

SKRIPSI

EVALUASI SISTEM PEMBUMIHAN *TOWER* TRANSMISI SALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI (SUTT) 150 kV WILAYAH SULAWESI SELATAN UNTUK MITIGASI GANGGUAN SAMBARAN PETIR

Disusun dan diajukan oleh:

**DENNIS CHRISTIAN SALAMBA
D041 19 1085**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

EVALUASI SISTEM PEMBUMIAN *TOWER* TRANSMISI SALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI (SUTT) 150 kV WILAYAH SULAWESI SELATAN UNTUK MITIGASI GANGGUAN SAMBARAN PETIR

Disusun dan diajukan oleh

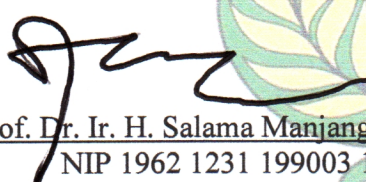
DENNIS CHRISTIAN SALAMBA
D041 19 1085

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 28 Agustus 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

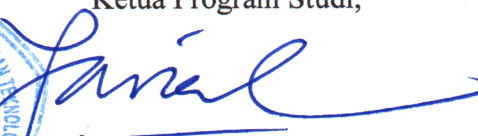
Pembimbing Pendamping,


Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T., IPM
NIP 1962 1231 199003 1 024


Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T
NIP 1976 0914 200801 1 006

Ketua Program Studi,




Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal Arya Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.
NIP 1975 0605 200212 1 004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Dennis Christian Salamba
NIM : D041191085
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

EVALUASI SISTEM PEMBUMIHAN *TOWER* TRANSMISI SALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI (SUTT) 150 kV WILAYAH SULAWESI SELATAN UNTUK MITIGASI GANGGUAN SAMBARAN PETIR

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan/atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala risiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 25 Agustus 2024

Yang Menyatakan


Dennis Christian Salamba

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus atas segala kasih dan tuntunanNya sehingga penulisan Tugas Akhir yang berjudul “Evaluasi Sistem Pembumian *Tower* Transmisi Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV Wilayah Sulawesi Selatan Untuk Mitigasi Gangguan Sambaran Petir” ini dapat terselesaikan dengan baik. Adapun Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Dengan segala ketulusan hati, penulis mempersembahkan Tugas Akhir ini kepada kedua orang tua penulis yang selalu memberikan semangat, dorongan dan motivasi kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini banyak terdapat tantangan dan kesulitan. Namun, berkat usaha dan doa serta bantuan dari berbagai pihak, sehingga pada akhirnya penulisan Tugas Akhir dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Daniel Eriyono Salamba (Ayah) dan Olviana (Bunda), atas kasih sayang dan kepedulian serta pengorbanan yang tiada henti untuk penulis, yang senantiasa mendoakan dan memberikan semangat, motivasi dan dukungan serta selalu mengupayakan yang terbaik untuk penulis selama menjalani masa perkuliahan.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T., IPM selaku pembimbing I dan Bapak Dr. Ikhlâs Kitta, S.T., M.T selaku pembimbing II yang telah meluangkan waktu dalam memberikan bimbingan, ide serta gagasan dalam penyelesaian skripsi ini.
3. Bapak Ir. Tajuddin Waris, M.T selaku penguji I dan Ibu Ir. Hasniaty A, S.T., M.T., Ph.D selaku penguji II yang telah memberikan masukan serta kritikan yang sangat membangun dalam perbaikan penulisan skripsi ini.
4. Bapak Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal Arya Samman, IPU, ACPE, APEC Eng., selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

5. Bapak Prof. Dr. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Bapak/Ibu Dosen serta segenap staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah membantu dan memberikan banyak ilmu serta pengalaman kepada penulis sejak awal perkuliahan hingga pengerjaan skripsi ini.
7. Ketiga saudara penulis, Djeremy, Annabel dan Devano, yang menjadi semangat dan alasan penulis berjuang sampai mendapatkan gelar sarjana.
8. Tim kajian proteksi petir Universitas Hasanuddin, Kak Arham Amri, Kak Athiya Nisa Qonitin, Sahid Pangampe dan Riskal Toding, yang telah membantu penulis dan menyelesaikan skripsi ini.
9. Teman-teman seperjuangan Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan yang menemani dan membantu penulis dalam menjalani kegiatan riset dan penelitian.
10. Teman-teman “TR19GER” yang selama ini telah membantu, mendukung dan kebersamai penulis selama menjalani perkuliahan di kampus Teknik. Teman-teman yang memberikan warna di setiap proses yang dilalui dan memaknai arti dari “*Kita Kuat Bersama*”.
11. Teman-teman Posko 28 KKN Bontoramba yang telah kebersamai masa-masa KKN dan menemani penulis di masa akhir perkuliahan.
12. Teman-teman Heroes Makassar secara khusus tim Multimedia Heroes yang telah menjadi keluarga rohani, yang menjadi tempat bertumbuh bersama dan menjadi bagian yang tidak terlupakan dalam proses perjalanan penulis semasa perkuliahan.
13. Mizka Family, yang menjadi rumah dan keluarga kedua di kampus yang selalu memberikan semangat dan momen yang tidak terlupakan semasa perkuliahan.
14. Adinda Wiranti Yunita Suharto yang telah menjadi teman terbaik semasa perkuliahan, yang selalu mendorong dan memotivasi penulis untuk selalu berjuang mengerjakan skripsi dan yang telah membantu penulis melewati masa-masa sulit dalam pengerjaan skripsi ini. *Jeongmal Gomawoyo!*

15. Abdul Salam yang telah menjadi teman seperjuangan sejak awal perkuliahan, seorang teman sekaligus mentor, yang selalu memberikan dorongan dan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan penelitian tugas akhir ini.
16. Teman-teman Kos Hijau yaitu Kak Rani, Kak Clara, Gebby, Agung, Noel dan Ivan yang selalu memberikan semangat dan dukungan kepada penulis.
17. Pemilik NIM 44219023 yang pernah menjadi bagian dari perjalanan penulis melewati masa-masa perkuliahan. Terima kasih untuk semangat, dukungan dan doa yang selama ini diberikan kepada penulis. Terima kasih telah mengajarkan banyak hal dan pernah menjadi alasan penulis untuk berjuang.
18. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah membantu dan memberikan dukungan kepada penulis selama proses pengerjaan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan tugas akhir ini. Oleh karena itu segala bentuk saran dan kritik yang bersifat membangun sangat penulis harapkan untuk penyempurnaan skripsi ini. Akhir kata penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat dan menambah wawasan bagi pembaca.

“Sebab masa depan itu pasti ada, dan harapanmu tidak akan musnah”

- Amsal 23:18 -

Gowa, 1 Agustus 2024

Penulis

ABSTRAK

DENNIS CHRISTIAN SALAMBA. EVALUASI SISTEM PEMBUMIAN TOWER TRANSMISI SALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI (SUTT) 150 kV WILAYAH SULAWESI SELATAN UNTUK MITIGASI GANGGUAN SAMBARAN PETIR (dibimbing oleh Salama Manjang dan Ikhlas Kitta)

Sambaran petir yang langsung mengenai kawat tanah dan menara adalah ancaman serius bagi sistem tenaga listrik dengan jaringan yang luas, karena dapat menyebabkan kerugian besar bagi penyedia layanan kelistrikan. Ketika petir menyambar sistem transmisi listrik, hal ini akan menimbulkan tegangan lebih. Tegangan lebih ini dapat membahayakan peralatan listrik jika dibiarkan mengalir dalam sistem dan tersalurkan ke beban. Oleh karena itu dibutuhkan suatu sistem pembumian menara transmisi yang terhubung dengan sistem proteksi menara transmisi untuk melindungi menara transmisi dari bahaya yang timbul akibat sambaran petir. Berdasarkan PUIL 2011, standar IEC dan SNI untuk nilai tahanan pembumian yang baik adalah kurang dari atau sama dengan 5 ohm untuk jaringan transmisi 70 kV, kurang dari atau sama dengan 10 ohm untuk jaringan transmisi 150 kV dan kurang dari atau sama dengan 15 ohm untuk jaringan transmisi 500 kV. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan evaluasi terhadap sistem pembumian maupun sistem proteksi yang digunakan saat ini pada jaringan transmisi 150 kV di Sulawesi Selatan serta memberikan rekomendasi desain sistem pembumian yang efektif dan efisien untuk diterapkan pada menara transmisi. Evaluasi dilakukan dengan melakukan simulasi sambaran petir pada menara transmisi dengan *software* ATPDraw. Evaluasi menunjukkan bahwa masih banyak menara transmisi pada jaringan transmisi di Sulawesi Selatan yang belum dilengkapi dengan sistem pembumian yang memadai. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada sambaran petir sebesar 42 kA, tegangan yang terukur pada GSW adalah sebesar 820,30 kV dan tegangan yang terukur pada fasa adalah 782,39 kV. Hal ini membuat tegangan yang terukur pada menara ataupun pada konduktor fasa melebihi dari BIL isolator sehingga dapat berpotensi menyebabkan *back flashover* pada menara. Sementara itu hasil simulasi juga menunjukkan bahwa sistem proteksi saat ini yang paling efektif dalam melindungi sistem tenaga listrik dari bahaya yang ditimbulkan oleh sambaran petir adalah *Transmission Line Arrester* (TLA). Namun TLA sangat mahal dan oleh karena itu direkomendasikan sistem proteksi *direct grounding counterpoise* secara radial.

Kata Kunci: Sambaran Petir, Pembumian, ATPDraw, *Direct Grounding Counterpoise*

ABSTRACT

DENNIS CHRISTIAN SALAMBA. *EVALUATION OF THE EARTHING SYSTEM OF THE 150 kV HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINE TOWER IN SOUTH SULAWESI REGION FOR LIGHTNING STRIKE MITIGATION* (supervised by Salama Manjang and Ikhlas Kitta)

Lightning strikes that directly hit ground wires and towers are a serious threat to power systems with extensive networks, as they can cause huge losses to electricity service providers. When lightning strikes the electricity transmission system, it creates overvoltage. This overvoltage can endanger electrical equipment if allowed to flow in the system and be transmitted to the load. Therefore, a transmission tower earthing system is needed which is connected to the transmission tower protection system to protect the transmission tower from hazards arising from lightning strikes. Based on PUIL 2011, IEC and SNI standards for good earthing resistance values are less than or equal to 5 ohms for 70 kV transmission networks, less than or equal to 10 ohms for 150 kV transmission networks and less than or equal to 15 ohms for 500 kV transmission networks. This study aims to provide an evaluation of the earthing system and protection system currently used in the 150 kV transmission network in South Sulawesi and provide recommendations for an effective and efficient earthing system design to be applied to transmission towers. The evaluation was carried out by simulating lightning strikes on transmission towers with ATPDraw software. The simulation results show that at a lightning strike of 42 kA, the measured voltage at GSW is 820.30 kV and the measured voltage on the phase is 782.39 kV. This makes the voltage measured on the tower or on the phase conductor exceed the BIL of the insulator so that it can potentially cause back flashover on the tower. The evaluation also shows that there are still many transmission towers in the transmission network in South Sulawesi that are not equipped with an adequate earthing system. Meanwhile, the simulation results show that the current protection system that is most effective in protecting the electric power system from the danger posed by lightning strikes is the Transmission Line Arrester (TLA). However, TLA is very expensive and therefore a radial direct grounding counterpoise protection system is recommended.

