

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Penelitian tentang penambahan proteksi petir dengan menambahkan sistem pentanahan langsung sudah banyak dikaji sebelumnya, Berikut beberapa contoh penelitian yang relevan dengan judul efektivitas *isulated ground shield wire* :

- a. William P. Rarun dari Unsrat Manado sebelumnya telah menganalisa dengan judul “Analisis grounding pada tower transmisi 150 kV Lopana – GIS Teling untuk mencegah back flash over”. Dari hasil analisis didapatkan kesimpulan semakin kecil nilai pentanahan maka semakin baik dalam mencegah back flash over.
- b. Wildan Istiklal dari IT PLN sebelumnya telah menganalisa dengan judul “Penerapan Metode Multi Direct Grounding (MDG) dalam perbaikan sistem pentanahan listrik pada SUTT”. Telah terbukti mampu menurunkan tegangan tower sebesar 93 % sehingga aman untuk isolator
- c. Alfiansyah Hasibuan dari IT PLN sebelumnya telah menganalisa dengan judul “Studi Grounding SUTT 70 kV Kedung Badak – Kracak Dengan Implementasi Multi Direct Grounding (MDG)”, menjelaskan bahwa MDG dapat menurunkan resistansi grounding.
- d. Hasrul H. Ibrahim sebelumnya telah menganalisa dengan judul “Evaluasi Resistansi Pentanahan Tower SUTT 150 kV Poso – Sidera dengan metode direct grounding dan metode multi grounding”, membuktikan bahwa multi grounding lebih efektif menurunkan nilai tahanan pentanahan tower.

2.2 Landasan Teori

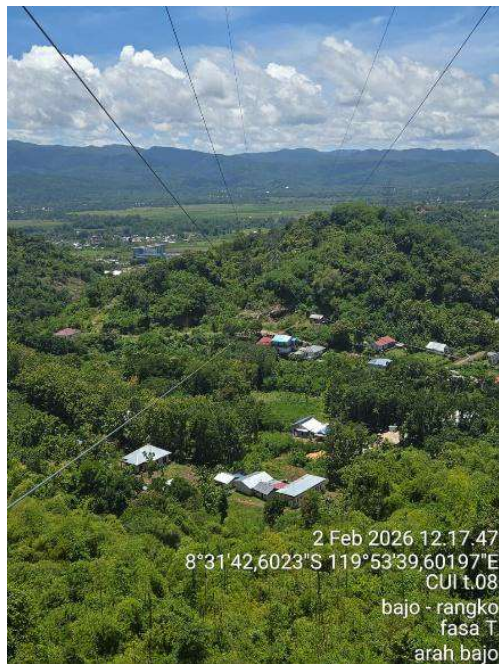
2.2.1 Komponen Jaringan SUTT

a. Primer

i. Pembawa Arus

Penghantar konduktor berfungsi sebagai media yang digunakan menghantarkan arus listrik pada SUTT. Konduktor dibentangkan dan

di topang dengan menggunakan tower yang diisolasi menggunakan isolator.



Gambar 2. 1 Konduktor 1
Sumber: Dokumentasi Pribadi



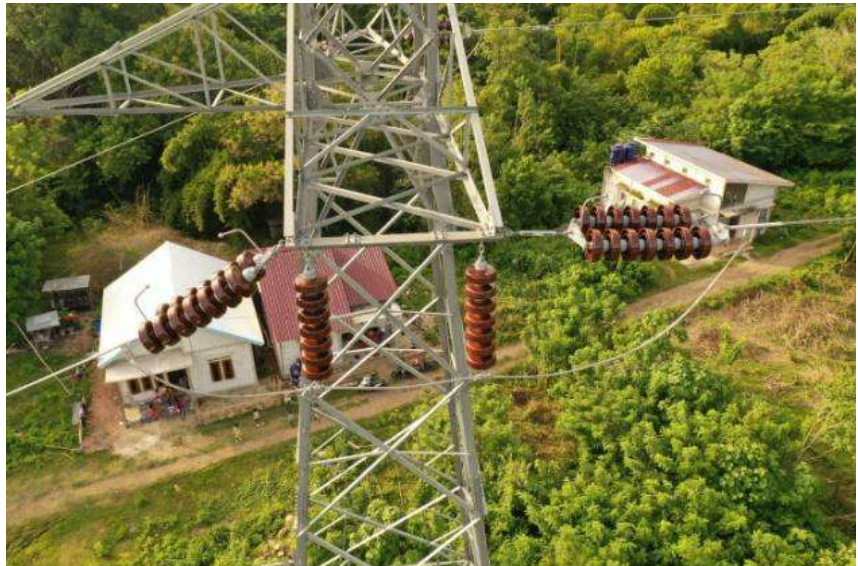
Gambar 2. 2 Konduktor 2
Sumber: Dokumentasi Pribadi

