



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PEMODELAN DAN ANALISA PERLINDUNGAN GARDU INDUK DARI
SAMBARAN PETIR LANGSUNG DI PT.PLN(PERSERO) GARDU INDUK
150kV SUKOLILO-SURABAYA MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK
EMTP-RV**

I Gd A. Widya W. S.
2213 105 053

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Danar Fahmi, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



Final Project - TE 141599

***Remodelling and Analysis Substation Protection of
Direct Lightning Strike at PT. PLN (Persero) Substation 150 kV
Sukolilo-Surabaya Using EMTP-RV Software***

I Gd A. Widya W. S.
2213 105 053

Counsellor
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Danar Fahmi, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING BACHELOR DEGREE PROGRAM
Industrial Engineering Faculty
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

**PEMODELAN DAN ANALISA PERLINDUNGAN
GARDU INDUK DARI SAMBARAN PETIR
LANGSUNG DI PT.PLN(PERSERO) GARDU INDUK
150kV SUKOLILO-SURABAYA MENGGUNAKAN
PERANGKAT LUNAK EMTP-RV**

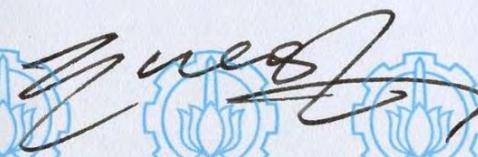
TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dr.Eng I Made Yulistya N., ST., M.Sc.
NIP. 19700712 199802 1 001


Daniar Fahmi, ST., MT.
NIP. 19890925 201404 1 002



**PEMODELAN DAN ANALISA PERLINDUNGAN GARDU INDUK DARI
SAMBARAN PETIR LANGSUNG DI PT.PLN(PERSERO) GARDU
INDUK 150KV SUKOLILO-SURABAYA MENGGUNAKAN
PERANGKAT LUNAK EMTP-RV**

Nama : I Gd. A. Widya W. S.
Pembimbing I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRAK

Peralatan yang berada di gardu induk rentan tersambar petir karena berada diruang terbuka. Sehingga diperlukan sistem perlindungan petir eksternal untuk memberikan perlindungan kepada bangunan dan peralatan sistem tenaga listrik dari sambaran petir langsung. Pada tugas akhir ini dibahas mengenai simulasi dan pemodelan perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung menggunakan EMTP-RV dan metode bola bergulir di Gardu Induk 150 kV Sukolilo-Surabaya. Melakukan simulasi dengan bantuan perangkat lunak *EMTP – RV* untuk mendapatkan performa sistem. Dari hasil simulasi diperoleh kenaikan tegangan puncak dipengaruhi oleh arus maksimum yang dihasilkan oleh simulasi petir. Sedangkan kenaikan durasi dari waktu naik (*rise time*) dari petir akan menurunkan tegangan puncak. Untuk melindungi gardu induk dari sambaran petir langsung dengan konfigurasi pemakaian kawat tanah setinggi 18 m dengan jarak pisah 14 m sudah aman dari sambaran petir langsung. Kemudian diberikan alternatif perlindungan lain yaitu dengan memasang tiang penangkal petir. Menggunakan tiang penangkal petir setinggi 28 meter yang di susun secara segitiga sebanyak 22 buah.

Kata Kunci : *Petir, Gardu Induk, EMTP-RV, Tiang penangkal petir.*

Remodelling and Analysis Substation Protection of Direct Lightning Strike at PT. PLN (Persero) Substation 150 kV Sukolilo-Surabaya Using EMTP-RV Software

Name : I Gd. A. Widya W. S.
Counsellor lecturer I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Counsellor lecturer II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRAK

The equipment in the substations are vulnerable to being struck by lightning because installed outside the building. Because of that the external protection system is required to protection to buildings and electrical power system equipment from direct lightning strike. In this thesis discussed about the simulation and modeling of substations protection from direct lightning strikes using the EMTP-RV and methods of balls rolling in Substation 150 kV Sukolilo-Surabaya. Perform simulations using software EMTP - RV to obtain system performance. From the simulation results obtained peak voltage rise is influenced by the maximum current generated by simulating lightning. While the increase in the duration of the rise time (rise time) of lightning will reduce the peak voltage. To protect the substation from a direct lightning strike to the configuration of the use of the ground wire as high as 18 m with 14 m separation distance was safe from direct lightning strike. Then given another protection alternative is to install the lightning-rod. Using lightning-rod as high as 28 meters in a triangular stacking as many as 22 pieces..

Kata Kunci : *Lightning, Substation, EMTP-RV, Lightning mast.*

KATA PENGANTAR

Segala hormat dan puji syukur kepada Shang Hyang Widhi Wasa karena atas berkat dan tuntunan-Nya penulis berhasil menyelesaikan buku laporan Proyek Akhir yang berjudul :

Pemodelan dan Analisa Perlindungan Gardu Induk dari Sambaran Petir Langsung di PT.PLN(PERSERO) Gardu Induk 150kV Sukolilo-Surabaya Menggunakan Perangkat Lunak EMTP-RV

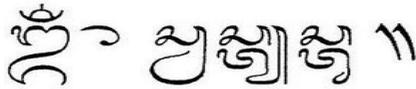
Tugas Akhir ini disusun guna memenuhi salah satu persyaratan akademis untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik (ST.) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada Jurusan Elektro program studi Teknik Sistem Tenaga.