Keywords: Lightning strikes, earthing, ATPDraw, direct grounding counterpoise

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Ruang Lingkup	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	6
2.2 Sistem Transmisi Tenaga Listrik.....	7
2.3 Pembumian dan Tahanan Pembumian	13
2.4 Tahanan Jenis Tanah	16
2.5 Gelombang Impuls	17
2.6 Gangguan Petir Pada Saluran Transmisi	19
2.7 ATP Draw.....	31
2.8 Penelitian Terdahulu.....	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	36
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	36
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	36
3.3 Objek Penelitian	37
3.4 Jenis Pengambilan Data.....	39
3.5 Variabel Penelitian	39
3.6 Teknik Pengumpulan Data	40
3.7 Prosedur Penelitian.....	42
3.8 Data Penelitian.....	42
3.9 Representasi Model Rangkaian pada <i>Software</i> ATP Draw	45
3.10 Diagram Alir Penelitian.....	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	52
4.1 Data Kondisi Jalur Transmisi SUTT 150 kV Wilayah Sulawesi Selatan.....	52

4.2	Proteksi Petir <i>Tower</i> SUTT pada Sistem Sulawesi Selatan.....	55
4.3	Hasil Simulasi Kondisi <i>Existing</i> pada Jalur Transmisi SUTT 150 kV	63
4.4	Hasil Validasi Lapangan.....	119
4.5	Evaluasi Sistem Pembumian <i>Tower</i> SUTT 150 kV pada Jaringan Sulawesi Selatan Terhadap Sambaran Petir	120
4.6	Rekomendasi Sistem Proteksi Petir pada Saluran Udara Tegangan Tinggi	122
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		125
5.1	Kesimpulan.....	125
5.2	Saran	126
DAFTAR PUSTAKA		127
LAMPIRAN.....		130

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Diagram satu garis sistem tenaga listrik sederhana.....	6
Gambar 2 Menara transmisi tenaga listrik untuk (a) saluran tunggal; (b) saluran ganda	10
Gambar 3 Isolator pasak (a); isolator pos saluran (b); isolator gantung (c).....	12
Gambar 4 Penampang kawat penghantar ACSR	13
Gambar 5 Alat pembumian	15
Gambar 6 (a) Impuls petir; (b) Impuls hubung-buka; (c) Impuls terpotong	17
Gambar 7 Bentuk tegangan impuls	18
Gambar 8 Proses terjadinya petir	20
Gambar 9 Ilustrasi sambaran langsung	21
Gambar 10 Ilustrasi sambaran tidak langsung	22
Gambar 11 Kawat GSW.....	27
Gambar 12 Jumper GSW	27
Gambar 13 <i>Arcing Horn</i>	28
Gambar 14 <i>Transmission Line Arrester</i>	29
Gambar 15 Pentanahan <i>tower</i> dengan <i>direct grounding</i>	30
Gambar 16 Pentanahan <i>tower</i> dengan <i>counterpoise</i>	30
Gambar 17 Metode Pentanahan I-GrASs.....	31
Gambar 18 <i>Software</i> ATP Draw	33
Gambar 19 <i>Digital Earth Tester</i>	36
Gambar 20 Alat pendeteksi titik koordinat	37
Gambar 21 Tang <i>Ampere</i>	37
Gambar 22 Konfigurasi kawat dan menara transmisi.....	38
Gambar 23 Konstruksi pentanahan menara transmisi 150 kV (tampak atas)	38
Gambar 24 Pengukuran dengan metode tiga titik	40
Gambar 25 Pengujian tahanan pembumian <i>tower</i>	41
Gambar 26 Rangkaian pengukuran tahanan pembumian dengan <i>earth-tester</i>	41
Gambar 27 Menara Transmisi dan Rangkaian Ekuivalen SUTT 150 kV Jaringan Transmisi Sulawesi Selatan	43
Gambar 28 Isolator kaca SUTT 150 kV	45
Gambar 29 Model menara <i>Pyramid Double Circuit</i>	46
Gambar 30 Model rangkaian menara transmisi 150 kV pada <i>software</i> ATPDraw tanpa TLA	46
Gambar 31 Model konduktor fasa pada <i>software</i> ATP Draw	47
Gambar 32 Model kawat tanah pada <i>software</i> ATP Draw	47
Gambar 33 Model isolator pada <i>software</i> ATP Draw.....	47
Gambar 34 Model pentanahan menara pada <i>software</i> ATP Draw	48
Gambar 35 Parameter Model LCC	48
Gambar 36 Parameter Data LCC	49
Gambar 37 Diagram Alir Penelitian	51
Gambar 38 Sambaran Paparan Petir Jaringan Sulawesi Selatan.....	54
Gambar 39 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Bakaru – Pare-Pare	63
Gambar 40 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 189 ..	64
Gambar 41 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 91	65

Gambar 42 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Balusu – Pangkep	66
Gambar 43 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 383 ..	66
Gambar 44 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 400 ..	67
Gambar 45 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Bulukumba – Tanete	68
Gambar 46 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Tanete – Sinjai.....	68
Gambar 47 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Sinjai – Bone	69
Gambar 48 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 283 ..	70
Gambar 49 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 278 ..	70
Gambar 50 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Jeneponto – Bantaeng New	71
Gambar 51 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Bantaeng New – Bantaeng Switching.....	72
Gambar 52 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Bantaeng Switching – Bulukumba.....	73
Gambar 53 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 85	73
Gambar 54 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 50	74
Gambar 55 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Maros – Daya Baru.....	75
Gambar 56 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) Daya Baru – Bolangi	76
Gambar 57 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) Bolangi – Sungguminasa	76
Gambar 58 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 127 ..	77
Gambar 59 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 13	77
Gambar 60 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Kima – Tello.....	78
Gambar 61 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 95	79
Gambar 62 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 70	79
Gambar 63 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Pare-Pare – Balusu	80
Gambar 64 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 264 ..	81
Gambar 65 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 255 ..	81
Gambar 66 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Pare-Pare – Sidrap	82
Gambar 67 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 51	83
Gambar 68 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 10	83
Gambar 69 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Pare-Pare – Suppa	84
Gambar 70 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 5	85
Gambar 71 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 23	85
Gambar 72 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Punagaya – Tanjung Bunga.....	86
Gambar 73 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 150 ..	87

Gambar 74 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Sengkang – Sidrap.....	87
Gambar 75 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 121 ..	88
Gambar 76 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 33	89
Gambar 77 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Sengkang – Siwa	90
Gambar 78 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 105 ..	90
Gambar 79 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 55	91
Gambar 80 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Sengkang – Soppeng	92
Gambar 81 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 23	92
Gambar 82 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 25	93
Gambar 83 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Sidrap - Makale	94
Gambar 84 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 85	94
Gambar 85 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 125 ..	95
Gambar 86 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Sidrap – PLTB Sidrap	95
Gambar 87 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV PLTB Sidrap – Balusu.....	96
Gambar 88 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Balusu – Maros.....	97
Gambar 89 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 158 ..	98
Gambar 90 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 42	98
Gambar 91 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Sidrap – Soppeng.....	99
Gambar 92 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 103	100
Gambar 93 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 65 ..	100
Gambar 94 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Soppeng – Bone.....	101
Gambar 95 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 127	102
Gambar 96 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 119	102
Gambar 97 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Sungguminasa – Lanna	103
Gambar 98 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 35 ..	104
Gambar 99 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 20 ..	104
Gambar 100 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Sungguminasa – Tallasa	105
Gambar 101 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 84	106
Gambar 102 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 43	106
Gambar 103 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Sungguminasa – Tanjung Bunga.....	107
Gambar 104 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 5 ..	108
Gambar 105 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 33	108
Gambar 106 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Tallasa – Punagaya	109
Gambar 107 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Punagaya – Jeneponto	110

Gambar 108 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 114.....	110
Gambar 109 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 60	111
Gambar 110 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Tello – Panakukang.....	112
Gambar 111 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 5 ..	112
Gambar 112 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Tello – Sungguminasa	113
Gambar 113 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 32	114
Gambar 114 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 16	114
Gambar 115 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Tello – Tello Lama	115
Gambar 116 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 5 ..	116
Gambar 117 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 13	116
Gambar 118 Paparan petir (kiri) dan pentanahan penghantar (kanan) transmisi 150 kV Tuppu – Polmas.....	117
Gambar 119 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 11	118
Gambar 120 Plot simulasi sambaran pada konduktor GSW dan fasa <i>Tower</i> 6 ..	118
Gambar 121 Grafik tegangan pada konduktor fasa saat menara tersambar petir pada masing-masing sistem proteksi petir	123
Gambar 122 Waktu peralihan tegangan lebih pada konduktor fasa saat menara tersambar petir pada masing-masing proteksi petir	123
Gambar 123 Sistem <i>grounding counterpoise radial</i>	124

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Batas tegangan pada jaringan transmisi	7
Tabel 2. Tipe dan fungsi <i>tower</i> transmisi 150 kV	10
Tabel 3. Tahanan jenis tanah.....	16
Tabel 4. Penelitian yang relevan	34
Tabel 5. Nilai impedansi menara bertingkat	44
Tabel 6. Nilai resistansi menara bertingkat.....	44
Tabel 7. Nilai induktansi menara bertingkat	44
Tabel 8. Jenis konduktor fasa yang digunakan	45
Tabel 9. Jalur SUTT 150 kV pada Jaringan Transmisi Sulawesi Selatan.....	53
Tabel 10. Data sistem proteksi penghantar 150 kV Bakar – Pare-pare	55
Tabel 11. Data sistem proteksi petir penghantar 150 kV Balusu – Pangkep	55
Tabel 12. Data sistem proteksi petir penghantar 150 kV Jeneponto – Bulukumba.....	56
Tabel 13. Data sistem proteksi petir penghantar 150 kV Maros – Sungguminasa.....	57
Tabel 14. Data sistem proteksi petir penghantar 150 kV Pare-Pare – Balusu	57
Tabel 15. Data sistem proteksi petir penghantar 150 kV Pare-Pare – Sidrap	57
Tabel 16. Data sistem proteksi petir penghantar 150 kV Punagaya – Tj Bunga ..	58
Tabel 17. Data sistem proteksi petir penghantar 150 kV Sengkang – Sidrap.....	59
Tabel 18. Data sistem proteksi petir penghantar 150 kV Sengkang – Siwa	59
Tabel 19. Data sistem proteksi petir penghantar 150 kV Sidrap – Makale.....	59
Tabel 20. Data sistem proteksi petir penghantar 150 kV Sidrap – Maros	60
Tabel 21. Data sistem proteksi petir penghantar 150 kV Sungguminasa – Lanna	60
Tabel 22. Data sistem proteksi penghantar 150 kV Sungguminasa – Tallasa	60
Tabel 23. Data sistem proteksi penghantar 150 kV Tallasa – Jeneponto.....	61
Tabel 24. Data sistem proteksi penghantar 150 kV Tello – Panaklukang	61
Tabel 25. Data sistem proteksi penghantar 150 kV Tello – Sungguminasa	62
Tabel 26. Data sistem proteksi penghantar 150 kV Tuppu – Polmas	62
Tabel 27. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Bakar – Pare-Pare.....	64
Tabel 28. Data <i>existing tower</i> simulasi transmisi Balusu – Pangkep.....	66
Tabel 29. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Bulukumba – Bone.....	70
Tabel 30. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Bulukumba – Bone.....	73
Tabel 31. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Maros – Sungguminasa ..	77
Tabel 32. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Pangkep – Tello.....	79
Tabel 33. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Pare-Pare – Balusu	81
Tabel 34. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Pare-Pare – Sidrap	83
Tabel 35. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Pare-Pare – Suppa	84
Tabel 36. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Punagaya – Tanjung Bunga.....	86
Tabel 37. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Sengkang – Sidrap.....	88
Tabel 38. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Sengkang – Siwa	90
Tabel 39. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Sengkang – Soppeng	92
Tabel 40. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Sidrap – Makale.....	94
Tabel 41. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Sidrap – Maros	97

Tabel 42. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Sidrap – Soppeng.....	99
Tabel 43. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Soppeng – Bone.....	101
Tabel 44. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Sungguminasa – Lanna ..	103
Tabel 45. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Sungguminasa – Talla ..	105
Tabel 46. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Sungguminasa – Tanjung Bunga	107
Tabel 47. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Tallasa – Jeneponto	110
Tabel 48. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Tello - Panakukang.....	112
Tabel 49. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Tello – Sungguminasa..	114
Tabel 50. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Tello – Tello Lama	115
Tabel 51. Data <i>existing tower</i> simulasi pada transmisi Tuppu – Polmas.....	117
Tabel 52. Hasil pengukuran pentanahan <i>tower</i> segmen Bantaeng New – Bantaeng Switching.....	119
Tabel 53. Hasil pengukuran pentanahan <i>tower</i> segmen Pangkep – Tonasa	119
Tabel 54. Evaluasi <i>tower</i> yang berpotensi terjadi <i>back flashover</i> pada tiap jalur transmisi	121
Tabel 55. Perbandingan kenaikan tegangan konduktor fasa pada masing- masing proteksi petir dengan nilai arus petir yang berubah-ubah.....	122