ii. Isolator

Isolator berfungsi digunakan untuk memisahkan bagian yang bertegangan dan tidak bertegangan. Bagian yang bertegangan adalah konduktor SUTT, sedangkan bagian yang tidak bertegangan adalah bagian tower SUTT.

Isolator memiliki dua karakteristik yaitu karakteristik mekanik dan dielektrik. Karakteristik mekanik, dimana isolator berfungsi untuk menopang beban tarikan konduktor, menopang beban berat isolator dan menopang beban berat konduktor. Sedangkan fungsi dielektrik adalah menahan apabila terdapat sambaran petir agar tidak terjadi sambaran di konduktor dan mampu menahan tegangan kerja.

Isolator terbuat dari bahan yang isolative ada tiga jenis yang digunakan sebagai bahan dasar untuk isolator SUTT yaitu isolator dengan bahan keramik, kaca dan polimer. Untuk kondisi polutan tinggi menggunakan isolator berbahan polimer. Untuk yang kondisi normal bisa menggunakan keramik dan kaca, untuk tegangan 70 kV menggunakan 7 keping isolator keramik yang terpasang pada SUTT Labuan Bajo – Rangko. (PT PLN (Persero) , 2024)



Gambar 2. 3 Isolator SUTT 70 kV

Sumber: Dokumentasi Pribadi

iii. Komponen Tower

- Pondasi

Pondasi merupakan struktur bawah pada SUTT yang dibuat menggunakan konstruksi beton bertulang untuk menyalurkan beban tower kedalam tanah dan menyebarkan beban tower kebidang yang lebih luas. Didalam pondasi terdapat konduktor yang berfungsi untuk jalur grounding yang digunakan untuk menghubungkan body ke pentanahan.



Gambar 2. 4 Pondasi Tower SUTT

Sumber: Dokumentasi Pribadi

- Stub

Stub merupakan sebuah baja yang diletakkan pada bagian bawah tower, dalam pemasangannya dipasang bersamaan dengan pondasi dan menyatu dengan pondasi. Stub merupakan bracing siku baja pertama yang kemudian akan dihubungkan ke bracing yang lain agar leg kaki tower bisa berdiri dengan kokoh dan dipasang dengan baut yang dipasang dengan lock nut.



Gambar 2. 5 Stub SUTT

Sumber: Dokumentasi Pribadi

- Halaman Tower

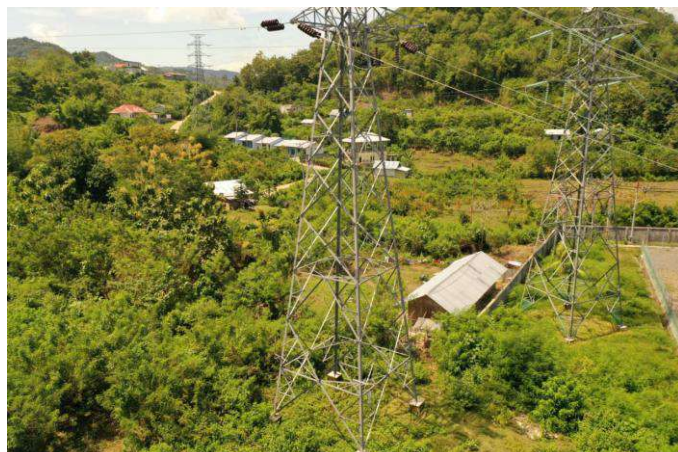
Halaman tower merupakan daerah tapak tower yang luasnya diukur dari proyeksi keatas tanah galian pondasi. Luas halaman tower tergantung dengan jenis tower yang digunakan. Untuk tower yang terpasang pada SUTT Sec. Labuan Bajo – Rangko, untuk tower suspension 12 M x 12 M, untuk tower tension 15 M x 15 M. Untuk tower dengan kondisi kritis seperti dekat dengan tebing atau jurang, halaman tower tersebut dilengkapi dengan dinding penahan tanah (DPT) agar ketika terkena cuaca hujan tidak terjadi penurunan tanah. Halaman tower juga menjadi tempat ditanamnya rod grounding pentanahan untuk membuang arus gangguan, sehingga harus dipastikan pada halaman tower SUTT tersebut bebas dari aktivitas warga karena termasuk daerah yang beresiko terkena tegangan tinggi dari jalur SUTT.