Penulis menyadari bahwa tak ada gading yang tak retak, oleh karena itu pada buku Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan dan ketidaksempurnaan. Penulis membuka peluang kritik dan saran dari para pembaca dan diharapkan adanya penyempurnaan ditahun mendatang. Akhirnya penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan, terutama untuk mendukung kegiatan akademis.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH



Dengan penuh rasa syukur kehadiran dan atas berkat rahmat Sang Hyang Widhi Wasa serta tuntunan-Nya sehingga saya selaku penyusun telah diberikan kesempatan untuk menyelesaikan proyek akhir ini. Dengan segala hormat dan kerendahan hati, saya selaku penyusun dan penulis tak lupa mengucapkan banyak terima kasih, kepada semua pihak yang banyak memberi masukan dan bantuan kepada saya sehingga proyek akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Shang Hyang Widhi Wasa yang telah memberikan berkahnya, baik itu senang, susah, derita, bahagia, dan semua hal yang telah penulis nikmati sampai saat ini.
2. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST.,M.Eng selaku ketua jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc., I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST.,MT dan Daniar Fahmi, ST., MT. selaku pembimbing yang telah bersabar membimbing dan memberikan motivasi hingga selesainya tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. , Dr. Ir. Soedibyo, M,MT. , Dr. Rony Seso Wibowo, ST. MT. , Heri Suryoatmojo,ST.MT. Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberi masukkan dan perbaikan dalam tugas akhir penulis..
5. PT. PLN(Persero) APP Waru – Jatim dan Gardu Induk Sukolilo atas data-data yang telah di berikan demi kelancarannya tugas akhir penulis.
6. Ibu (Widji Suhartati) dan Bapak(Wajan Wastha Satyawan) tercinta yang telah sabar merawatku sejak belum lahir kedunia ini hingga saat ini. Tak ada perkataan yang pantas untuk mengucapkan terima kasih atas semua yang telah diberikan ke penulis hingga saat ini.
7. Kedua kakakku (I Gd. Wiweka Hindu Murti Satyawan dan I Gd. Nengah Widyana Satyawan) yang sudah membantu, mengingatkan memotivasi, dan membiayai untuk menyelesaikan tugas ini.
8. Seluruh keluarga besar saya baik yang berada di Surabaya, Malang ataupun di Bali yang telah banyak membantu selama melakukan perkuliahan di ITS.

9. Semua dosen-dosen yang pernah mengajar dan memberi ilmu yang tak terkira berharganya dan akan sangat bermanfaat dimasa depan.
10. Semua teman-teman AEROBATIG yang GANASS, Elektro Lintas Jalur Gasal 2013 (antok, indro, yayang, uman, zainul, gembol, basuki, tata, indah,dll), Elektro Lintas Jalur Genap 2014(kijing, novandi, isnan, ghofur, akhmad, peihong, dll) dan teman-teman Elektro regular yang banyak menghibur, membantu dan tidak lupa untuk mendoakan.
11. Dan semua pihak yang tak dapat disebutkan satu-persatu yang telah banyak membantu selama kuliah disini.

Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi pembaca. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik. Penulis juga memohon maaf jika ada kekurangan pada Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan keilmuan di kemudian hari. Semoga Sang Hyang Widhi Wasa senantiasa memberikan perlindungan dan memberikan yang lebih dikemudian hari.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan dan Batasan Masalah.....	1
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Metode Penelitian.....	2
1.5. Sistematika Penulisan.....	3
1.6. Relevansi.....	4
BAB 2 FENOMENA PETIR PADA GARDU INDUK	
2.1 Gardu induk.....	5
2.2 Peralatan gardu induk.....	5
2.2.1. Trafo daya.....	5
2.2.2. <i>Disconnecting switch</i> (DS/PMS).....	6
2.2.3. <i>Circuit breaker</i>	7
2.2.4. <i>Capacitive voltage transformer</i>	7
2.2.5. <i>Lightning arrester</i>	8
2.3 Pengertian Petir.....	9
2.4 Mekanisme Petir.....	10
2.5 Macam-macam Petir.....	11
2.6 Parameter Petir.....	12
2.7 Gangguan kilat pada kawat tanah.....	15
2.8 Sambaran Langsung Pada Gardu Induk.....	16
2.9 Sistem Proteksi Petir.....	16
2.10Tiang Penangkal Petir.....	21

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM	
3.1 Bagian Perancangan Sistem	25
3.2 Pemodelan Gardu Induk dengan EMTP-RV	25
3.3 Metode Bola Bergulir	28
3.4 Metode Peletakan Penangkal Petir	30
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA	
4.1. Profil Gardu Induk 150kV Sukolilo-Surabaya	35
4.2. Simulasi Nilai Puncak Tegangan terhadap Perubahan Nilai Rise time.....	35
4.3. Perlindungan Gardu Induk Menggunakan Tiang Penangkal Petir.....	44
4.4. Perlindungan Gardu Induk Menggunakan Kawat Tanah	51
BAB 5 KESIMPULAN	
5.1. Kesimpulan	55
5.2. Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA	57
BIODATA PENULIS	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Denah Gardu Induk Sukolilo	5
2.2. Trafo daya gardu induk 150kV-20kV	6
2.3. PMS	6
2.4. Circuit breaker GI	7
2.5. CVT	8
2.6. Lightning arrester	8
2.7. Sambaran petir	9
2.8. Loncatan Energi Listrik	6
2.9. Ruang Proteksi Konvensional	18
2.10 Konsep Ruang Proteksi Menurut Elektrogeometri Model	19
2.11 Contoh proteksi sangkar faraday	20
2.12 Contoh arrester jenis gardu	21
2.13 Contoh penangkal petir elektrostatik	22
2.14 Contoh penangkal petir radio aktif	23
3.1. Simulasi gardu induk pada EMTP-RV	25
3.2. Sumber tegangan pada simulasi EMTP-RV	26
3.3. Tower transmisi pada simulasi EMTP-RV	26
3.4. Kawat transmisi pada simulasi EMTP-RV	27
3.5. CVT pada simulasi EMTP-RV	27
3.6. LA pada simulasi EMTP-RV	27
3.7. Petir pada simulasi EMTP-RV	28
3.8. Perkembangan Langkah Terakhir (<i>Last Step</i>)	28
3.9. Jarak Sambaran	29
3.10 Proteksi Tiga Tiang Penangkal Petir	32
4.1 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada trafo (I_{\max} petir 10 kA)	36
4.2 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada CVT (I_{\max} petir 10 kA)	37
4.3 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada trafo (I_{\max} petir 50 kA)	38
4.4 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada CVT (I_{\max} petir 50 kA)	39
4.5 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada trafo (I_{\max} petir 100 kA)	40