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 <i>Single Line Diagram</i> (SLD) Sistem Kelistrikan SULBAGSEL.....	131
Lampiran 2 Data Frekuensi Sambaran Petir di Wilayah Sulawesi Selatan (2021- 2023).....	132
Lampiran 3 Konstruksi <i>Tower</i> Transmisi Tipe AA Sulawesi Selatan	133
Lampiran 4 Spesifikasi <i>Transmission Line Arrester</i> (TLA)	134
Lampiran 5 Data Kerapatan Paparan petir (kiri) Sulawesi Tahun 2021	136
Lampiran 6 Data Kerapatan Paparan petir (kiri) Sulawesi Tahun 2022	139
Lampiran 7 Data Kerapatan Paparan petir (kiri) Sulawesi Tahun 2023	142
Lampiran 8 Standar BIL menurut IEEE STD C57.12.00-1993	145
Lampiran 9 Data Eksisting Transmisi Bakarlu – Pare-pare.....	146
Lampiran 10 Data Eksisting Transmisi Balusu – Pangkep.....	153
Lampiran 11 Data Eksisting Transmisi Bulukumba - Bone	158
Lampiran 12 Data Eksisting Transmisi Jeneponto – Bulukumba.....	169
Lampiran 13 Data Eksisting Transmisi Maros – Sungguminasa	173
Lampiran 14 Data Eksisting Transmisi Pangkep – Tello.....	177
Lampiran 15 Data Eksisting Transmisi Pare-Pare – Balusu	181
Lampiran 16 Data Eksisting Transmisi Pare-Pare – Sidrap.....	184
Lampiran 17 Data Eksisting Transmisi Pare-Pare – Suppa	186
Lampiran 18 Data Eksisting Transmisi Punagaya – Tanjung Bunga	187
Lampiran 19 Data Eksisting Transmisi Sengkang – Sidrap.....	192
Lampiran 20 Data Eksisting Transmisi Sengkang – Siwa	197
Lampiran 21 Data Eksisting Transmisi Sengkang – Soppeng	203
Lampiran 22 Data Eksisting Transmisi Sidrap – Makale	206
Lampiran 23 Data Eksisting Transmisi Sidrap – Maros	215
Lampiran 24 Data Eksisting Transmisi Sidrap – Soppeng	226
Lampiran 25 Data Eksisting Transmisi Soppeng – Bone	231
Lampiran 26 Data Eksisting Transmisi Sungguminasa – Lanna	235
Lampiran 27 Data Eksisting Transmisi Sungguminasa – Tallasa.....	237
Lampiran 28 Data Eksisting Transmisi Sungguminasa – Tanjung Bunga	240
Lampiran 29 Data Eksisting Transmisi Tallasa – Jeneponto	242
Lampiran 30 Data Eksisting Transmisi Tello – Panakukang.....	246
Lampiran 31 Data Eksisting Transmisi Tello – Sungguminasa.....	247
Lampiran 32 Data Eksisting Transmisi Tello – Tello Lama.....	249
Lampiran 33 Data Eksisting Transmisi Tuppu – Polmas.....	250
Lampiran 34 Dokumentasi Validasi Lapangan.....	253

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
AAC	<i>All Aluminium Conductor</i>
AAAC	<i>All Aluminium Alloy Conductor</i>
ACCC	<i>Aluminium Conductor Composite Core</i>
ACSR	<i>Aluminium Conductor Steel Reinforced</i>
ACAR	<i>Aluminium Conductor Alloy Reinforced</i>
BIL	<i>Basic Insulation Level</i>
BFO	<i>Back Flashover</i>
BMKG	Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika
DG	<i>Direct Grounding</i>
GI	Gardu Induk
GSW	<i>Ground Steel Wire</i>
Hz	<i>Hertz</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
kA	Kilo Ampere
kV	Kilo Volt
ms	<i>millisecond</i>
MRG	<i>Multi Rod Grounding</i>
OPGW	<i>Optic Ground Wire</i>
PUIL	Persyaratan Umum Instalasi Listrik
SF	<i>Shielding Failures</i>
SNI	Standar Nasional Indonesia
SUTT	Saluran Udara Tegangan Tinggi
SUTET	Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi
TLA	<i>Transmission Line Arrester</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jaringan transmisi SUTT 150 kV memegang peranan yang sangat penting dalam proses penyaluran daya listrik dari pusat-pusat pembangkit ke pusat distribusi yang kemudian didistribusikan ke pusat-pusat beban. Agar dapat melayani kebutuhan tersebut maka diperlukan suatu sistem transmisi tenaga listrik yang baik dan andal dengan tingkat keamanan yang juga memadai agar dapat mengantisipasi setiap gangguan yang mungkin terjadi. Salah satu gangguan yang sering terjadi pada saluran transmisi adalah terjadinya sambaran langsung petir pada menara transmisi. Hal ini dikarenakan penyaluran daya listrik dengan saluran udara tegangan tinggi (SUTT) terkadang melalui daerah dengan potensi sambaran petir yang cukup tinggi seperti pada area terbuka, daerah pegunungan, maupun pesisir pantai.

Wilayah Sulawesi Selatan merupakan daerah dengan intensitas sambaran petir yang cukup tinggi. Berdasarkan data dari BMKG Sulawesi Selatan, setidaknya terdapat 4 daerah dengan intensitas jumlah sambaran petir yang tinggi selama 3 tahun terakhir (2021-2023). Keempat daerah tersebut diantaranya Kabupaten Bone (1.383.898 sambaran), Kabupaten Gowa (455.852 sambaran), Kabupaten Maros (884.625 sambaran) dan Kabupaten Sinjai (195.771 sambaran). Hal ini tentunya dapat meningkatkan risiko gangguan pada sistem transmisi tenaga listrik akibat sambaran petir pada menara atau disekitarnya. Sambaran petir yang langsung menyambar kawat tanah dan menara merupakan ancaman yang sangat serius dalam sistem tenaga listrik yang jaringannya tersebar luas karena dapat mengakibatkan kerugian besar pada penyedia layanan kelistrikan. Sambaran petir yang mengenai sistem transmisi listrik akan menimbulkan tegangan lebih pada sistem. Tegangan lebih ini dapat membahayakan peralatan-peralatan listrik apabila dibiarkan mengalir pada sistem dan tersalurkan ke beban. Tegangan lebih adalah tegangan yang terjadi pada kawat penghantar tegangan tinggi, oleh karena adanya penyaluran energi secara tiba-tiba pada kawat tersebut. Tegangan tersebut hanya dapat ditahan

untuk waktu terbatas dimana tegangan lebih tersebut merupakan tegangan peralihan (*transient*) dari kondisi abnormal ke kondisi normal (Warsono, 2020).

Untuk melindungi kawat-kawat fasa dari sambaran petir pada *tower* SUTT dipasang suatu komponen yaitu kawat tanah (*ground wire*). Kawat tanah merupakan bagian dari sistem pembumian pada *tower* SUTT. Sistem pembumian yang efektif adalah salah satu cara untuk mengurangi dampak negatif sambaran petir pada menara transmisi. Tujuan dari pembumian adalah menghubungkan bagian yang seharusnya tidak dialiri arus listrik pada peralatan listrik dengan suatu massa yang besar. Hal ini untuk memastikan jika terjadi gangguan maka arus gangguan yang mengalir pada bagian yang seharusnya tidak dialiri arus dapat cepat disalurkan ke bumi sehingga peralatan yang dibumikan tidak akan mempunyai tegangan yang lebih besar dari tegangan pembumian sesuai standar. Pembumian atau biasa disebut dengan pentanahan pada menara transmisi menjadi hal yang sangat penting bagi keberlanjutan sistem tenaga listrik yang optimal. Pembumian yang buruk pada menara transmisi dapat menyebabkan berbagai masalah yang serius, diantaranya bahaya keselamatan bagi para pekerja dan masyarakat sekitar akibat risiko sengatan listrik, kerusakan pada peralatan dan komponen listrik karena lonjakan arus atau tegangan lebih, serta dapat menurunkan kualitas daya yang diterima oleh konsumen. Oleh karena itu, memastikan sistem pembumian yang memadai adalah salah satu langkah krusial untuk menjaga keamanan dan keandalan sistem tenaga listrik.

Berdasarkan PUIL 2011, standar IEC dan SNI untuk nilai tahanan pembumian yang baik adalah kurang dari atau sama dengan 5 ohm untuk jaringan transmisi 70 kV, kurang dari atau sama dengan 10 ohm untuk jaringan transmisi 150 kV dan kurang dari atau sama dengan 15 ohm untuk jaringan transmisi 500 kV. Apabila terjadi nilai tahanan pembumian yang lebih dari nilai yang disarankan maka pembumian berpotensi tidak dapat menyalurkan arus gangguan akibat sambaran petir dan akan mengakibatkan kerusakan pada instalasi listrik yang terpasang. Untuk mempertahankan agar nilai tahanan pembumian kaki menara transmisi kurang dari atau sama dengan yang disarankan, maka perlu dilakukan pengukuran dan perawatan secara berkala (Cekdin & Barlian, 2013).

Pentingnya sistem pembumian yang bekerja secara efektif pada menara transmisi mendorong dilakukannya evaluasi pada sistem pembumian yang ada pada jaringan transmisi saat ini. Evaluasi sistem pembumian sangat diperlukan untuk mengidentifikasi kelemahan dan potensi masalah yang dapat terjadi pada sistem tersebut. Hal ini penting untuk memastikan bahwa sistem pembumian yang ada dapat berfungsi secara optimal dalam melindungi jaringan transmisi SUTT dari gangguan sambaran petir. Saat ini, teknologi dan metode pembumian yang digunakan pada sistem tenaga listrik terus mengalami perkembangan. Oleh karena itu, perlu diadakan suatu kajian yang kompeherensif untuk dapat mengaplikasikan teknologi terbaru yang dapat meningkatkan efektivitas sistem pembumian pada jaringan transmisi.

Berdasarkan permasalahan yang diuraikan diatas maka penulis bermaksud untuk melakukan penelitian yang berjudul **“EVALUASI SISTEM PEMBUMIAN TOWER TRANSMISI SALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI (SUTT) 150 kV WILAYAH SULAWESI SELATAN UNTUK MITIGASI GANGGUAN SAMBARAN PETIR”**. Penelitian ini akan memberikan gambaran mengenai sistem pembumian yang digunakan pada *tower* transmisi SUTT 150 kV di wilayah Sulawesi Selatan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Apa dampak yang ditimbulkan dari sambaran petir yang terjadi terhadap jaringan transmisi SUTT 150 kV di wilayah Sulawesi Selatan?
2. Bagaimana metode dan desain yang optimal untuk meningkatkan kinerja sistem pembumian *tower* SUTT 150 kV dalam mitigasi gangguan sambaran petir?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang ingin dicapai sebagai berikut:

1. Menganalisis dampak yang ditimbulkan oleh sambaran petir yang terjadi pada jaringan transmisi SUTT 150 kV di wilayah Sulawesi Selatan,

terutama pengaruhnya terhadap *tower* transmisi dan keseluruhan jaringan sistem transmisi 150 kV.

2. Menentukan dan memberikan rekomendasi metode serta desain sistem pembumian yang optimal yang dapat diterapkan pada *tower* SUTT 150 kV di wilayah Sulawesi Selatan dengan intensitas sambaran petir yang tinggi.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan evaluasi terhadap sistem pembumian *tower* transmisi yang digunakan pada jaringan transmisi di Sulawesi Selatan.
2. Membantu pihak PLN dalam menentukan desain sistem pembumian yang tepat untuk diterapkan pada *tower* transmisi yang memiliki tingkat sambaran petir yang tinggi.
3. Penulis memperoleh kesempatan untuk berkontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, serta memberikan dampak positif dalam meningkatkan sistem pembumian pada jaringan transmisi.
4. Sebagai bahan referensi untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya berfokus pada jalur jaringan transmisi di wilayah Sulawesi Selatan.
2. Evaluasi sistem pembumian *tower* SUTT 150 kV hanya dilakukan di wilayah dengan intensitas sambaran petir yang tinggi berdasarkan data yang dikeluarkan oleh Vaisala (PLN).
3. Alat ukur yang digunakan untuk mengukur tahanan pembumian *tower* adalah *earth tester digital* merk Kyoritsu.
4. *Software* yang digunakan untuk melakukan simulasi sambaran petir pada *tower* transmisi adalah ATP Draw versi 7.2.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang diperoleh dari sumber referensi untuk menyusun kerangka teori dan konseptual.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang waktu dan tempat penelitian, metode pengambilan dan analisis data, prosedur penelitian dan juga diagram alur penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai hasil dan pembahasan dari analisa yang telah dilakukan melalui pengambilan data secara langsung dan simulasi.

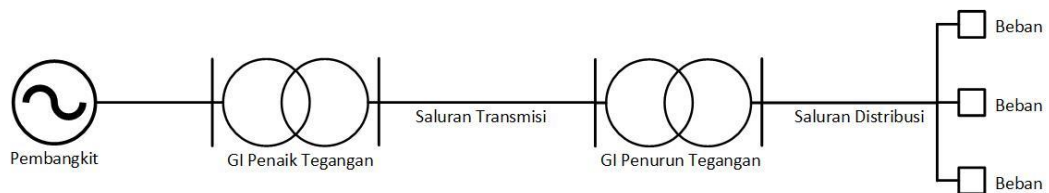
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil yang diperoleh pada penelitian ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Menurut Grainger & Stevenson (1994), secara garis besar suatu sistem tenaga listrik terbagi atas 3 bagian utama yaitu sistem pembangkitan tenaga listrik, sistem penyaluran (transmisi dan gardu induk) dan sistem distribusi. Ketiga bagian ini merupakan bagian utama suatu rangkaian sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari pusat pembangkit tenaga listrik ke pusat beban atau konsumen.