Gambar 2. 6 Halaman SUTT
Sumber: Dokumentasi Pribadi

- *Leg*

Bagian struktur utama tower lattice berfungsi untuk meneruskan beban yang dipikul oleh tower diteruskan ke pondasi melalui keempat kaki tower dan menjadi penghubung antara tower *body* dan stub. Leg pada SUTT berjumlah 4 leg yang terletak di sudut paling luar. Leg yang terpasang step bolt digunakan oleh petugas untuk memanjat tower untuk tujuan inspeksi atau pekerjaan. Terdapat 2 leg SUTT yang terpasang step bolt pada masing masing line 1 dan line 2.



Gambar 2. 7 Leg SUTT
Sumber: Dokumentasi Pribadi

- *Cross Arm*

Cross Arm merupakan bagian dari struktur tower yang berfungsi sebagai tempat tarikan isolator dan kawat tanah. *cross arm* terpasang pada 2 leg body tower, setiap fasa terpasang *cross arm* dan untuk GSW dan OPGW dipasang *cross arm* yang lebih kecil untuk tower lattice SUTT Labuan Bajo Rangko terdapat 2 line, sehingga jumlah *cross arm* yang terpasang 8 *cross arm*. *Cross Arm* terhubung dengan isolator dan konduktor, untuk jenis tower tension terdapat gaya tarik konduktor yang lebih tinggi dari pada tower suspension yang hanya menopang berat konduktor dan isolator. Untuk posisi *cross arm* pada SUTT Sec. Labuan Bajo - Rangko paling atas digunakan untuk GSW dan OPGW kemudian untuk yang kedua digunakan untuk fasa R, untuk yang ketiga digunakan untuk fasa S, Fasa T menggunakan *cross arm* yang paling bawah (PT PLN (Persero) , 2024)



Gambar 2. 8 *Cross Arm* SUTT
Sumber: Dokumentasi Pribadi

- Rambu Bahaya

Rambu bahaya sebagai tanda kepada masyarakat sekitar bahwa di tempat tersebut merupakan area berbahaya dan beresiko terkena tegangan listrik.



Gambar 2. 9 *Danger Plate*
Sumber: Dokumentasi Pribadi

- *Name Plate*

Name Plate berfungsi membantu petugas kelistrikan untuk mengetahui identitas tower SUTT tersebut, mulai dari nama section, nomor tower, urutan fasa.



Gambar 2. 10 *Name Plate*

Sumber: Dokumentasi Pribadi

- ACD

Anti Climb Device berfungsi sebagai penghalang panjat, dengan tujuan agar orang atau binatang tidak naik ke atas tower transmisi.

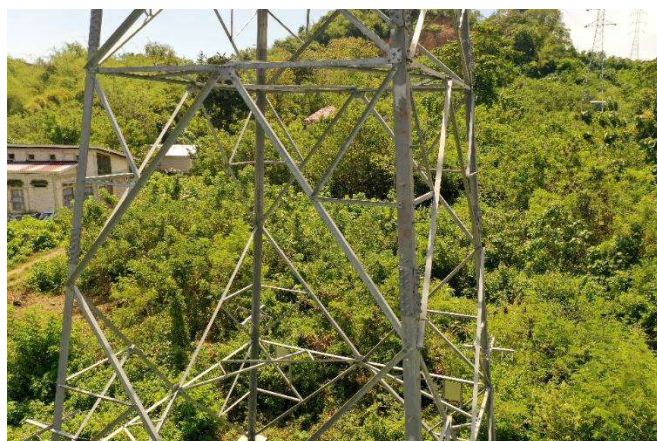


Gambar 2. 11 ACD pada SUTT

Sumber: Dokumentasi Pribadi

- *Step Bolt*

Terletak di bagian *leg* tower berfungsi sebagai alat bantu panjat petugas ketika melakukan inspeksi, pemeliharaan tower, perbaikan kondisi tower.