4.6	Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada CVT (I_{\max} petir 100 kA)	41
4.7	Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada trafo (I_{\max} petir 150 kA)	42
4.8	Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada CVT (I_{\max} petir 150 kA)	43
4.9	Gambar peletakan penangkal petir dengan empat penangkal petir	50
4.10	Gambar peletakan penangkal petir dengan tiga penangkal petir.....	51

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Hubungan antara arus puncak kilat dan seringnya terjadi	15
2.2 Hubungan antara waktu untuk mencapai puncak dan seringnya terjadi	15
2.3 Material yang digunakan untuk down conductor	19
4.1. Data Profil Gardu Induk 150 kV Sukolilo – Surabaya	35
4.2. Tegangan puncak trafo saat I_{\max} petir 10 kA	36
4.3. Tegangan puncak CVT saat I_{\max} petir 10 kA	37
4.4. Tegangan puncak trafo saat I_{\max} petir 50 kA	38
4.5. Tegangan puncak CVT saat I_{\max} petir 50 kA	39
4.6. Tegangan puncak trafo saat I_{\max} petir 100 kA	40
4.7. Tegangan puncak CVT saat I_{\max} petir 100 kA	41
4.8. Tegangan puncak trafo saat I_{\max} petir 150 kA	42
4.9. Tegangan puncak CVT saat I_{\max} petir 150 kA	43
4.10. Jarak pisah maksimum antar tiang penangkal petir	46
4.11. Jarak pisah maksimum untuk penggunaan tiang penangkal petir dengan tinggi 13 m dan jarak sambaran 22,23 m	47
4.12. Pembagian penangkal petir berdasarkan letak pada Section	48
4.13. Pembagian section berdasarkan luas daerah yang terlindungi oleh penangkal petir	48

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagai salah satu hasil pemanfaatan kekayaan alam yang menguasai hajat hidup orang banyak, tenaga listrik perlu dipergunakan untuk kesejahteraan dan kemakmuran rakyat. Sistem tenaga listrik adalah sekumpulan pusat listrik dan gardu induk (pusat beban) yang satu dengan yang lain dihubungkan oleh jaringan transmisi dan distribusi sehingga merupakan satu kesatuan yang terinterkoneksi se-Jawa-Bali. Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama, dan satu bagian penting yaitu: pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, dan sistem distribusi sebagai komponen utama sedangkan pusat pengatur beban sebagai komponen penting yang akan menunjang keselarasan sistem tenaga listrik dan menjaga kontinuitas pelayanan listrik ke konsumen. Jika suatu sistem tenaga listrik sudah diramalkan dan sudah dijadwalkan dengan baik, maka sistem diharapkan mampu berjalan dengan baik. Akan tetapi gangguan alam, human *error* dan umur komponen selalu menjadi bayang-bayang terjadinya gangguan pada sistem tenaga. Maka disinilah pentingnya suatu koordinasi pengamanan dalam sistem tenaga listrik.

Fenomena Petir adalah sebuah puncak di mana muatan terkumpul di dalam awan ke sebuah awan yang berdekatan atau ke tanah (ground). Sambaran petir langsung dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan di gardu induk, sehingga akan mengganggu penyaluran tenaga listrik dalam waktu tertentu. Oleh karena itu agar gardu induk dapat berfungsi seperti yang diharapkan, gangguan sambaran petir langsung ini harus diredam sehingga perlu drencanakan pemodelan koordinasi isolasi peralatan tegangan tinggi Gardu Induk (GI) 150 kV. Salah satu metode yang digunakan untuk memodelkan perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung adalah metode bola bergulir dimana perlindungannya menggunakan kawat tanah dan tiang penangkal petir.

1.2 Perumusan dan Batasan Masalah

Dalam Tugas Akhir ini membahas mengenai pemodelan gardu induk 150kv Sukolilo-Surabaya dengan perangkat lunak EMTP-RV(*Electromagnetic Transien Program – Restructure Version*).

Untuk memperjelas bahasan ini, perlu adanya batasan masalah. Adapun batasan tersebut adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana cara merumuskan sebuah koordinasi isolasi menggunakan tiang penangkal petir
2. Studi pemodelan dari peredaman tegangan dan arus surja melalui perancangan koordinasi isolasi menggunakan tiang penangkal petir.
3. Bagaimana cara menghitung jarak pisah maksimum tiang penangkal listrik dengan tinggi bus, tinggi tiang dan peletakan tiang penangkal listrik.
4. Parameter utama untuk koordinasi alternatif peletakan arrester adalah prioritas daerah dan aliran daya maksimum software bantu yang digunakan adalah EMTP-RV.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membahas perlindungan terhadap petir eksternal pada gardu induk 150 KV Sukolilo-Surabaya terutama mengenai sistem perlindungan petir eksternal pada gardu induk serta pentanahan dan jarak lindung dari sambaran petir pada gardu induk guna melindungi dari kerusakan yang ditimbulkan oleh sambaran petir.

1.4 Metode Penelitian

Metode yang telah digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur
Studi literatur berisi tentang serangkaian kegiatan penulis dalam pencarian dan pengkajian terhadap sumber – sumber yang relevan dan terpercaya dari jurnal ilmiah (paper), buku-buku dan artikel – artikel di internet yang dapat menunjang dalam pelaksanaan tugas akhir ini.
2. Perancangan sistem dan simulasi
Membuat pemodelan gardu induk 150kV Sukolilo-Surabaya dengan menggunakan perangkat lunak EMTP-RV sesuai dengan data yang di peroleh dari studi literatur. Menggunakan metode bola bergulir untuk menentukan daerah perlindungannya dengan tiang penangkal petir dan dengan kawat tanah

3. Analisa data
Menganalisa pemodelan sistem dengan membandingkan perlindungannya dengan menggunakan tiang penangkal petir dan dengan kawat tanah dengan menggunakan data-data atau parameter yang telah diperoleh sebelumnya.
4. Kesimpulan
Kesimpulan dapat ditarik berdasarkan analisa dari pemodelan perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