Gambar 1 Diagram satu garis sistem tenaga listrik sederhana (Tobing, 2012b)

Berdasarkan Gambar 1, pembangkit tenaga listrik menghasilkan sumber energi listrik. Umumnya, lokasi pembangkit tenaga listrik berada sangat jauh dari pusat beban atau konsumen energi listrik, sehingga diperlukan suatu sistem transmisi untuk menyalurkan energi listrik yang telah dibangkitkan oleh pembangkit tenaga listrik. Sebelum disalurkan, energi listrik yang dibangkitkan akan dinaikkan tegangannya menggunakan transformator penaik tegangan (*step-up transformer*) yang ada pada gardu induk penaik tegangan. Tujuan dinaikkannya tegangan adalah untuk mengurangi jumlah arus yang akan mengalir pada saluran transmisi dan dengan demikian akan mengurangi rugi-rugi daya yang terjadi pada proses penyaluran energi listrik. Setelah dinaikkan tegangannya, energi listrik kemudian akan disalurkan melalui jaringan transmisi hingga ke pusat-pusat beban. Saat mendekati pusat beban, daya listrik yang disalurkan tadi akan diturunkan tegangannya menggunakan transformator penurun tegangan (*step-down transformer*) yang ada pada gardu induk penurun tegangan. Tegangannya diturunkan menjadi tegangan menengah yaitu tegangan 20 kV, yang kemudian akan diturunkan lagi menjadi tegangan rendah 220 V/380 V yang dapat digunakan oleh konsumen energi listrik.

2.2 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Secara umum tujuan dari jaringan transmisi adalah untuk mengirim daya listrik dari unit pembangkit tenaga listrik menuju sistem distribusi tenaga listrik yang terhubung ke beban. Berdasarkan peraturan *Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia* pada tahun 2007 mengenai aturan jaringan sistem tenaga listrik, dijelaskan karakteristik untuk kerja jaringan transmisi harus memenuhi persyaratan-persyaratan berikut:

- a. Frekuensi nominal jaringan transmisi adalah 50 Hz, diusahakan tidak lebih rendah dari 49,5 Hz atau lebih dari 50,5 Hz dan selama keadaan darurat (*emergency*) dan gangguan, frekuensi sistem yang diizinkan turun hingga 47,5 Hz atau naik hingga 52 Hz.
- b. Tegangan sistem harus dipertahankan dalam batas tertentu seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Batas tegangan pada jaringan transmisi

Tegangan Nominal (kV)	Batas Atas	Batas Bawah
500	+5%	-5%
150	+5%	-10%
70	+5%	-10%
20	+5%	-10%

Sumber: Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (2007)

- c. Faktor daya ($\cos \phi$) pada jaringan transmisi adalah sebesar 0,85 *lagging*.

2.2.1 Klasifikasi Saluran Transmisi

Pada umumnya saluran transmisi merupakan penyaluran arus bolak-balik. Sistem arus bolak-balik ini terdiri atas sistem satu fasa dan sistem tiga fasa. Beberapa kelebihan sistem tiga fasa dibandingkan sistem satu fasa diantaranya:

- a. Daya yang disalurkan lebih besar
- b. Mempunyai nilai sesaat yang konstan
- c. Mempunyai medan magnet putar

Dengan berbagai keuntungan yang dimiliki membuat hampir seluruh penyaluran tenaga listrik di dunia menggunakan arus bolak-balik. Namun, seiring perkembangan teknologi pada sistem tenaga, beberapa tahun terakhir telah dikembangkan penyaluran dengan arus searah di berbagai bagian di dunia.

Keuntungan dari sistem penyaluran arus searah diantaranya, isolasi yang lebih sederhana, efisiensi yang lebih tinggi (dikarenakan memiliki faktor daya 1) serta tidak memiliki permasalahan pada stabilitasnya, yang membuat penyaluran arus searah ini memungkinkan dilakukan dalam jarak yang jauh. Namun, kerugian dari sistem penyaluran arus searah ini terletak pada sisi ekonomisnya (Syafriyuddin, 2012).

Adapun saluran transmisi dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa bagian sebagai berikut:

1. Klasifikasi untuk keperluan diagram pengganti

Untuk keperluan analisa dan perhitungan digunakan diagram pengganti dimana jaringan transmisi diklasifikasikan ke dalam 3 kelas berdasarkan panjang salurannya (Grainger & Stevenson, 1994) yaitu:

- a. Saluran transmisi pendek, saluran transmisi yang memiliki panjang kurang dari 80 km (50 mil).
- b. Saluran transmisi menengah, saluran transmisi yang memiliki panjang 80 km (50 mil) hingga 240 km (150 mil).
- c. Saluran transmisi panjang, saluran transmisi yang memiliki panjang lebih dari 240 km (150 mil).

2. Klasifikasi berdasarkan jenis

Berdasarkan jenisnya, dikenal dua macam saluran transmisi (Zuhal, 2000) yaitu:

- a. Saluran udara (*overhead line*), merupakan saluran yang menyalurkan tenaga listrik melalui kawat-kawat konduktor yang digantungkan pada tiang-tiang transmisi dengan perantara isolator.
- b. Saluran bawah tanah (*underground line*), merupakan saluran yang menyalurkan tenaga listrik melalui kabel bawah tanah.

3. Klasifikasi berdasarkan level tegangan

Standar tegangan transmisi yang digunakan di Indonesia adalah tegangan 30 kV, 70 kV, dan 150 kV. Klasifikasi jaringan transmisi berdasarkan kelompok level tegangannya adalah:

- a. Jaringan tegangan tinggi (*High Voltage*), merupakan jaringan transmisi dengan level tegangan diatas 35 kV hingga 245 kV.

- b. Jaringan tegangan ekstra tinggi (*Extra High Voltage*), merupakan jaringan transmisi dengan level tegangan diatas 245 kV hingga 765 kV.
 - c. Jaringan tegangan ultra tinggi (*Ultra High Voltage*), merupakan jaringan dengan level tegangan diatas 765 kV.
4. Klasifikasi berdasarkan fungsi operasi
- Berdasarkan fungsinya, jaringan transmisi terbagi atas 5 (Dewi, 2017) yaitu:
- a. Jaringan Transportasi, yaitu jaringan tenaga listrik yang berperan dalam mengalirkan energi listrik dalam jumlah besar dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban dimana jaringan ini dapat juga disebut sebagai jaringan transmisi atau jaringan sub-transmisi.
 - b. Jaringan Interkoneksi, yaitu jaringan yang menjadi penghubung dua jaringan yang memiliki level tegangan sama.
 - c. Jaringan Utilitas, yaitu jaringan yang menghubungkan secara langsung sumber energi dengan peralatan yang menggunakan energi listrik.
 - d. Jaringan Distribusi, yaitu jaringan yang mendistribusikan daya listrik dari pusat beban ke konsumen atau pemakai energi listrik. Jaringan ini terdiri atas jaringan primer dan jaringan sekunder.
 - e. Jaringan Kontrol, yaitu jaringan yang terdapat di dalam peralatan beban dan berfungsi mengoperasikan peralatan.

2.2.2 Komponen Utama Saluran Transmisi

1. Menara atau Tiang Transmisi

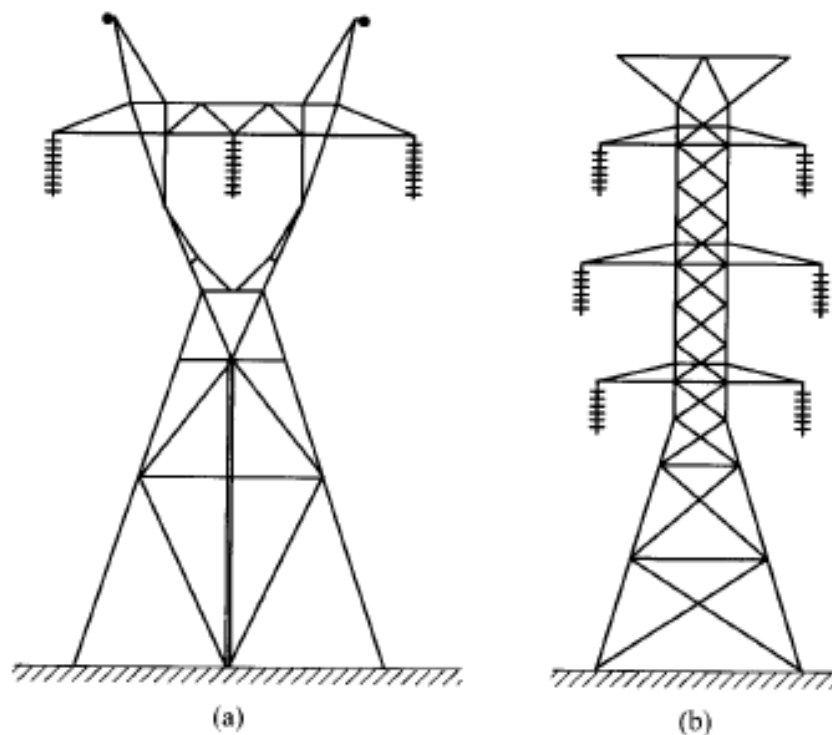
Menara atau tiang transmisi (*tower*) merupakan suatu struktur penopang dari saluran transmisi. Menara atau tiang transmisi dapat berupa menara baja, tiang baja, tiang beton bertulang dan tiang kayu. Untuk jaringan tegangan tinggi dibawah 70 kV umumnya menggunakan tiang baja ataupun tiang kayu, sedangkan untuk jaringan tegangan tinggi diatas 70 kV (SUTET) digunakan struktur menara baja. Menara baja terbagi atas

beberapa bagian berdasarkan fungsinya yaitu menara dukung, menara ujung, menara percabangan, menara sudut dan menara transportasi.

Tabel 2. Tipe dan fungsi *tower* transmisi 150 kV

Tipe Tower	Fungsi	Sudut
Aa	<i>Suspension</i>	0° - 3°
Bb	<i>Tension/section</i>	3° - 20°
Cc	Tension	20° - 60°
Dd	Tension	60° - 90°
Ee	Tension	>90°
Ff	Tension	>90°
Gg	Transposisi	

Sumber : Syafriyuddin, 2012



Gambar 2 Menara transmisi tenaga listrik untuk (a) saluran tunggal; (b) saluran ganda (Cekdin & Barlian, 2013)

Menurut Sofyan et al., (2018), tiang transmisi terbagi atas enam berdasarkan fungsinya:

a. Tiang penegang (*tension tower*)

Tiang yang berfungsi menahan gaya berat dan gaya tarik dari konduktor saluran udara tegangan tinggi (SUTT) dan saluran udara transmisi tegangan ekstra tinggi (SUTET). Tiang penegang terdiri dari:

- Tiang sudut (*angle tower*), merupakan tiang penegang yang menerima gaya tarik sebagai akibat dari perubahan arah dari jaringan transmisi tegangan tinggi.
- Tiang akhir (*dead-end tower*), merupakan tiang penegang yang dirancang untuk menahan gaya tarik konduktor dari satu arah. Biasanya tiang jenis ini diletakkan di ujung saluran yang menuju ke *switchyard* dari gardu induk.

b. Tiang penyangga (*suspension tower*)

Tiang yang berfungsi sebagai pendukung dan penyangga saluran transmisi. Tiang ini harus bisa menahan gaya berat dari peralatan listrik yang ada pada tiang tersebut.

c. Tiang penyekat (*section power*)

Tiang yang berada di antara tiang-tiang penyangga untuk memudahkan saat pembangunan konstruksi tiang (dalam penarikan konduktor). Biasanya tiang jenis ini mempunyai sudut belok yang kecil.

d. Tiang transposisi

Tiang yang berfungsi sebagai tempat perpindahan pada letak susunan fasa konduktor saluran transmisi tegangan tinggi.

e. Tiang portal (*gantry power*)

Tiang yang mempunyai bentuk menyerupai portal yang digunakan pada persilangan dua saluran transmisi yang membutuhkan ketinggian yang rendah karena alasan tertentu (misalnya bandara atau tiang *crossing*).

f. Tiang kombinasi (*combined tower*)

Tiang yang digunakan oleh dua saluran transmisi yang berbeda level tegangannya.

