning arrester* saat terjadi pelepasan harus cukup rendah untuk menjamin keamanan isolasi peralatan listrik yang dilindungi. Tegangan percik ini sering disebut sebagai tegangan gagal sela (gap breakdown voltage).
2. *Lightning arrester* harus memiliki kemampuan untuk menyalurkan arus surja petir ke sistem pentanahan (grounding) tanpa menyebabkan kerusakan pada *arrester* itu sendiri. Hal ini menjadi indikator ketahanan termal dan mekanis *arrester* terhadap impuls energi tinggi akibat sambaran petir.

3. Kemampuan memutus arus susulan dan beroperasi kembali Setelah terjadi pelepasan, *arrester* wajib mampu memutus arus susulan (power follow current) secara cepat dan kembali berfungsi normal sebagai isolator. Sifat ini memastikan bahwa *lightning arrester* dapat terus melindungi peralatan tanpa perlu penggantian setelah satu kali operasi.
4. Sistem pentanahan untuk *lightning arrester* harus memiliki nilai tahanan tidak lebih dari 5 ohm, agar arus surja dapat mengalir ke tanah dengan efektif. Nilai tahanan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan tegangan sisa meningkat dan mengurangi efektivitas proteksi.

2.2.10 Piringan Isolasi

Lightning arrester terdiri dari rangkaian sela api yang disusun secara seri dan dipadukan dengan elemen tahanan berbentuk piringan yang memiliki karakteristik non-linear. Sifat ini memungkinkan nilai tahanan antara terminal *arrester* dikendalikan sesuai kondisi tegangan. Setelah arus surja mereda, nilai tahanan akan kembali meningkat sehingga arus susulan dapat dihentikan.

Ketidakseimbangan distribusi tegangan pada sela api berpotensi menimbulkan gangguan, sehingga digunakan kapasitor dan tahanan non-linear yang dipasang secara paralel terhadap sela api untuk menstabilkan pembagian tegangan. Pada sistem dengan tingkat tegangan lebih tinggi, kapasitor dan tahanan linear tambahan juga dipasang sejajar dengan rangkaian sela.

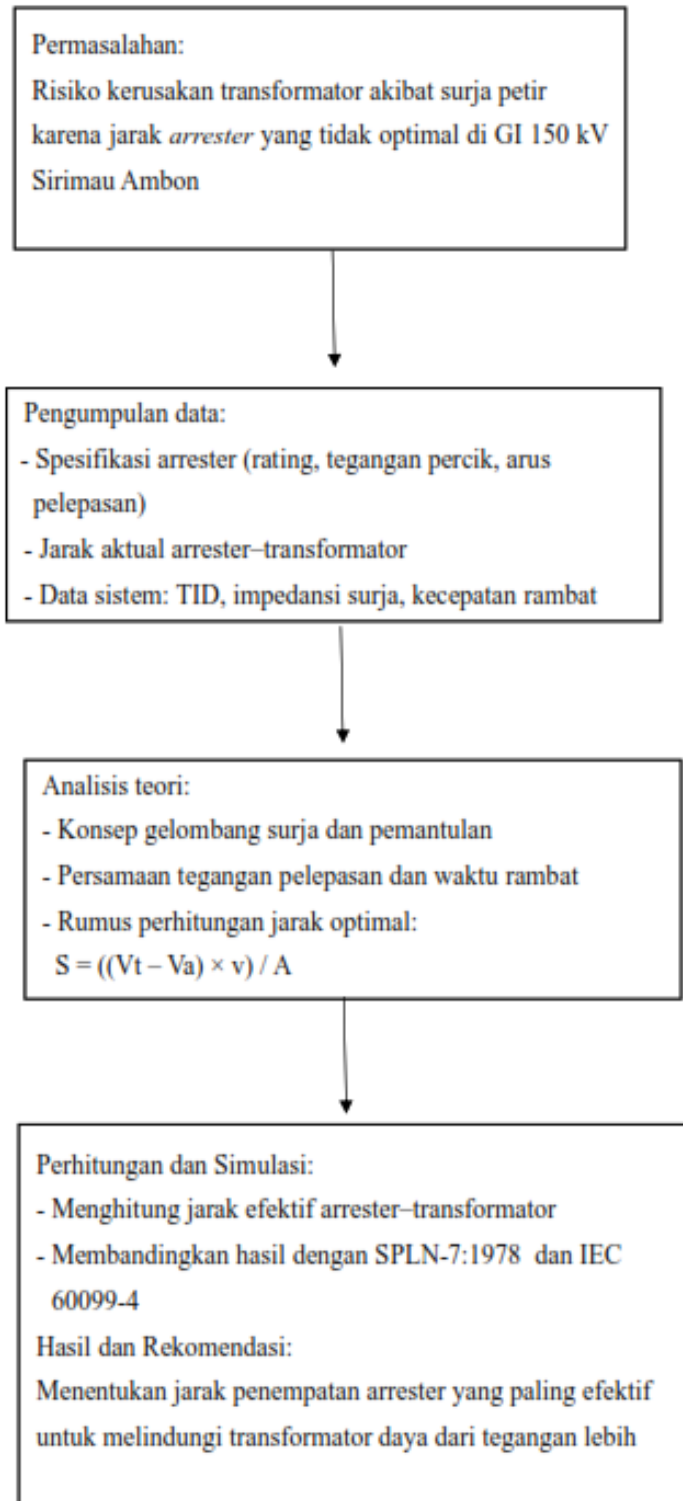
Saat terjadi tegangan lebih yang menyebabkan loncatan bunga api pada sela-sela seri, arus yang mengalir menjadi sangat besar dan mempercepat proses penurunan tegangan lebih. Nilai tegangan tertinggi yang muncul pada *arrester* dikenal sebagai tegangan loncatan, yaitu tegangan pada elemen tahanan non-linear ketika arus impuls mengalir. Tegangan loncatan minimum disebut *Maximum 100% Impulse Sparkover Voltage*, sedangkan tegangan yang timbul selama arus surja berlangsung dinamakan tegangan residu.

Dalam kondisi operasi normal, arus bocor yang melewati tahanan *arrester* sangat kecil, umumnya tidak melebihi 0,1 mA. Arus ini cukup untuk menjaga temperatur internal

arrester sedikit lebih tinggi dibandingkan suhu lingkungan, sehingga membantu mencegah masuknya kelembapan atau uap air ke dalam *arrester*.

2.3 Kerangka Pemikiran

Lightning arrester merupakan komponen utama sistem proteksi di Gardu Induk (GI) yang berfungsi melindungi peralatan, khususnya transformator daya, dari tegangan lebih akibat sambaran petir langsung maupun tidak langsung. Dalam sistem 150 kV seperti di GI Sirimau Ambon, gelombang surja yang merambat di sepanjang saluran udara dipengaruhi oleh jarak *arrester* terhadap transformator, impedansi saluran, serta kecuraman gelombang impuls petir. Jika jarak penempatan *arrester* terlalu jauh, maka sebagian energi surja dapat mencapai terminal transformator dan menimbulkan risiko kerusakan isolasi. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada analisis penentuan jarak optimal antara *arrester* dan transformator daya agar perlindungan yang diberikan berada dalam batas Tingkat Isolasi Dasar (TID) sistem.



Gambar 2.15 Kerangka Pemikiran Penentuan Jarak Penempatan *Arrester*