Gambar 2. 12 *Step Bolt* pada SUTT

Sumber: Dokumentasi Pribadi

b. Skunder

i. Proteksi

- GSW/OPGW

Sebuah kawat pentanahan yang dipasang paling atas dengan tujuan melindungi kawat penghantar fasa dari sambaran petir.



Gambar 2. 13 GSW dan OPGW
Sumber: Dokumentasi Pribadi

- Rod Pentanahan (*Grounding*)

Komponen pembumian pada sistem transmisi yang berfungsi untuk meneruskan arus gangguan listrik dari tower SUTT ke tanah. Terdiri dari konduktor baja dan konduktor tembaga dimasukkan dalam pipa pentanahan ditanam didekat dengan pondasi tiang. Baik buruknya kemampuan menyalurkan arus ke tanah dinyatakan oleh nilai tahanan pentanahan, yang dipengaruhi oleh kondisi tanah disekitar tower, tanah yang basah seperti sawah atau tanah liat cenderung memiliki hambatan yang kecil sehingga bagus untuk pentanahan, apabila rod dipasang pada tanah berbatu maka jumlah hambatannya akan besar, untuk mengatasi hal tersebut dipasang banyak rod pentanahan agar memperkecil tahanan pentanahannya. Semakin kecil nilai tahanan pentanahan maka semakin baik proteksi SUTT dalam mengamankan gangguan yang terjadi,

karena arus gangguan dapat dibuang sempurna di grounding rod tersebut.



Gambar 2. 14 Rod Pentanahan SUTT
Sumber: Dokumentasi Pribadi

- *Arching Device*

Dipasang pada ujung – ujung isolator sebagai proteksi tambahan pada saluran transmisi. Perangkat ini berupa 2 buah elektroda logam, dipasang dengan jarak tertentu dengan tujuan mengarahkan loncatan listrik ketika terjadi tegangan lebih. Dengan begitu isolator terlindungi dari kerusakan akibat *flashover*.



Gambar 2. 15 Arching pada Isolator SUTT

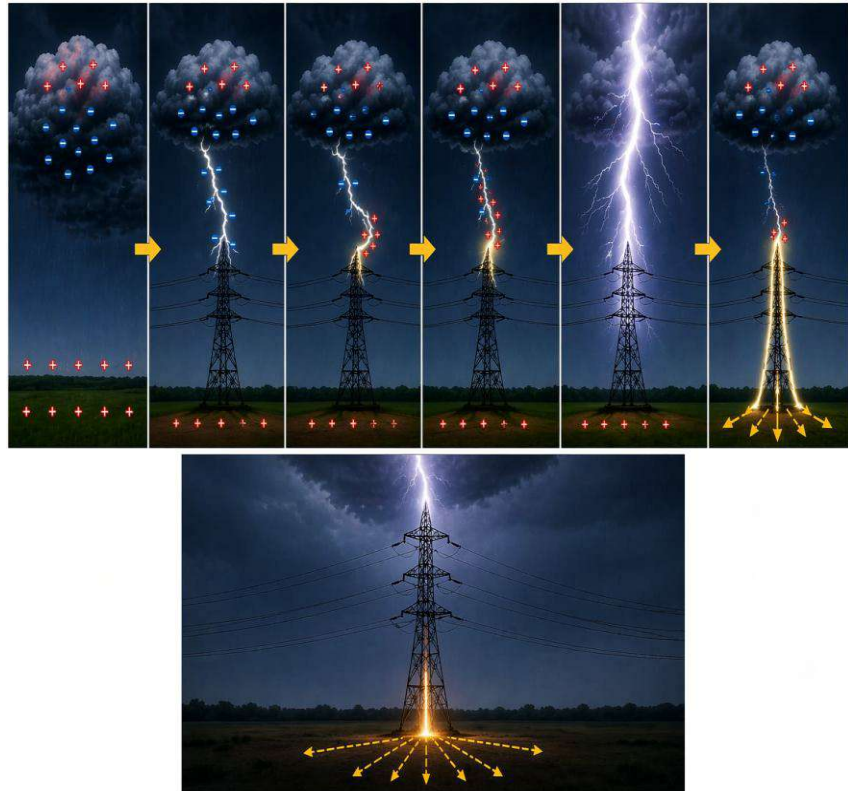
Sumber: Dokumentasi Pribadi

2.2.2 Teori Dasar Petir

Petir adalah fenomena alam berupa pelepasan muatan listrik antara awan dengan bumi atau antara awan dengan awan yang diakibatkan karena perbedaan potensial listrik yang besar. Akumulasi muatan listrik didalam awan menjadi penyebab hal tersebut terjadi, terutama pada awan cumulonimbus yang terbentuk dari adanya pergerakan partikel air dan es di atmosfer. Pada kondisi tertentu bagian bawah pada awan umumnya bermuatan negatif dan permukaan bumi yang bermuatan positif. Ketika nilai perbedaan potensial awan dan bumi mencapai titik tembus udara, maka terjadi pelepasan muatan listrik dalam bentuk sambaran petir.