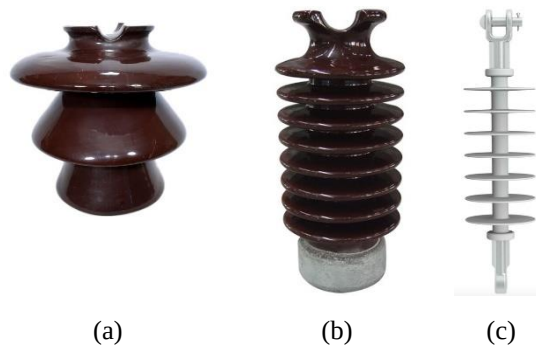
2. Isolator

Isolator merupakan suatu peralatan listrik yang berfungsi sebagai penyekat antara tiang atau menara jaringan listrik dengan penghantar bertegangan (Pratiwi & Asri, 2021). Adapun fungsi utama isolator selain yang disebutkan di atas ialah:

- a. Untuk menyekat atau mengisolir kawat penghantar dengan bagian yang ditanahkan dan kawat penghantar dengan kawat penghantar lainnya.

- b. Sebagai pemikul beban mekanis akibat adanya berat dari konduktor penghantar dan/atau gaya tarik yang ditimbulkan oleh kawat penghantar.
- c. Sebagai bagian yang membatasi kawat penghantar agar memiliki jarak yang tetap.

Umumnya pada saluran transmisi menggunakan isolator dengan jenis porselen atau kaca. Berdasarkan penggunaannya dan konstruksinya, isolator dikenal ke dalam 3 jenis yaitu isolator pos saluran (*post-line insulator*), isolator pasak (*pin-type insulator*) dan isolator gantung (*suspension insulator*). Bahan isolator harus memiliki tahanan resistansi yang tinggi agar terlindungi dari kebocoran arus dan mencegah terjadi *breakdown voltage* pada tekanan listrik tegangan tinggi.



Gambar 3 Isolator pasak (a); isolator pos saluran (b); isolator gantung (c)
(Suswanto, 2009)

3. Kawat Penghantar

Kawat penghantar merupakan suatu kawat yang menghantarkan arus listrik dan memiliki sifat-sifat daya listrik yang baik dan tahan terhadap panas serta mempunyai daya mekanis yang baik. Kawat penghantar yang biasa digunakan pada jaringan transmisi adalah kawat tembaga yang memiliki konduktivitas 100% (Cu 100%), kawat tembaga dengan konduktivitas 97,5% atau kawat aluminium dengan dengan konduktivitas 61 % (Al 61 %). Beberapa jenis kawat aluminium yang digunakan pada jaringan transmisi (Halim et al., 2019) diantaranya:

- a. AAC (*All-Aluminium Conductor*), kawat penghantar yang terbuat dari aluminium seluruhnya.
- b. AAAC (*All-Aluminium Alloy Conductor*), kawat penghantar yang terbuat dari campuran aluminium, magnesium, dan silikon.

- c. ACSR (*Aluminium Conductor, Steel-Reinforced*), kawat penghantar dengan inti kawat baja.
- d. ACAR (*Aluminium Conductor, Alloy Reinforced*), kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.



Gambar 4 Penampang kawat penghantar ACSR (Kusuma, 2016)

4. Kawat Tanah

Ground wires atau sering disebut kawat tanah berfungsi melindungi kawat penghantar atau kawat fasa terhadap sambaran petir. Oleh karena itu, kawat tanah juga disebut kawat pelindung (*shield wires*). Kawat tanah umumnya menggunakan kawat baja yang lebih murah, namun sering juga menggunakan kawat ACSR. Beberapa syarat yang harus terpenuhi agar suatu kawat tanah dapat memenuhi fungsinya dengan baik sebagai pelindung dari sambaran petir (Cekdin & Barlian, 2013) adalah sebagai berikut:

- 1) Letaknya harus cukup tinggi di atas fasa konduktor agar dapat menangkap (*intercept*) serangan langsung.
- 2) Letaknya harus mempunyai jarak aman (*clearance*) yang cukup di tengah rentangan terhadap konduktor.
- 3) Tahanan kaki dari menara harus cukup rendah dengan tujuan memperkecil tegangan yang melintas pada isolator.

2.3 Pembedaan dan Tahanan Pembedaan

Sistem pembedaan adalah suatu rangkaian atau jaringan mulai dari kutub pembedaan atau elektroda, hantaran penghubung atau konduktor sampai dengan terminal pembedaan. Dimana sistem ini berfungsi untuk mengalirkan arus lebih

(*over current*) ke bumi sehingga dapat memberikan perlindungan terhadap manusia dari sengatan listrik (*shock*) dan memberikan pengamanan pada komponen-komponen instalasi agar dapat terhindar dari bahaya arus dan tegangan asing, serta peralatan dapat beroperasi sesuai dengan ketentuan teknis sebagaimana mestinya.

Sistem pembumian pada sistem tenaga listrik mulai dikenal sejak tahun 1900-an, dimana sebelumnya sistem-sistem tenaga listrik tidak diketanahkan atau dibumikan. Hal ini dikarenakan sistem tenaga listrik saat itu masih berskala kecil, sehingga apabila terjadi gangguan pada sistem seperti misalnya gangguan fasa ke tanah, arus gangguan yang terdeteksi masih kecil dan nilainya kurang dari 5 ampere (Siahaan & Laia, 2019). Pembumian sistem tenaga listrik adalah pengadaan hubungan dengan tanah untuk suatu titik netral dari mesin-mesin listrik arus putar seperti generator, motor, dan transformator.

Ada beberapa syarat yang harus dipenuhi agar sistem pembumian dapat bekerja dengan efektif (Pabla & Kadir, 1991):

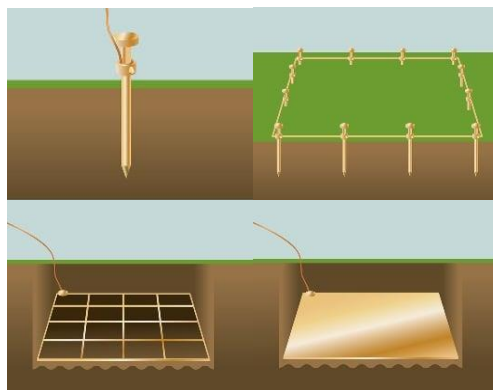
- a. Membuat jalur impedansi yang rendah ke bumi untuk pengamanan personal dan peralatan dengan menggunakan rangkaian yang efektif.
- b. Sistem pembumian dapat melawan dan menyebarkan gangguan berulang dan arus akibat terjadinya surja hubung.
- c. Menggunakan bahan yang tahan korosi terhadap berbagai kondisi kimiawi bumi untuk meyakinkan kontinuitas penampilannya sepanjang umur peralatan yang dibumikan.
- d. Menggunakan sistem mekanik yang kuat namun harus dapat menyalurkan arus gangguan dengan baik.

Menurut Marsudi (2005), dalam suatu instalasi tenaga listrik terdapat empat bagian yang harus dibumikan atau sering juga disebut dengan pentanahan. Empat bagian tersebut diantaranya:

- a. Semua bagian instalasi yang terbuat dari logam (menghantar listrik) dan dengan mudah bisa disentuh manusia. Hal ini perlu agar potensial dari logam yang mudah disentuh manusia selalu sama dengan potensial bumi (tanah) tempat manusia berpijak sehingga tidak berbahaya bagi manusia yang menyentuhnya.

- b. Bagian pembuangan muatan listrik (bagian bawah) dari *lightning arrester*. Hal ini diperlukan agar *lightning arrester* dapat berfungsi dengan baik, yaitu membuang muatan listrik yang diterimanya dari petir ke tanah (bumi) dengan lancar.
- c. Kawat petir yang ada pada bagian atas saluran transmisi. Kawat petir ini sesungguhnya juga berfungsi sebagai *lightning arrester*. Karena letaknya yang ada di sepanjang saluran transmisi, maka semua kaki tiang transmisi harus ditanahkan agar petir yang menyambar kawat petir dapat disalurkan ke tanah dengan lancar melalui kaki tiang saluran transmisi.
- d. Titik netral dari transformator atau titik netral dari generator. Hal ini diperlukan dalam kaitan dengan keperluan proteksi khususnya yang menyangkut gangguan hubung tanah.

Dimana dalam praktiknya, diinginkan agar tahanan pembumian dari titik-titik pembumian di atas tidak melebihi 5 ohm. Secara teori, tahanan dari tanah atau bumi adalah nol karena bumi memiliki luas penampang yang tak terhingga. Tetapi pada kenyataan tidaklah demikian, hal ini berarti tahanan pembumian nilainya tidak nol. Hal ini disebabkan oleh faktor utama yaitu adanya tahanan kontak antara alat pembumian dengan tanah di mana alat tersebut dipasang (dalam tanah). Alat untuk melakukan pembumian ditunjukkan oleh gambar berikut.



Gambar 5 Alat pembumian (BBPVP Serang, 2020)

Dari gambar tampak bahwa terdapat empat alat pentanahan/pembumian, yaitu:

- Batang pembumian tunggal (*single grounding rod*).
- Batang pembumian ganda (*multiple grounding rod*), yang terdiri dari beberapa batang tunggal yang dihubungkan secara paralel.

- Anyaman pbumian (*grounding mesh*).
- Pelat pbumian (*grounding plate*), yaitu pelat tembaga.

Tahanan pbumian selain ditimbulkan oleh tahanan kontak di atas, juga ditimbulkan oleh tahanan sambungan antara alat pentahanan dengan kawat penghubungnya. Unsur lain yang menjadi bagian dari tahanan pbumian adalah tahanan dari tanah yang ada di sekitar alat pbumian yang juga menghambat aliran muatan listrik (arus listrik) yang keluar dari alat pbumian tersebut. Arus listrik yang mengalir keluar dari alat pbumian ini menghadapi bagian-bagian tanah yang berbeda tahanan jenisnya. Untuk jenis tanah yang sama, tahanan jenisnya dipengaruhi oleh kedalamannya. Semakin dalam letaknya, semakin kecil tahanan jenisnya, karena komposisinya yang semakin padat dan umumnya juga lebih basah. Oleh karena itu, dalam memasang batang pbumian, makin dalam pemasangannya akan makin baik hasilnya.

2.4 Tahanan Jenis Tanah

Tahanan jenis tanah merupakan nilai resistansi dari bumi yang menggambarkan nilai konduktivitas listrik bumi. Sebuah faktor keseimbangan antara tahanan tanah dan kapasitansi disekitarnya yang dalam persamaan matematiknya di representasikan dengan ρ (rho). Harga tahanan jenis tanah dalam kedalaman tertentu tergantung pada beberapa faktor yaitu:

1. Jenis tanah: tanah liat, berpasir, berbatu, dan lain-lain
2. Lapisan tanah: berlapis-lapis dengan tahanan jenis berlainan atau seragam
3. Kelembaban tanah
4. Temperatur
5. Kepadatan tanah

Secara umum, tahanan jenis tanah dari berbagai jenis tanah dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3. Tahanan jenis tanah

No	Jenis Tanah	Tahanan Jenis (ohm.m)
1	Tanah rawa	10 - 40
2	Tanah liat dan ladang	20 - 100
3	Pasir basah	50 - 200
4	Kerikil basah	200 - 3000
5	Pasir dan kerikil kering	<10.000
6	Tanah berbatu	2.000 - 3.000

Lanjutan Tabel 3

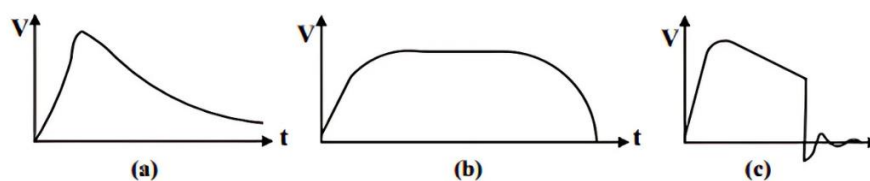
No	Jenis Tanah	Tahanan Jenis (ohm.m)
7	Air laut dan tawar	10 - 100

Sumber: PUIL 2000

Tahanan jenis tanah bervariasi menurut jenis tanahnya dikarenakan perbedaan konduktivitas dari masing-masing unsur penyusun tanah, dimana tanah dengan kelembaban tinggi akan memiliki tahanan jenis tanah yang rendah. Salah satu metode konvensional untuk menurunkan tahanan jenis tanah dengan meningkatkan kelembaban tanah adalah dengan pemberian air atau pembasahan tanah. Selain itu, harga tahanan jenis tanah pada kedalaman yang terbatas sangat bergantung pada keadaan cuaca di sekitarnya. Untuk mendapatkan tahanan jenis rata-rata dalam suatu perencanaan sistem pembedaan maka diperlukan penyelidikan atau pengukuran dalam jangka waktu tertentu. Pada umumnya tahanan tanah juga bergantung dari tingginya permukaan tanah dari permukaan air konstan. Untuk mengurangi tahanan jenis tanah akibat pengaruh musim, metode yang dilakukan adalah dengan menanamkan elektroda pentanahan sampai mencapai kedalaman dimana terdapat air tanah yang konstan (Kurniawan & Johar, 2018).