- BAB I : Pendahuluan
Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.
- BAB II : Dasar Teori
Bab ini secara garis besar membahas tentang teori petir, metode bola bergulir, tiang penangkal petir .
- BAB III : Perancangan Sistem
Bab ini membahas penjelasan tentang pemodelan sistem dengan *software* EMTP - RV dan pemodelan peletakan tiang penangkal petir.
- BAB IV : Simulasi dan Analisis
Bab ini membahas data hasil simulasi dan berisi perhitungan, analisa, serta pembahasan mengenai sistem perlindungan petir dengan menggunakan tiang penangkal petir dan dengan kawat tanah untuk gardu induk 150 kV Sukolilo-Surabaya.
- BAB V : Penutup
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut :

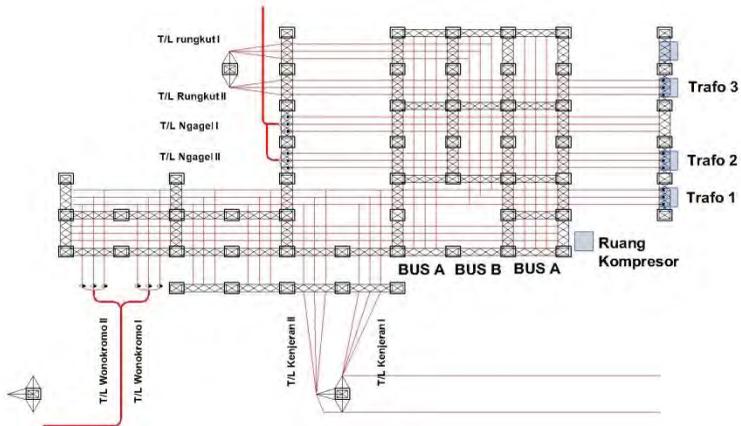
1. Dapat menjadi acuan metode perhitungan dan analisa koordinasi isolasi pada gardu induk yang menggunakan tiang penangkal petir atau kawat tanah.
2. Dapat menjadi acuan ataupun referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk tugas akhirnya.

BAB II FENOMENA PETIR PADA GARDU INDUK

2.1 Gardu induk

Gardu induk adalah suatu instalasi yang terdiri dari peralatan listrik yang berfungsi untuk:

1. Mengubah tenaga listrik tegangan tinggi yang satu ke tegangan tinggi yang lainnya atau tegangan menengah.
2. Pengukuran, pengawasan, operasi serta pengaturan pengamanan sistem tenaga listrik.
3. Pengaturan daya ke gardu-gardu induk lain melalui tegangan tinggi dan gardu-gardu distribusi melalui gawai tegangan menengah.



Gambar 2.1 Denah Gardu Induk Sukolilo

2.2 Peralatan Gardu Induk

2.2.1 Trafo Daya

Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ketegangan rendah atau sebaliknya.



Gambar 2.2 Trafo daya gardu induk 150 kV– 20 kV

2.2.2 *Disconnecting switch (DS/ PMS)*

Disconnecting switch atau pemisah (PMS) suatu peralatan sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai saklar pemisah rangkaian listrik tanpa arus beban (memisahkan peralatan listrik dari peralatan lain yang bertegangan), dimana pembukaan atau penutupan PMS ini hanya dapat dilakukan dalam kondisi tanpa beban.



Gambar 2.3 PMS

Pemisah adalah suatu alat untuk memisahkan tegangan pada peralatan instalasi tegangan tinggi. Ada dua macam fungsi PMS, yaitu:

- Pemisah Peralatan, berfungsi untuk memisahkan peralatan listrik dari peralatan lain atau instalasi lain yang bertegangan. PMS ini boleh dibuka atau ditutup hanya pada rangkaian yang tidak berbeban.
- Pemisah Tanah (Pisau Pentanahan/ Pembumian), berfungsi untuk mengamankan dari arus tegangan yang timbul sesudah saluran tegangan tinggi diputuskan atau induksi tegangan dari penghantar atau kabel lainnya. Hal ini perlu untuk keamanan bagi orang-orang yang bekerja pada peralatan instalasi.

2.2.3 *Circuit Breaker (CB)*

Berdasarkan *IEV(International Electrotechnical Vocabulary)* 441-14-20 disebutkan bahwa *Circuit Breaker(CB)* atau Pemutus Tenaga(PMT) merupakan peralatan saklar/*switching* mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal / gangguan seperti kondisi *short circuit*/hubung singkat, yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Circuit Breaker GI*

2.2.4 *Capasitive Voltage Transformer (CVT)*

CVT merupakan bagian dari PT (*Potensial Transformer/ Trafo Tegangan*) yang memiliki kapasitor. Trafo tegangan ini terdiri dari rangkaian seri 2 (dua) kapasitor atau lebih yang berfungsi sebagai pembagi tegangan dari tegangan tinggi ketegangan rendah pada primer, selanjutnya tegangan pada satu kapasitor ditransformasikan menggunakan trafo tegangan yang lebih rendah agar diperoleh tegangan sekunder. Bentuk CVT ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 CVT

2.2.5 *Lightning Arrester*

Surge Arrester merupakan peralatan yang didesain untuk melindungi peralatan lain dari tegangan surja (baik surja hubung maupun surja petir) dan pengaruh follow current, yang digambarkan pada gambar 2.6 Sebuah *arrester* harus mampu bertindak sebagai insulator, 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 dari pada tegangan *withstand* dari peralatan ketika terjadi tegangan lebih, dan menghilangkan arus susulan mengalir dari sistem melalui *arrester* (power follow current) setelah surja petir atau surja hubung berhasil di disipasikan.