Proses terjadinya petir dimulai dari pembentukan muatan di awan akibat tumbukan antara partikel air, es dan kristal es dalam awan sehingga terjadi pemisahan muatan listrik. Muatan negatif akan bergerak menuju bumi, dari objek di permukaan bumi seperti tower SUTT, muncul muatan positif yang bergerak ke atas. Ketika kedua muatan bertemu akan terjadi pelepasan arus besar dari bumi ke awan yang terlihat sebagai kilat sambaran petir.

Petir memiliki karakteristik utama yaitu memiliki arus impuls yang sangat besar, berikisar antara 5 kA hingga lebih dari 200 kA, dengan nilai arus rata rata sekitar 30 kA. Umumnya sambaran petir berlangsung sangat cepat sekitar puluhan hingga ratusan mikro detik.



Gambar 2. 16 Proses terjadinya sambaran petir pada SUTT

2.2.3 Gangguan Sambaran Petir pada Jaringan Transmisi

Mekanisme sambaran pada jaringan transmisi terdapat dua jenis yaitu :

- Sambaran langsung

Sambaran yang langsung menyambar dan mengenai konduktor fasa dan menyebabkan lonjakan arus dan tegangan yang sangat tinggi, hal ini dapat menyebabkan sistem isolasi transmisi menjadi gagal dan dapat memicu gangguan sistem.

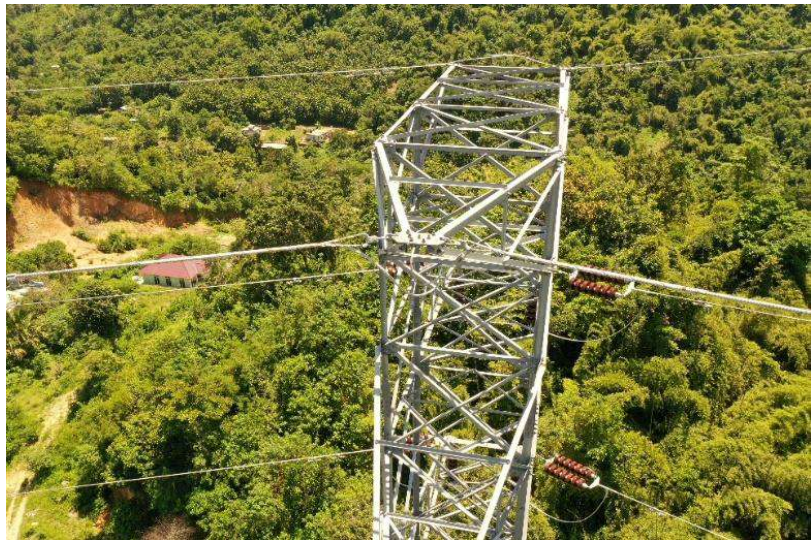
- Sambaran tidak langsung

Sambaran yang mengenai GSW akan mengalir ke bawah, akan tetapi kondisi pentanahan yang buruk bisa mengakibatkan tegangan pada tower akan meningkat karena gangguan petir tidak dapat dibuang dengan sempurna, hal ini akan menyebabkan *flashover* pada isolator SUTT dan memicu terjadinya gangguan.

2.2.4 Proteksi Petir Jaringan Transmisi

- GSW

Ground Shield Wire (GSW) atau biasa disebut kawat tanah adalah komponen utama proteksi petir pada sistem transmisi. Diletakkan paling atas pada tower SUTT dengan tujuan sebagai pelindung konduktor fasa dari sambaran petir, apabila ada sambaran petir maka GSW tersebut akan menangkap petir dan membuangnya ke tanah melalui *body* tower dan grounding tower.