2.5 Gelombang Impuls dan Gelombang Berjalan

Gelombang impuls adalah bentuk gelombang yang dihasilkan oleh tegangan yang dalam waktu singkat sekali naik lalu kemudian mengalami penurunan yang relatif lambat menuju nol. Gelombang impuls merupakan gelombang yang dihasilkan oleh tegangan impuls. Dalam sistem tenaga listrik terdapat tiga bentuk tegangan impuls yang bisa terjadi yaitu tegangan impuls petir (diakibatkan oleh sambaran petir), tegangan impuls hubung buka (diakibatkan oleh adanya operasi *switching*/hubung-buka) dan tegangan impuls petir terpotong (Tobing, 2012).



Gambar 6 (a) Impuls petir; (b) Impuls hubung-buka;
(c) Impuls terpotong (Tobing, 2012)

Persamaan berikut menyatakan bahwa tegangan impuls didefinisikan sebagai suatu gelombang yang berbentuk eksponensial ganda:

$$V = V_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

dimana:

V = tegangan impuls

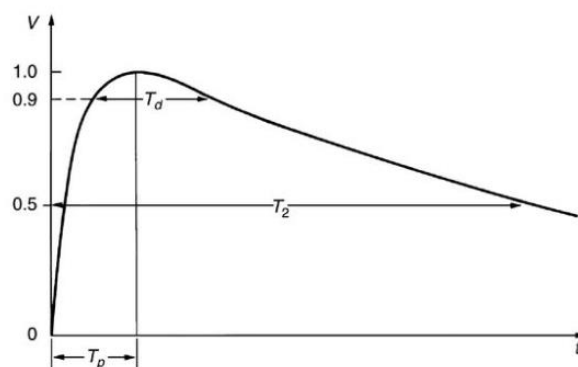
V_0 = tegangan keluaran

α dan β = konstanta waktu

t = nilai waktu (s)

Bentuk tegangan impuls dapat didefinisikan sebagai berikut:

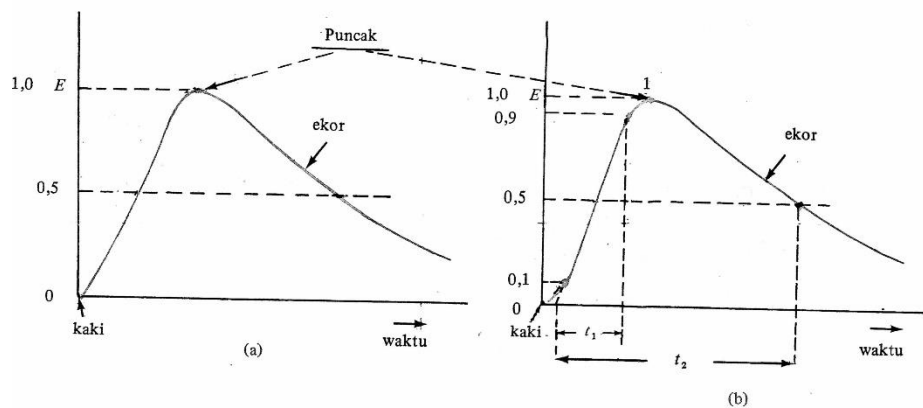
1. Bentuk dan waktu gelombang impuls dapat diatur dengan mengubah nilai komponen rangkaian generator impuls.
2. Nilai puncak (*peak value*) merupakan nilai maksimum gelombang impuls.
3. Muka gelombang (*wave front*) didefinisikan sebagai bagian gelombang yang dimulai dari titik nol sampai titik puncak.
4. Waktu muka (T_f) adalah waktu yang dimulai dari titik nol sampai titik puncak gelombang.
5. Ekor gelombang (*wave tail*) didefinisikan sebagai bagian gelombang yang dimulai dari titik puncak sampai akhir gelombang. Waktu ekor (T_t) adalah waktu yang dimulai dari titik nol sampai setengah puncak pada ekor gelombang.



Gambar 7 Bentuk tegangan impuls

Gelombang berjalan pada suatu saluran transmisi didefinisikan sebagai suatu teori gelombang yang disederhanakan oleh para ilmuwan yang digunakan untuk

menghitung gangguan-gangguan yang ada. Bentuk umum dari suatu gelombang berjalan dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 8 Bentuk umum gelombang berjalan

Spesifikasi dari suatu gelombang berjalan adalah sebagai berikut:

- Puncak (*crest*) gelombang, E (kV) yaitu amplitudo maksimum dari gelombang berjalan.
- Muka gelombang, t_1 (mikrodetik), yaitu waktu dari permulaan sampai puncak dalam gambar 8 diambil dari $10\%E$ sampai $90\%E$.
- Ekor gelombang, yaitu bagian dibelakang puncak. Panjang gelombang, t_2 (mikrodetik) yaitu waktu dari permulaan sampai titik $50\%E$ pada ekor gelombang.
- Polaritas, yaitu polaritas dari gelombang, positif atau negatif.

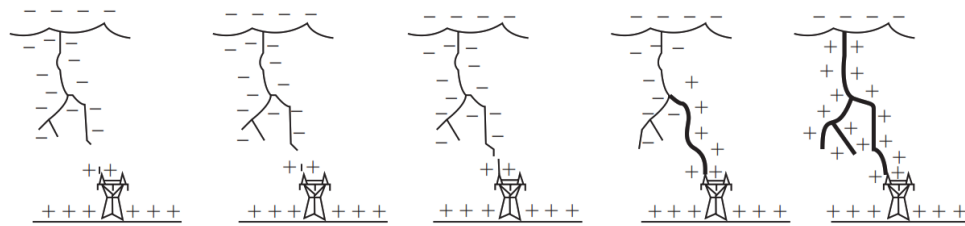
Teori tentang gelombang berjalan pada kawat transmisi mulai dikembangkan secara intensif sejak tahun 1910, dan semakin diperdalam pada tahun 1930.

2.6 Gangguan Petir Pada Saluran Transmisi

2.3.1 Mekanisme Terjadinya Petir

Petir adalah pelepasan muatan yang terjadi antara awan dalam awan atau antara awan dengan bumi. Dimana dalam awan terdapat muatan positif dan muatan negatif, jika muatan ini bertemu maka akan terjadi tarik menarik yang dapat menimbulkan kilat di awan, begitu juga apabila muatan negatif dan muatan negatif dekat akan terjadi tolak menolak, juga akan terjadi ledakan / kilat. Bumi merupakan

gudang muatan positif maupun negatif, jika pelepasan muatan dari petir dekat dengan bumi, maka akan terjadi sambaran petir ke bumi (Hajar & Rahman, 2017).



Gambar 9 Proses terjadinya petir (Grigsby, 2006)

Proses awal terjadinya petir dikarenakan adanya awan yang bermuatan di atas bumi. Terbentuknya awan yang bermuatan disebabkan karena adanya kelembaban udara dan gerakan udara yang naik (*up draft*). Kelembaban udara ini ditimbulkan oleh pengaruh sinar matahari yang menyebabkan terjadinya penguapan air sehingga uap air itu akan naik karena gerakan *up draft*. Proses *up draft* yang terjadi secara terus-menerus akan membentuk awan yang bermuatan. Setelah timbul awan bermuatan, kristal-kristal es akan mengalami gesekan saat terkena angin sehingga muatan pada kristal es tersebut menjadi tidak netral seperti sebelumnya. Kemudian pada awan tersebut akan bermuatan positif (+) dan negatif (-). Muatan positif akan berkumpul di bagian atas awan, sedangkan muatan negatif berada di bagian bawah awan. Permukaan bumi dianggap memiliki muatan positif sehingga muatan-muatan negatif yang berada di bagian bawah awan akan tertarik menuju muatan positif yang berada di bumi. Proses pengaliran muatan dari awan ke bumi inilah yang kemudian disebut sebagai petir (Sinitianingrum et al., 2016).

Tiga syarat awan petir dapat terbentuk (Zoro, 2018) adalah:

a. *Up-draft*

Gerakan udara yang naik ke atas akibat pemanasan permukaan bumi atau karena sifat orografis dari permukaan bumi. Misalnya matahari memanaskan bumi sehingga udara yang berasal dari bumi yang terkena panas matahari akan naik. Hal ini banyak terjadi di daerah khatulistiwa dan angin berhembus di daerah itu sehingga menyebabkan terjadinya *up-draft*.

b. Aerosol

Merupakan partikel ringan yang kasar (*hygroscopis*), mengambang di udara dan menyerap air. Aerosol akan berbentuk seperti titik-titik air dan naik ke

atas karena penguapan air. Udara hangat yang naik akan mendingin dan uap air akan mengembun menjadi titik-titik air kecil dan membentuk awan. Pengembunan titik-titik air di dalam awan akan mengeluarkan panas akibat penguapan. Panas tersebut akan menambah panas dari udara yang naik dan mengakibatkan kepadatannya berkurang, kemudian udara yang lebih hangat itu akan naik jauh lebih tinggi ke atmosfer. Udara yang naik (*up-draft*) akan membentuk awan hingga ketinggian 6000 m (6 km) di atas permukaan bumi. Apabila udara hangat tadi naik lebih tinggi lagi dan mendingin di antara awan yang telah terbentuk, maka akan terbentuk awan hingga ketinggian 17 km (tropis). Titik-titik air dan kristal es mulai berjatuhan dengan cepat di dalam awan (*down-draft*) karena beratnya yang tidak bisa ditahan lagi oleh udara yang naik. Gerakan udara yang naik dan turun membawa partikel ini akan menyebabkan terjadinya benturan antar partikel yang mengakibatkan pemisahan muatan listrik.

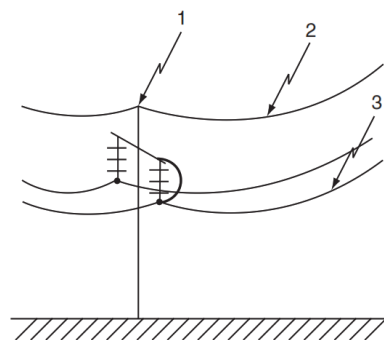
c. Udara lembab

Udara lembab dibutuhkan untuk membentuk *hailstone* (Indonesia merupakan negara dengan daerah hutan yang cukup luas sehingga memiliki udara yang cukup lembab).

Kelebihan tegangan yang disebabkan oleh sambaran petir terbagi menjadi dua jenis (Harsono et al., 2021) yaitu:

a. Sambaran langsung

Sambaran langsung adalah sambaran petir ke arah fasa konduktor dan tiang. Sambaran langsung dapat terjadi pada tiang, kawat tanah dan konduktor fasa.



Gambar 10 Ilustrasi sambaran langsung (Grigsby, 2006)

Sambaran langsung pada menara akan mengakibatkan terjadinya kenaikan tegangan yang dapat menyebabkan terjadinya *back-flashover* (tegangan tembus balik). Jika petir menyambar tiang menara SUTT, akan terjadi gelombang tegangan balik yang kemudian merambat sepanjang tiang. Gelombang ini akan terkumpul di puncak atau dasar tiang, sehingga meningkatkan tegangan pada lengan-lengan menara dan mengganggu isolasi. Isolasi tersebut akan mengalami sambaran balik (*back flashover*) jika tegangan sesaat melebihi batas kemampuan isolasi. Besarnya tegangan yang terukur pada menara saat tersambar petir dirumuskan sebagai berikut:

$$V_M = (i \times R_E) + L \frac{di}{dt} + V_L \quad (2)$$

dimana:

V_M = tegangan pada menara (V)

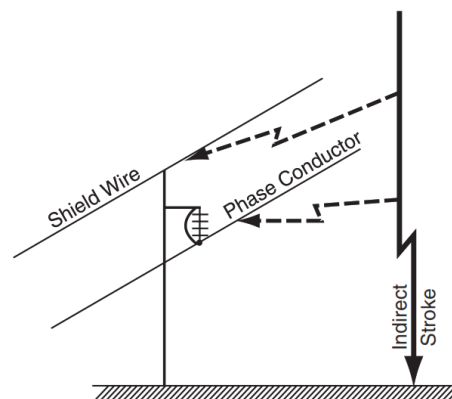
V_L = tegangan sistem (V)

i = arus petir (kA)

R_E = tahanan kaki menara

b. Sambaran tidak langsung

Sambaran tidak langsung atau disebut juga dengan sambaran induksi adalah peristiwa sambaran petir yang terjadi di dekat saluran transmisi udara. Sambaran tersebut dapat berupa sambaran petir dari awan ke tanah ataupun sambaran petir dari awan ke awan. Akibat sambaran ini akan timbul medan elektromagnetik yang dapat menginduksi tegangan pada saluran transmisi.