Gambar 2.6 *Lightning Arrester*

2.3 Pengertian Petir

Petir adalah peristiwa pelepasan muatan listrik di udara yang dapat terjadi di dalam awan, antar awan, awan dengan udara dan awan dengan tanah(bumi). Petir merupakan bagian dari sebagian banyak fenomena alam yang ada didunia. Petir terbentuk akibat adanya peningkatan pemisahan muatan listrik secara alami didalam awan. Petir juga merupakan salah satu fenomena alam yang bagi manusia merupakan hal yang baik disadari maupun tidak disadari menguntungkan karena menghasilkan Nitrogen yang penting bagi tumbuhan dan yang pada akhirnya akan menguntungkan manusia.



Gambar 2.7 Sambaran Petir

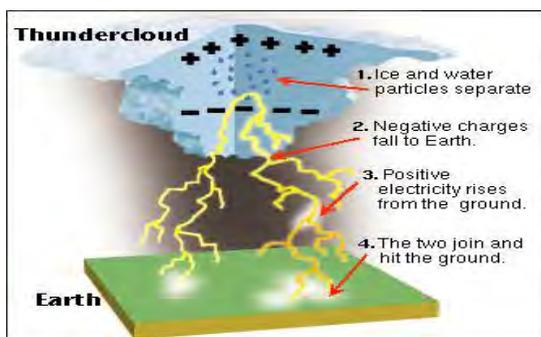
Saat suhu tinggi, tekanan atmosfer akan menurun dengan makin bertambahnya ketinggian suatu tempat. Kemudian udara yang hangat naik keatas dari permukaan tanah yang hangat lalu digantikan oleh udara yang lebih dingin dari atas. Proses konveksi semakin menurunkan suhu udara yang naik keatas yang kemudian membentuk awan, pada awalnya dalam bentuk tetesan air, dan pada ketinggian yang lebih tinggi sebagai kristal es. Pergerakan udara (biasa disebut angin) akan membawa udara lembab ke atas, kemudian menjadi titik-titik air yang pada akhirnya membentuk awan.

Dari hasil penelitian, tubuh manusia hanya dapat mentolerir arus listrik kurang dari 75mA. Sedang arus petir besarnya lebih dari 20kA dalam sekali sambar. Di seluruh dunia, sekitar 2000 hujan di berbagai tempat, terjadi 100 sambaran petir ke bumi tiap detik dengan energi

yang besarnya mampu menghidupkan lampu 100W selama 3 bulan dengan panas mencapai 50000°C atau sekitar 3 kali lebih panas dari permukaan matahari.

2.4 Mekanisme Petir

Distribusi partikel negatif dan positif di awan ini dalam keadaan normal meningkatkan muatan negatif di dasar awan dan kemudian meningkatkan muatan positif pada permukaan tanah. Permukaan tanah ini dapat hanya berjarak 1km saja dari dasar awan. Peningkatan muatan ini terus terjadi hingga perbedaan tegangan antara permukaan tanah dan dasar awan menjadi sangat besar, menyebabkan breakdown pada tahanan udara (air resistance) dan menimbulkan pelepasan muatan petir (lightning discharge). Peluahan petir yang diawali dengan pengembangan sambaran perintis (*stepped downward leader*).



Gambar 2.8 Loncatan Energi Listrik

Gerakan ke bawah ini bertahap sampai dekat ketanah, sehingga muatan negatif yang dibawa oleh stepped leader tersebut memperbesar induksi muatan positif di permukaan tanah terutama pada benda-benda yang menonjol dari permukaan tanah, akibatnya gradien tegangan antara dasar awan dengan tanah semakin besar. Apabila kedua akumulasi muatan ini saling tarik, maka muatan positif dalam jumlah yang besar akan bergerak ke atas menyambut gerakan stepped leader yang bergerak kebawah, akhirnya terjadi kontak pertemuan antara keduanya. Gerakan ke atas muatan positif tersebut membentuk suatu streamer yang bergerak keatas (*upward Moving streamer*), atau yang lebih populer disebut sebagai sambaran balik (*return stroke*) yang menyamakan perbedaan

potensial. Sambaran Balik inilah cahaya terang yang kita lihat. Peluahan Petir seperti inilah yang banyak terlihat, dan diistilahkan sebagai sambaran turun negatif (*negative Descending stroke*). Kelembaban menentukan terbentuknya petir, dimana prosesnya terjadi di atmosfer, sehingga terjadi mekanisme petir. Pada mekanisme tersebut terbentuk *lidah mula* (initial leader) yang merupakan pancaran api, kemudian petir ini akan terjadi secara berulang dengan tekanan tertentu.

2.5 Macam-macam Petir

Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan dan pengumpulan muatan di awan begitu banyak dan tak pasti. Ditambah dengan kondisi labilitas dalam atmosfer, sehingga proses terjadinya sambaran petir bias juga berbeda-beda. Secara umum, macam-macam petir dapat dikategorikan dalam beberapa jenis sebagai berikut:

Berdasarkan muatan:

a. Muatan positif

Adalah jenis petir yang ditimbulkan oleh awan bermuatan positif dimana *pilot streamer* yang membentuk *stepped leader* bermula dari awan bermuatan positif. Petir ini jarang terjadi karena jumlahnya sekitar 5% dari petir yang ada tapi lebih berbahaya. Petir bermuatan positif memiliki kekuatan 6-10 kali lebih besar dibanding petir bermuatan negatif. Tenggang waktu pelepasan muatan juga berlangsung lebih lama dibanding petir negatif dan dapat terjadi dalam jarak beberapa kilometer di atas tanah. Arus listrik yang terbangkit dapat mencapai 300 kA dengan tegangan hingga 1 Giga Volt (100 juta Volt) dalam waktu beberapa puluh hingga ratus milidetik.

b. Muatan negatif

Adalah jenis petir yang ditimbulkan oleh awan bermuatan negatif. Dimana *pilot streamer* yang membentuk *stepped leader* bermula dari awan bermuatan negatif. Jumlahnya sekitar 95% dari petir yang ada merupakan macam petir bermuatan negatif. Arus listrik yang dialirkan besarnya sekitar 30 kA dengan tegangan hingga 100 Mega Volt yang terjadi dalam milidetik.