Gambar 2. 17 GSW pada SUTT
Sumber: Dokumentasi Pribadi

- *Grounding* Tower

Grounding Tower ini sangat berperan penting sebagai jalur pembuangan arus petir yang ditangkap oleh GSW yang akan di bumikan, jika grounding tower ini putus maka tower akan kehilangan jalur untuk proteksi petirnya.



Gambar 2. 18 *Grounding* pada SUTT

Sumber: Dokumentasi Pribadi

- IGSW

Insulated Ground Shield Wire (IGSW) merupakan pengembangan dari sistem proteksi petir. Dimana petir yang ditangkap oleh GSW akan dibuang langsung menuju ke tanah tanpa melalui *body* tower, sehingga arus petir tidak banyak melalui *body* tower dan resiko untuk terjadi *back flashover* akan menurun.



Gambar 2. 19 IGSW pada SUTT

Sumber: Dokumentasi Pribadi

2.2.5 Prinsip Kerja IGSW

Prinsip kerja IGSW didasarkan pada konsep bahwa arus listrik akan mengalir melalui jalur dengan impedansi paling kecil. Dengan dipasangnya IGSW maka arus gangguan petir akan memilih melalui jalur pentanahan yang terisolasi dengan *body* tower. Hal tersebut akan menurunkan resiko gangguan sistem transmisi akibat sambaran petir. Tegangan pada tower akibat sambaran petir dapat dinyatakan sebagai:

$$V_{\text{tower}} = I \times R \quad (2.1)$$

Dengan adanya IGSW arus yang melalui I_{tower} akan menjadi lebih kecil karena nilai R menurun karena tidak melalui *body* tower, sehingga V_{tower} akan mengalami penurunan.

2.2.6 Back Flashover dan CFO Isolator

Ketika petir menyambar kawat tanah (GSW) atau puncak tower, arus petir akan mengalir menuju tanah melalui badan tower dan sistem pentanahan kakinya. Aliran arus yang sangat besar ini menimbulkan kenaikan potensial pada tower, sehingga tegangan pada badan tower dapat menjadi jauh lebih tinggi daripada tegangan pada konduktor fasa. Bila beda tegangan antara badan tower dan konduktor fasa melampaui ketahanan isolator, maka terjadi loncatan listrik dari sisi tower menuju konduktor fasa. Peristiwa ini disebut *back flashover*, yaitu kegagalan isolasi yang berawal dari sisi tower (bukan dari sisi konduktor seperti pada sambaran langsung).

Batas kemampuan isolator menahan tegangan impuls dinyatakan dengan nilai *Critical Flashover Voltage* (CFO), yaitu tegangan impuls pada saat isolator memiliki probabilitas 50% untuk mengalami flashover. Selama tegangan yang timbul pada isolator masih di bawah CFO, isolator mampu menahan tegangan lebih dan gangguan tidak terjadi. Sebaliknya, ketika tegangan melampaui CFO, back flashover akan terjadi dan memicu gangguan pada saluran transmisi. Oleh karena itu, nilai CFO menjadi

acuan utama dalam menilai apakah suatu sambaran petir akan menyebabkan gangguan atau tidak. (CIGRE Working Group 33.01, 1991)

Besarnya kenaikan tegangan tower sangat dipengaruhi oleh kualitas sistem pentanahan. Semakin tinggi nilai tahanan pentanahan kaki tower, semakin besar tegangan yang timbul saat arus petir dibuang ke tanah, sehingga risiko terjadinya back flashover semakin besar. Inilah alasan mengapa perbaikan sistem pentanahan menjadi faktor penting dalam mengurangi gangguan akibat sambaran petir (CIGRE Working Group 33.01, 1991) (IEEE, 1997)

2.2.7 Impedansi Surja Tower

Ketika arus petir yang sangat cepat mengalir melalui tower menuju tanah, tower tidak lagi berperilaku sebagai penghantar biasa dengan tahanan murni, melainkan sebagai saluran transmisi vertikal yang memiliki *impedansi surja* (surge impedance). Impedansi surja inilah yang menentukan seberapa besar tegangan yang timbul di sepanjang tower pada saat dilalui arus petir yang berbentuk gelombang impuls.