Gambar 11 Ilustrasi sambaran tidak langsung (Grigsby, 2006)

2.3.2 Klasifikasi Petir

Adapun tipe-tipe petir berdasarkan pergerakannya yaitu:

1. Petir antar awan (*cloud to cloud discharge*)

Petir *cloud to cloud* ini merupakan tipe petir yang terjadi akibat pelepasan muatan yang terjadi antara pusat-pusat muatan dengan awan yang berbeda. Meskipun tidak membahayakan objek-objek yang terdapat di darat, namun tipe petir ini berbahaya bagi penerbangan di udara.

2. Petir awan ke tanah (*cloud to ground flash*)

Petir *cloud to ground* ini merupakan tipe petir yang disebabkan oleh pelepasan muatan antara awan dan tanah. Sehingga secara sederhana dapat dikatakan bahwa petir ini muncul dari awan lalu menyambar ke tanah.

3. Petir pada awan yang sama (*intracloud discharge*)

Petir *intracloud* ini merupakan tipe petir yang terjadi akibat pelepasan muatan antara pusat-pusat muatan yang berlawanan di dalam awan yang sama. Petir ini terlihat seperti kilatan cahaya yang menyebar secara kelap-kelip, terkadang kilatan cahaya tersebut keluar dari batas awan sehingga nampak seperti saluran yang bercahaya dan terlihat seperti tipe *cloud to ground*.

4. Petir awan ke udara (*cloud to air discharge*)

Petir tipe *cloud to air* biasanya terjadi ketika muatan positif dalam awan berinteraksi dengan udara yang bermuatan negatif.

Selain itu petir juga dapat diklasifikasikan berdasarkan:

- a) Berdasarkan pelepasan muatannya

Berdasarkan pelepasan muatannya, tipe petir *cloud to ground flash* dapat dikelompokkan menjadi:

- *Negative cloud to ground (downward negative leader)*, pada jenis ini terjadi pelepasan muatan negatif dari awan ke tanah.
- *Positive cloud to ground (downward positive leader)*, pada jenis ini terjadi pelepasan muatan positif dari awan ke tanah.

- *Negative ground to cloud (upward negative leader)*, pada jenis ini terjadi pelepasan muatan negatif dari tanah ke awan.
- *Positive ground to cloud (upward positive leader)*, pada jenis ini terjadi pelepasan muatan positif dari tanah ke awan.

b) Berdasarkan percabangannya

Berdasarkan percabangannya, petir diklasifikasikan menjadi:

- Petir yang memiliki cabang ke atas, yaitu petir yang berasal dari tanah ke awan.
- Petir yang memiliki cabang ke bawah, yaitu petir yang berasal dari awan ke tanah.

Petir bercabang dikarenakan udara bukanlah penghantar yang baik sehingga petir akan mencari arah ke sisi yang lain untuk menemukan daerah yang memiliki kerapatan muatan yang tinggi. Pada tanah datar sering kali terjadi lidah pelopor ke bawah sedangkan untuk struktur yang lebih tinggi seringkali terjadi lidah pelopor ke atas karena memicu petir dari tanah ke awan yang diakibatkan kuat medan yang kuat.

2.3.3 Faktor yang Memengaruhi Sambaran Petir

Adapun faktor-faktor yang dapat mempengaruhi sambaran petir diantaranya sebagai berikut (Zoro, 2018):

a. Pengaruh bentuk objek pada permukaan bumi

Petir lebih cenderung menyambar dari tempat yang tinggi di permukaan bumi. Hal ini dikarenakan kuat medan di sekitar ujung atau puncak bangunan tersebut lebih rapat dan sifat dari muatan akan cenderung berkumpul pada puncak atau ujung dari bagian yang runcing, seperti halnya pada tepian-tepian bangunan yang runcing.

b. Pengaruh resistivitas udara

Arus petir akan dilepaskan ke bumi melalui jalan yang paling konduktif atau paling kecil resistivitasnya sehingga petir akan terlihat seperti bercabang.

c. Efek kedekatan dengan konduktor pentanahan

Pada saat konduktor pentanahan dilalui arus sambaran petir, orang atau bangunan yang ada di sekitarnya akan dapat diloncati oleh arus sambaran tersebut (sering juga disebut sebagai sambaran samping atau *side flash*). Peralatan-peralatan yang berbasis elektronik dan mikroprosesor juga dapat rusak karena induksi elektromagnetik.

d. Kepadatan sambaran petir

Dalam suatu perencanaan perlindungan terhadap sambaran petir, angka kerapatan perlu ditinjau terlebih dahulu untuk menentukan mutu sistem proteksi yang akan dipasang. Hal ini dapat diketahui dengan menggunakan acuan peta hari guruh per tahun (*isokeraunic level*) kemudian dicari harga korelasinya dengan kepadatan sambaran petir ke tanah.

Jumlah sambaran petir ke tanah hanya $\pm 25\%$ dari seluruh pelepasan muatan yang terjadi di alam. Oleh karena itu semakin besar harga kerapatan sambaran petir pada suatu daerah maka kegagalan perlindungan dari saluran transmisi atau transmisi atau gardu induk akan semakin besar. Saat ini teknologi yang digunakan untuk mengukur sambaran petir ke tanah adalah menggunakan alat ukur *Lightning Location System* yang menggunakan satelit sehingga menghasilkan akurasi yang sangat baik.

2.3.4 Gangguan Pada SUTT Akibat Sambaran Petir

a. *Back Flashover* (BFO)

Sambaran pada kawat tanah atau menara dapat menyebabkan terjadinya kenaikan tegangan yang dapat menyebabkan terjadinya BFO (*back flashover*) pada isolator *tower*. Hal ini terjadi apabila isolator udara mengalami kegagalan akibat kenaikan tegangan yang sangat tinggi pada *tower* transmisi.

b. *Shielding Failures* (SF)

Shielding Failures merupakan sambaran langsung yang mengenai kawat fasa (umumnya berupa petir kecil yang menyambar dari arah samping). Arus impuls petir dan tegangan impuls petir akan mengalir ke kedua arah pada kawat fasa, dimana tegangan impuls (U) timbul akibat adanya *surge impedance* (Z) atau impedansi surja pada konduktor. Arus dan tegangan ini

akan bergerak sebagai suatu gelombang berjalan (*traveling wave*) hingga sampai di isolator menara terdekat. Jika gelombang impuls ini lebih besar dari kuat tembus impuls pada isolator (BIL isolator), maka terjadilah lewat denyar atau *shielding failures* yang dapat menyebabkan gangguan pada penyaluran daya listrik.

2.3.5 Proteksi Petir Pada Saluran Transmisi

Saluran transmisi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang sangat rawan terhadap sambaran petir dikarenakan strukturnya yang tinggi dan berada pada lokasi yang terbuka. Sambaran petir yang terjadi pada saluran transmisi dapat berupa suntikan muatan yang menyebabkan kenaikan tegangan pada saluran, sehingga pada saluran akan timbul tegangan lebih berbentuk gelombang impuls dan merambat ke tiap bagian dari saluran transmisi.

Komponen-komponen yang termasuk dalam fungsi proteksi petir adalah semua komponen pada saluran transmisi yang melindungi saluran transmisi dari sambaran petir. Komponen-komponen tersebut diantaranya (PT. PLN (Persero), 2019):

a. Kawat GSW (Ground Steel Wire)

Kawat GSW merupakan media untuk melindungi konduktor fasa dari sambaran petir. Kawat ini terbuat dari baja yang sudah digalvanis atau sudah dilapisi dengan aluminium. Kawat GSW dipasang di atas konduktor fasa dengan sudut perlindungan yang sangat kecil, dengan anggapan petir akan menyambar dari atas konduktor fasa. Di dalam *ground wire* difungsikan *fiber optic* untuk keperluan telemetri, teleproteksi maupun telekomunikasi yang dikenal dengan OPGW (*Optic Ground Wire*).



Gambar 12 Kawat GSW

b. Konduktor penghubung konduktor tanah (*jumper GSW*)

Untuk menjaga hubungan konduktor tanah dengan tiang, maka pada ujung travers konduktor tanah dipasang konduktor penghubung (*jumper GSW*) yang dihubungkan ke konduktor tanah. Konduktor penghubung ini terbuat dari konduktor tanah yang dipotong dengan panjang yang disesuaikan dengan kebutuhan. Konduktor penghubung pada tipe penegang dipasang antara tiang dan konduktor tanah serta antar klem penegang konduktor tanah. Hal ini dimaksudkan agar arus gangguan petir dapat mengalir langsung ke tiang maupun antar konduktor tanah. Sedangkan pada tipe penyangga, konduktor penghubung dipasang pada tiang dan disambungkan ke konduktor tanah dengan klem jembatan ataupun dengan memasangnya pada *suspension clamp* konduktor tanah.



Gambar 13 Jumper GSW (PLN, 2014)

c. *Arcing horn*

Alat pelindung proteksi petir yang paling sederhana adalah *arcing horn*. *Arcing horn* berfungsi memotong tegangan impuls petir secara pasif (tidak mampu memadamkan *follow current* dengan sendirinya).



Gambar 14 *Arcing Horn* (PT. PLN (Persero), 2019)

d. *Transmission Line Arrester* (TLA)

TLA adalah arester yang dipasang pada jalur transmisi. Cara kerjanya sama seperti *Lightning Arrester* pada umumnya. Berfungsi untuk melindungi isolator yang dipasang pada jalur transmisi dari *backflash/sparkover* pada saat terkena sambaran petir. Sebuah *Transmission Line Arrester* (TLA) harus mampu bertindak sebagai isolator, mengalirkan beberapa miliampere arus bocor ke tanah pada tegangan sistem dan berubah menjadi konduktor yang sangat baik, mengalirkan ribuan ampere arus surja ke tanah, memiliki tegangan yang lebih rendah daripada tegangan yang mampu ditahan oleh isolator kawat (*withstand string insulator*) ketika terjadi tegangan lebih, dan menghilangkan arus susulan mengalir dari sistem melalui TLA setelah surja petir berhasil didisipasikan. Adapun TLA terdiri dari beberapa komponen utama:

- 1) *Clamp*
- 2) *Corona ring*
- 3) *Insulator housing*
- 4) *Disconnecter*
- 5) *Grounding*

6) Arrester Condition Monitoring (ACM)



Gambar 15 *Transmission Line Arrester* (Giraudet, 2022)

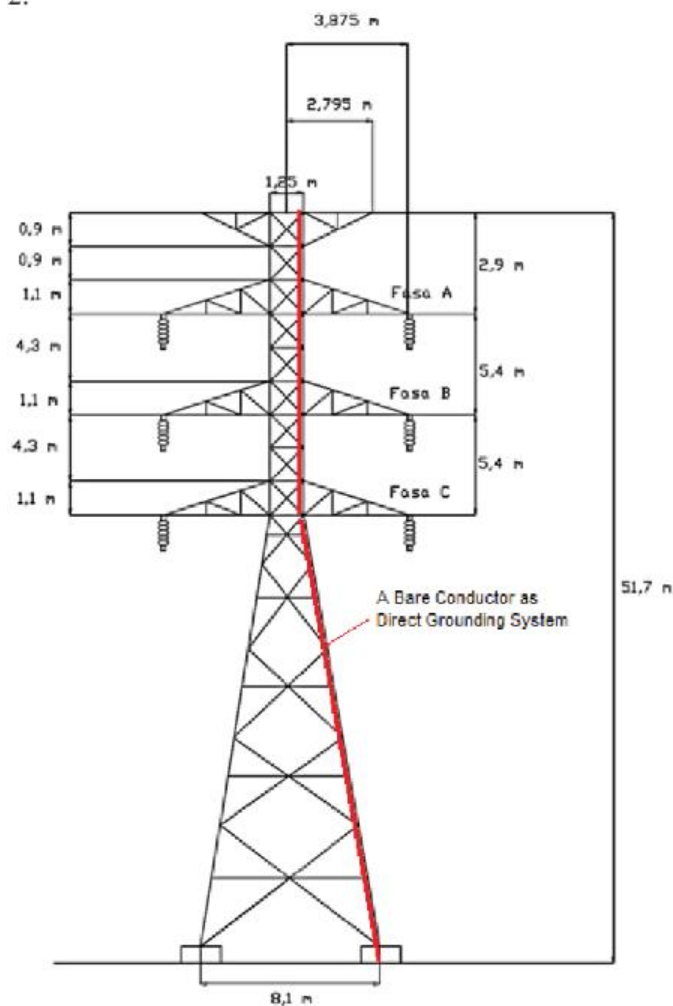
e. Pentanahan (*Grounding*)