Berdasarkan arah sambaran:

Jika melihat kembali mekanisme terjadinya petir, maka akan terlihat bahwa untuk setiap satu kejadian kilat petir dengan beberapa sambaran mengalami arah peluahan ke bawah (bumi) dan ke atas (awan) sekaligus secara bergantian.

- a. Arah ke bawah, yaitu ketika peluahan petir (*stepped leader*) bermula dari atas (awan). Ke arah bumi atau objek yang disebut *downward lightning*. *downward lightning* memiliki percabangan yang banyak.
- b. Arah ke atas, yaitu apabila asal mula terjadinya peluahan petir (*stepped leader*) menuju ke arah atas yang disebut *upward lightning*. *upward lightning* memiliki sambaran yang cabang-cabangnya cenderung sedikit dan sangat jarang sekali terjadi. Dari hasil observasi menunjukkan bahwa dari peristiwa-peristiwa *upward lightning*, sekitar 80-90% terjadi pada objek dengan ketinggian 400-500 m dari permukaan bumi.

Berdasarkan jenis sambaran:

- a. Petir Awan ke Tanah (*cloud-to-ground/CG*)

Petir yang paling berbahaya dan merusak. Kebanyakan berasal dari pusat muatan yang lebih rendah dan mengalirkan muatan negatif ke tanah, walaupun kadang kadang bermuatan positif terutama pada musim dingin.

- b. Petir dalam Awan (*Intracloud/IC*)

Tipe yang paling umum terjadi antara pusat pusat muatan yang berlawanan pada awan yang sama. Biasanya kelihatan seperti cahaya yang menghambur, biasanya kelap kelip. Kadang kadang kilat keluar dari batas awan dan seperti saluran yang bercahaya pada beberapa mil terlihat seperti tipe CG.

- c. Petir Antar Awan (*Intercloud/CC*)

Terjadi antara pusat pusat muatan pada awan yang berbeda. Pelepasan muatan terjadi pada udara cerah antara awan awan tersebut.

- d. Petir Awan ke Udara (*cloud-to-sky/CA*)

Biasanya terjadi jika udara di sekitar awan (+) berinteraksi dengan udara yang bermuatan (-). Jika ini terjadi pada awan bagian bawah maka merupakan kombinasi dengan petir tipe CG. Petir AC tampak seperti jari jari yang berasal dari petir CG.

2.6 Parameter Petir

Parameter petir menunjukkan karakteristik atau penggambaran petir itu sendiri. Parameter petir berfungsi untuk studi efek perusakan

akibat sambaran petir dan kemungkinan pemanfaatannya. Parameter-parameter tersebut diantaranya adalah:

a. Bentuk gelombang petir

Bentuk gelombang arus petir menggambarkan besarnya arus, kecuraman, dan lamanya kejadian atau durasi gelombang yang dinyatakan oleh waktu ekor. Pada kenyataannya bentuk gelombang tidak ada yang sama persis satu dengan yang lainnya. Bukan saja antara satu kejadian dengan kejadian lainnya, akan tetapi pada satu kejadian kilat dengan sambaran ganda, bentuk gelombang arus petirnya bisa berbeda cukup lumayan, antara sambaran pertama dengan sambaran susulan. Karena ada perbedaan tersebut, maka bentuk standar gelombang arus petir berbeda untuk suatu negara atau lembaga. Misalnya standar Jepang (JIS), Jerman (VDE), Inggris (BS), dan sebagainya. Untuk internasional mengacu pada IEC. Bentuk gelombang arus petir dinyatakan dalam dua besaran yaitu waktu muka (T_f) yang menyatakan lamanya muka gelombang dan kecuraman arus, serta waktu ekor (T_e).

b. Kerapatan sambaran (N_g)

Tingkat kehebatan badai petir di suatu daerah dinyatakan oleh Iso Keraunic Level di daerah tersebut. Iso Keraunic Level merupakan jumlah hari guruh yang terdengar di suatu daerah pertahun. Iso keraunic Level tidak membedakan antara berapa kali jumlah guruh yang terdengar pada hari tertentu pada dua daerah berbeda, dan tidak pula memperhitungkan lamanya aktifitas petir maupun jenis sambaran. Iso Keraunic Level telah digunakan oleh banyak peneliti sebagai satu-satunya data untuk merancang proteksi petir di saluran hantaran listrik. Sementara frekuensi pelepasan awan-tanah atau disebut *ground flash* merupakan parameter yang penting. Hal ini membuat ketidakandalan perancangan sistem proteksi. Indeks yang benar dalam menentukan kehebatan petir di suatu daerah adalah kerapatan *ground flash* di daerah itu. *Ground flash Density* atau kerapatan sambaran awan-tanah didefinisikan sebagai jumlah petir yang menyambar tanah per km² per tahun. Rata-rata angka kegagalan saluran tenaga karena sambaran petir berbanding lurus dengan kerapatan *ground flash*. Banyak penelitian yang memberikan perhatian ke arah ini dan mengemukakan rumus-rumus berlainan. Untuk Indonesia, T.S Hutahuruk memberikan usulan kerapatan sambaran petir adalah sebesar:

$$N_g = 0,15 \text{ IKL} \quad (2.1)$$

Dimana:

N_g = kerapatan sambaran petir (per km² per tahun)

IKL = indeks Iso Keraunic Level (jumlah hari guruh per tahun)

Solusi terbaik untuk menentukan kerapatan sambaran petir adalah dengan cara pengukuran atau perhitungan kerapatan *ground flash* secara langsung di lapangan. Tantangan terbesar dari cara ini adalah bagaimana alat hitung sambaran membedakan antara pelepasan awan-tanah dengan awan-awan, atau menghitung semua sambaran tapi mengabaikan sambaran awan-awan

c. Arus puncak (I_{max})

Pelepasan listrik dimulai pada bagian bawah awan untuk sambaran ke tanah atau objek rendah. Awalnya *stepped leader* memulai penurunan tanpa dipengaruhi oleh objek yang ditanahkan. Seiring dengan pelepasan awan yang diarahkan ke bawah sepanjang *stepped leader*, medan listrik di permukaan objek akan naik. Akhirnya pada jarak tertentu dari ujung *stepped leader* ke objek, medan listrik kritis untuk tembus udara di permukaan objek tercapai, dan luahan (*streamer*) yang mengarah ke atas dimulai dari objek untuk bertemu *stepped leader*. Jarak dari ujung *leader* ke objek yang menghasilkan luahan ke arah atas disebut jarak sambar. Menurut golde, jarak sambaran tidak dipengaruhi oleh struktur bangunan vertikal dengan ketinggian, yang rendah (≤ 20 m). untuk bangunan yang tinggi, partikel dihasilkan di ujung bangunan seiring dengan *stepped* yang termuati partikel negatif.