Nilai impedansi surja tower dipengaruhi oleh bentuk dan dimensi geometris tower, seperti tinggi tower serta jari-jari bagian atas, tengah, dan dasar tower. Tower dengan bentuk yang lebih ramping cenderung memiliki impedansi surja yang lebih besar. Dalam pemodelan gangguan petir, tower umumnya direpresentasikan sebagai elemen dengan impedansi surja tertentu agar respons tegangannya terhadap arus petir dapat dihitung secara akurat (CIGRE Working Group 33.01, 1991)

2.2.8 Resistansi Pentanahan Impuls dan Ionisasi Tanah

Ketika Nilai tahanan pentanahan tower yang diukur pada kondisi normal (arus rendah dan frekuensi rendah) berbeda dengan nilai tahanan pentanahan pada saat tower dilalui arus petir yang sangat besar. Pada kondisi arus petir, tahanan pentanahan yang berlaku disebut *resistansi impuls*, yang nilainya dapat lebih kecil daripada tahanan pada arus rendah.

Penurunan nilai ini disebabkan oleh peristiwa *ionisasi tanah*. Ketika arus petir yang besar mengalir ke elektroda pentanahan, medan listrik di sekitar elektroda menjadi sangat tinggi hingga melampaui ambang ketahanan tanah. Akibatnya, tanah di sekeliling elektroda terionisasi dan menjadi lebih konduktif, seolah-olah memperbesar ukuran elektroda secara efektif. Semakin besar arus petir, semakin kuat efek ionisasi ini, sehingga resistansi impuls semakin menurun.

Fenomena ini menjelaskan mengapa kenaikan tegangan pada isolator tidak sebanding lurus (tidak linier) terhadap kenaikan arus petir. Ketika arus petir bertambah besar, penurunan resistansi impuls akibat ionisasi tanah membuat kenaikan tegangan menjadi melandai atau cenderung menuju kondisi jenuh. Efek ionisasi tanah beserta parameter gradien ionisasinya menjadi bagian penting dalam pemodelan pentanahan terhadap arus petir (CIGRE Working Group 33.01, 1991) (IEEE, 1997)

2.2.9 Pemodelan Transien dengan EMTP

Electromagnetic Transients Program (EMTP) adalah perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisis fenomena transien elektromagnetik pada sistem tenaga listrik, termasuk tegangan lebih akibat sambaran petir. Fenomena petir berlangsung sangat cepat (dalam orde mikrodetik) sehingga tidak dapat dianalisis dengan perhitungan kondisi tunak biasa, melainkan memerlukan simulasi transien yang memperhitungkan perilaku gelombang berjalan pada saluran dan komponen sistem.

Dalam simulasi gangguan petir, komponen-komponen utama sistem transmisi dimodelkan sesuai karakteristik transiennya, antara lain konduktor dan kawat tanah sebagai saluran, tower sebagai impedansi surja, isolator dengan nilai ketahanan tegangan tertentu, serta sistem pentanahan. Arus petir dimodelkan sebagai sumber arus impuls dengan bentuk gelombang tertentu. Dengan pemodelan ini, EMTP dapat menghitung tegangan yang timbul pada isolator dan memperlihatkan apakah terjadi back flashover atau tidak, sehingga cocok digunakan untuk

mengevaluasi efektivitas sistem proteksi petir (CIGRE Working Group 33.01, 1991) (IEEE, 1997)

2.2.10 Standar Pentanahan Tower Transmisi

Nilai tahanan pentanahan tower diatur oleh standar yang berlaku di lingkungan PT PLN (Persero), yaitu SPLN T5.012:2020 tentang Pembedaan pada Gardu Induk dan Jaringan Transmisi, serta pedoman pemeliharaan SUTT yang tercantum dalam SK Direksi terkait. Standar ini menetapkan batas maksimum nilai tahanan pentanahan tower agar arus petir dapat disalurkan ke tanah dengan baik dan risiko back flashover dapat ditekan (PT PLN (Persero) , 2024)

Ketentuan nilai tahanan pentanahan dibedakan berdasarkan letak tower terhadap gardu induk. Lima tower pertama dari gardu induk disyaratkan memiliki nilai tahanan pentanahan yang lebih kecil, mengingat perannya yang lebih kritis dalam mencegah gangguan petir masuk ke peralatan gardu induk. Sementara itu, tower-tower berikutnya menggunakan batas nilai yang lebih besar. Pengukuran tahanan pentanahan untuk menilai kondisi lokal masing-masing tower dilakukan dengan metode tidak terhubung, yaitu dengan melepas sambungan pentanahan dari badan tower terlebih dahulu (PT PLN (Persero) , 2024)