Pentanahan *tower* adalah perlengkapan pembumian sistem transmisi yang berfungsi untuk meneruskan arus listrik dari tiang SUTT ke tanah. Pentanahan tiang terdiri dari konduktor tembaga atau konduktor baja yang diklem pada pipa pentanahan yang ditanam di dekat pondasi tiang, atau dengan menanam plat aluminium/tembaga disekitar pondasi tiang yang berfungsi untuk mengalirkan arus dari konduktor tanah akibat sambaran petir. Beberapa jenis metode pentanahan petir yang sering digunakan oleh PLN diantaranya:

1. *Direct Grounding*

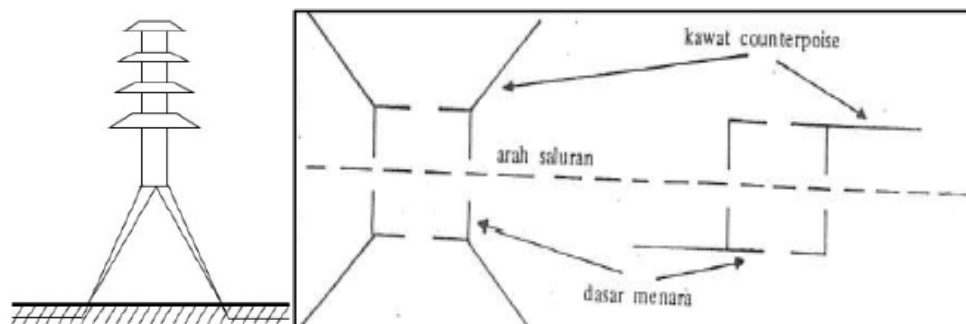
Pentanahan dengan metode *direct grounding* merupakan metode pentanahan langsung dari kawat tanah penangkal petir (*ground wire*) yang berada di atas kawat fasa pada jaringan transmisi. Metode *direct grounding* ini tidak lagi mengalirkan arus listrik akibat sambaran petir melalui *body* dari *tower* transmisi tetapi langsung mengalir ke tanah.

2.

Gambar 16 Pentanahan tower dengan *direct grounding*

2. Counterpoise

Pentanahan dengan *counterpoise* adalah pentanahan yang dilakukan dengan cara menanam kawat elektroda sejajar atau radial beberapa cm di bawah tanah (30-90 cm). Pentanahan ini biasanya digunakan apabila resistansi tanah terlalu tinggi.

Gambar 17 Pentanahan tower dengan *counterpoise* (Pranoto et al., 2018)

3. *Independent Grounding for Arching horn System (I-GrASs)*

Metode pentanahan I-GrASs adalah dengan mentanahkan langsung *arching horn* yang terdapat pada ujung isolator. Kemudian ujung dari kawat penghantar/kabel yang menuju ke tanah dibuat secara radial di dalam tanah pada kedalaman tertentu. Metode ini banyak digunakan untuk menurunkan nilai resistansi tanah yang tinggi.



Gambar 18 Metode Pentanahan I-GrASs (PLN, 2023)

2.7 ATP Draw

Alternative Transient Program (ATP) merupakan software program pada ketenagalistrikan yang didesain untuk menyelesaikan persoalan peralihan pada sistem tenaga listrik. Program ini pertama sekali dikembangkan oleh H.M Dommel di tahun 1960-an di Munich Institute of Technology, yang kemudian dilanjutkan di BPS (*Bonneville Power Administration*) bersama dengan S. Meyer. Program *Alternative Transient Program* (ATP), merupakan software pengembangan dari program *Electromagnetic Transient Program* (EMTP), yang dikembangkan di tahun 2012 oleh Dr. Hans Kr. Hoidalen di SINTEF Energy Research/ Norwegian University of Science and Technology in Norway, serta didukung oleh *Bonneville Power Administration*, Portland-Oregon-USA.

Software ini lebih menekankan penyelesaian masalah peralihan pada sistem tenaga listrik, meskipun program ini juga dapat menyelesaikan persoalan sistem tenaga listrik dalam keadaan lunak. *Software* ini dapat digunakan untuk menganalisa peralihan pada rangkaian dengan parameter terkonsentrasi (R, L, dan C), saluran transmisi dengan parameter yang terdistribusi, saluran yang di transposisi maupun saluran yang tidak ditransposisi. ATPDraw juga sangat tepat digunakan untuk menganalisis peralihan pada operasi surja petir (*lightning surge*) dan operasi surja hubung (*switching surge*) dikarenakan program ini menyediakan secara khusus fasilitas pemodelan untuk komponen-komponen sistem tenaga seperti generator, *circuit breaker*, transformator, sumber surja petir dan pemodelan berbagai jenis saluran transmisi.

Berikut beberapa kegunaan utama dari *software* ini:

1. Analisis gangguan

ATPDraw dapat digunakan untuk melakukan analisis peralihan elektromagnetik dalam sistem tenaga listrik, seperti: hubung singkat, lonjakan tegangan, dan gangguan lainnya yang dapat terjadi dalam jaringan listrik.

2. Penyelidikan kegagalan sistem

Software ini memungkinkan untuk melakukan pemodelan dan analisa terhadap penyebab kegagalan pada sistem tenaga listrik. Hal ini membantu dalam mengidentifikasi masalah potensial dan merancang solusi untuk mengatasi kegagalan tersebut.

3. Desain perlindungan

Software ini juga dapat digunakan untuk merancang dan melakukan pengujian terhadap sistem proteksi dan peralatan dalam suatu jaringan. *Software* ini dapat membantu dalam memastikan bahwa sistem dapat merespon dengan benar terhadap gangguan dan melindungi peralatan serta pengguna jaringan.

4. Pemodelan surja

Aplikasi umum yang dapat digunakan dalam aplikasi ini adalah pemodelan lonjakan tegangan dan lonjakan arus. Hal ini dapat membantu dalam

2.8 Penelitian Terdahulu

Tabel 4. Penelitian yang relevan

No	Judul	Metode	Hasil Penelitian
1	Studi Pengukuran Tahanan Pentanahan Tower Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV Pedan-Ungaran (Farmada, 2016)	Metode pengukuran secara langsung dan analisis secara perhitungan	Pada penelitian ini dilakukan pengukuran tahanan pembumian tower transmisi dengan menggunakan <i>earth tester digital</i> . Didapatkan bahwa pemilihan jenis elektroda pentanahan akan mempengaruhi nilai resistansi pentanahan, serta penanaman elektroda secara paralel akan mendapatkan nilai resistansi elektroda pentanahan yang kecil daripada elektroda yang dipasang secara tunggal.
2	Kemampuan Isolasi Terhadap Tegangan Lebih Akibat Sambaran Petir Pada Saluran Transmisi 150 kV di Gardu Induk Surabaya Selatan (Ramadhan et al., 2023)	Metode diagram tangga dengan simulasi petir pada arrester transformator	Hasil penelitian dengan simulasi pada PSCAD menyimpulkan bahwa semakin besar arus petir maka semakin besar pula tegangan lebih dan arus yang masuk ke transformator juga semakin besar.
3	Efek Penurunan Tahanan Pembumian Tower 150 kV Terhadap Sistem Penyaluran Petir (Lembang et al., 2018)	Metode simulasi sambaran petir pada software ATPdraw	Pada penelitian ini dilakukan simulasi sambaran petir pada software ATPdraw untuk mendapatkan nilai resistansi tahanan sekitar tower dan didapatkan bahwa dengan diterapkan metode paralelisasi di lapangan dapat menurunkan nilai pentanahan sehingga mengurangi terjadinya <i>back flashover</i> pada saluran transmisi.
4	Pengaruh Pembumian Kaki Tower Terhadap Perkiraan Outage Rate Saluran Udara 150 kV Saat Terjadi Sambaran Petir (Harsono & Istiqomah, 2021)	Melakukan pengukuran tahanan pembumian dengan menggunakan metode FoP dan pengukuran arus bocor	Hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa kenaikan tahanan pembumian tower sebesar 6 kali dapat menyebabkan kenaikan total outage rate dari saluran udara sebesar 129,93%. Pada penelitian ini juga dapat dilihat bahwa pengukuran dengan metode FoP dan pengukuran arus bocor menunjukkan bahwa sebagian tower memiliki nilai tahanan pembumian yang tinggi dibandingkan hanya dengan metode FoP
5	Analisis Kemampuan Pentanahan Menara SUTT Terhadap Sambaran Petir Langsung Yang Mengakibatkan Backflashover Pada Saluran Transmisi 150 kV Ponorogo – Manisrejo (Putra, 2017)	Metode simulasi sambaran petir pada software PSCAD untuk analisis besar nilai pentanahan	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pada kondisi awal nilai resistansi kaki menara adalah 2,24Ω dengan karakteristik arus sambaran petir sebesar 20 kA dan hal ini menyebabkan terjadinya <i>back flashover</i> . Selain itu pada dengan menambahkan panjang elektroda pentanahan sepanjang 20 meter didapatkan hasil nilai resistansi baru sebesar 0,84Ω.

Lanjutan Tabel 4

No	Judul	Metode	Hasil Penelitian
6	Evaluasi Tahanan Pentanahan Kaki Menara Transmisi Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV Ungaran - Pemalang 1 (Nisa', 2022)	Pengujian tahanan pentanahan kaki menara melalui pengukuran dengan model <i>multiple ground rod</i>	Hasil pengujian menunjukkan bahwa dari total 170 <i>tower</i> , 3 <i>tower</i> memiliki nilai pentanahan yang melebihi nilai standar 10Ω yang telah ditetapkan.
7	Analisis Sistem Pembumian <i>Tower</i> Saluran Transmisi Dari Gardu Induk Kapal - Gardu Induk Gianyar (Satya Wicaksana et al., 2022)	Metode deskriptif dengan analisis secara perhitungan	Hasil analisis perhitungan pada perbaikan sistem pembumian di <i>tower</i> Saluran Transmisi Gardu Induk Kapal dengan tanah sawah, tanah liat ladang dan tanah lempung didapatkan tahanan pembumian sesuai standar SPLN No.121:1996 dengan nilai ≤ 10 ohm.
8	Karakteristik Petir Indonesia dan Penggunaannya Dalam Evaluasi Unjuk Kerja Saluran Udara 150 kV Saat Terjadi Sambaran Petir (Harsono et al., 2021)	Metode simulasi dengan pendekatan EGM	Hasil penelitian ini yang dilakukan dengan simulasi tegangan lebih pada pemodelan saluran udara 150 kV untuk kondisi sambaran petir pada kawat pembumian maupun kawat fasa dimana desain saluran udara 150 kV memiliki potensi mengalami gangguan BFO pada sambaran petir > 40 kA pada kawat pembumian karena kenaikan tegangan telah melalui BIL isolator. Selain itu desain sudut lindung yang digunakan pada saluran udara 150 kV mampu mencegah <i>shielding failure</i> untuk arus petir > 11 kA.
9	Analisa Sistem Proteksi Petir (<i>Lightning Performance</i>) Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV Sengkol-Paokmotong (Muliani et al., 2017)	Metode bola bergulir (<i>rolling sphere</i>) untuk menganalisa daerah proteksi petir	Dari penelitian ini didapatkan nilai <i>lighning performance</i> untuk SUTT 150 kV Sengkol-Paokmotong adalah 1,3959 gangguan per 100 km per tahun. Dari metode bola bergulir secara grafis dengan AutoCad didapatkan nilai daerah proteksi disekitar saluran transmisi menggunakan grafis dan perhitungan memiliki error yang sangat kecil yaitu 0,0375%.
10	Sistem Pembumian Menara Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV Rute Parepare - Balusu (Zulhajji & Wahyuni, 2021)	Metode pengukuran langsung	Hasil penelitian ini menunjukkan setiap jenis tanah memiliki nilai resistansi yang berbeda-beda. Dimana nilai resistansi pembumian tanah rawa rata-rata sebesar 0,85 ohm, tanah/ladang nilai rata-rata sebesar 2,13 ohm, dan pada tanah pasir basah dengan nilai rata-rata sebesar 4,51 ohm.