Kontribusi golde yang terbesar terhadap jarak sambar adalah hipotesanya tentang jarak sambar r_s , yang merupakan fungsi arus *returnstroke*. Whitehead memformalkan hubungan tersebut dengan persamaan

$$r_s = 8(I_{max})^{0,65}(\text{meter}) \quad (2.2)$$

; dimana I_{max} = arus puncak return stroke (kA).

Persamaan lain yang diberikan Whitehead :

$$r_s = 10(I_{max})^{0,65}(\text{meter}) \quad (2.3)$$

Dua persamaan alternatif yang lain adalah :

$$r_c = 6,4(I_{max})^{0,75}(\text{meter}) \quad (2.4)$$

$$r_c = 7,1(I_{max})^{0,75}(\text{meter}) \quad (2.5)$$

dimana :

r_c = jarak sambar ke bumi

r_c = jarak sambar ke konduktor fasa

d. Kecuraman gelombang atau steepness (di/dt)

Parameter ini menyatakan kecepatan kenaikan arus petir dalam setiap satuan waktu (di/dt). Semakin besar nilai arus dalam setiap satuan waktu, berarti semakin curam bentuk gelombang arusnya dan semakin pendek durasi muka gelombang.

2.7 Gangguan Kilat Pada Kawat Tanah

Gangguan kilat pada kawat tanah dibagi dalam tiga macam gangguan berdasarkan tempat dimana kita menyambar kawat tanah. Perbandingan jumlah kilat yang menyambar menara atau didekatnya adalah 60% dari jumlah sambaran dan sisanya sebesar 40% pada seperempat dari setengah gawang yang besarnya diambil berturut-turut 30% dan 10%. Tabel 2.2 memberikan hubungan antara besar arus kilat dan seringnya terjadi, sedangkan tabel 2.3 adalah hubungan antara waktu mencapai harga puncak (panjang muka gelombang) dan seringnya terjadi.

Tabel 2.1 Hubungan Antara Arus Puncak Kilat dan Seringnya Terjadi

Besar arus puncak kilat (kA)	Seringnya Terjadi(*) (%)
20	36
40	34
60	20
80	8
≥ 100	2

Tabel 2.2 Hubungan Antara Waktu Untuk Mencapai Puncak dan Seringnya Terjadi

Waktu yang mencapai harga puncak Puncak (μs)	Sering terjadi (*) (%)
0,5	7
1,0	23
1,5	22
$\geq 2,0$	48

(*) prosentase seringnya terjadi masih memerlukan penelitian lebih lanjut

2.8 Sambaran Langsung Pada Gardu Induk

Sambaran langsung pada gardu induk bisa menyebabkan kerusakan peralatan sehingga pelayanan daya dapat terhenti dalam waktu lama. Untuk menghindari hal tersebut maka gardu induk memerlukan:

- a. Kawat tanah atau tiang penangkal petir yang berfungsi untuk menarik petir atau menerima sambaran petir. Kawat tanah ini ditempatkan di atas kawat-kawat fasa. Awalnya kawat tanah digunakan untuk perlindungan sambaran tidak langsung namun karena tegangan sistem yang tinggi dan tiang yang semakin tinggi maka jumlah sambaran langsung ke saluran makin banyak sehingga sambaran petir langsung yang diperhatikan.
- b. Kawat penghantar atau bagian dari konstruksi dengan impedansi rendah yang berfungsi menyalurkan pelepasan muatan dari petir ke tanah.
- c. Tahanan tanah yang rendah dengan menggunakan kawat tanah atau tiang penangkal petir perlindungan dianggap baik apabila 1000 sambaran ke gardu induk 999 sambaran akan mengenai pelindung dan 1 akan mengenai peralatan yang dilindungi, ini disebut sebagai proteksi sambaran 0,1%.

Untuk mendapatkan impedansi yang rendah dalam penggunaan kawat penghantar atau bagian dari konstruksi maka syaratnya adalah tahanan yang rendah dimana daya hantar dan penampang yang sesuai sambungan-sambungan hantaran yang baik dan bebas dari korosi, dan yang kedua adalah reaktansi yang rendah yaitu dengan mencegah adanya lekukan-lekukan penghantar yang taham dan rangkaian-rangkaian tertutup. Jika penghantar yang digunakan cukup panjang dan membentuk suatu rangkaian tertutup maka arus petir dengan muka yang curam akan menghasilkan tegangan yang tinggi akibat adanya induktansi, dan yang ketiga adalah jarak yang cukup dengan benda-benda lain yang bersifat menghantarkan arus listrik untuk mencegah mengalirnya arus melalui benda-benda tersebut ke tanah.

2.9 Sistem Proteksi Petir

Berdasarkan cara kerjanya, sistem proteksi petir dapat dibagi menjadi dua yaitu sebagai berikut:

a. Sistem dengan penangkap petir

Prinsip kerjanya adalah harus menyediakan titik pada ujung bangunan yang diamankan untuk sasaran sambaran petir, dengan harapan petir akan menyambar titik itu lebih dahulu, harus menyediakan saluran untuk menyalurkan arus petir ke tanah, dan harus menyediakan sistem pembumian untuk mendistribusikan arus petir yang masuk ke tanah dengan merata agar tidak menimbulkan kerusakan atau bahaya pada bagian dari bangunan atau pada manusia yang sedang berada di sekitarnya.

b. Sistem Disipasi (*Dissipation Array System*)

Pada prinsipnya DAS tidak bertujuan untuk mengundang arus petir agar menyambar terminasi udara yang sudah disediakan melainkan membayar arus petir agar tidak mengalir ke daerah yang dilindungi. apabila awan bermuatan bergerak ke suatu daerah maka akan menginduksi muatan listrik yang diatas permukaan tanah ataupun bangunan dibawah awan petir tersebut. Muatan yang terinduksi ini selanjutnya dikumpulkan oleh sistem pembumian DAS yang kemudian ke bentuk ion dengan fenomena yang disebut *point discharge*, yaitu setiap bagian benda yang runcing akan memindahkan muatan listrik hasil induksi ke molekul udara di sekitarnya bilamana titik temunya berada pada medan elektrostatik. Ionizer akan menghimpun ribuan titik-titik pertemuan secara individu dan sanggup untuk melepaskan muatan-muatan listrik hasil induksi tadi secara optimal, bilamana pada akhirnya dapat mengurangi beda potensial antara awan dan udara di sekitar ionizer. Dengan kata lain medan listrik yang dihasilkan akan semakin kecil sehingga memperkecil kemungkinan udara untuk tembus listrik sehingga terjadinya petir dapat dihindari.

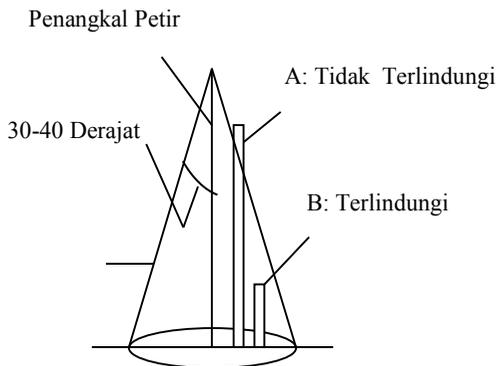
Berdasarkan tempatnya sistem proteksi petir dapat dibagi menjadi dua macam, yaitu:

a. Proteksi eksternal

Proteksi eksternal merupakan instalasi dan alat-alat di luar suatu struktur untuk menangkap dan menghantarkan arus surja petir ke pembumian. Proteksi eksternal petir fungsinya sebagai proteksi terhadap tegangan lebih petir jika terjadi sambaran secara langsung ke sistem atau bangunan yang dilindungi. Sistem proteksi eksternal yang sering digunakan terdiri dari tiga bagian yaitu *Air Terminal*, *Down Conductor* dan *Earthing System*.

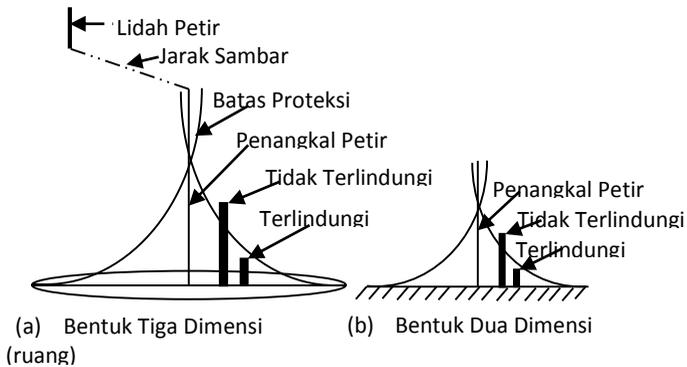
❖ *Air Terminal*

Air Terminal adalah bagian dari sistem proteksi petir eksternal yang bertujuan untuk menangkap kilatan petir. *Air Terminal* harus dipasang pada titik tinggi dari suatu bangunan atau peralatan yang akan dilindungi dari sambaran petir. Pada awalnya ruang proteksi dari suatu penangkal petir berbentuk kerucut dengan sudut puncak kerucut berkisar antara 30° hingga 35° . Pemilihan sudut proteksi ini menyatakan tingkat proteksi yang kita inginkan. Semakin kecil sudut proteksi semakin tinggi tingkat proteksi yang diperoleh, tetapi semakin mahal biayanya.



Gambar 2.9 Ruang Proteksi Konvensional

Ruang proteksi model kedua adalah ruang proteksi menurut model elektrogeometri, yang berbentuk kerucut juga seperti konsep “konvensional” hanya saja bidang miring dari kerucut tersebut melengkung dengan jari-jari tertentu. Besarnya jari-jari sama dengan jarak sambar dari lidah petir. Jarak sambar merupakan kemampuan menyambar atau menjangkau suatu benda. Jarak sambar dari lidah petir ini ditentukan oleh besarnya arus petir yang terjadi. Oleh karena itu, derajat lengkungan dari bidang miring kerucut dipengaruhi oleh besarnya arus petir yang terjadi.



(a) Bentuk Tiga Dimensi (ruang) (b) Bentuk Dua Dimensi

Gambar 2.10 Konsep Ruang Proteksi Menurut Elektromeetri Model

❖ *Down Conductor*

Down Conductor merupakan bagian dari sistem proteksi petir eksternal yang menghantarkan arus yang bersumber dari kilatan petir dari air terminal system ke *Earthing Termination System*. *Down Conductor* harus dipasang vertikal tegak lurus sehingga tercipta jarak terpendek antara ujung bangunan dengan bumi.

Tabel 2.3 Material yang digunakan untuk membuat Down Conductor

Material	Down Conductor (mm ²)
Cu	16
Al	25
Fe	30

❖ *Earthing System*

Earthing system merupakan bagian dari sistem proteksi eksternal yang berfungsi untuk mengalirkan arus petir ke tanah. Ujung *Down Conductor* dihubungkan dengan tahanan tanah yang besarnya maksimum bernilai 5 ohm. Untuk mendapatkan tahanan pembumian yang kecil diperlukan elektroda pembumian. Prinsip dasar untuk memperoleh tahanan pembumian sekecil mungkin adalah dengan membuat permukaan elektroda bersentuhan dengan tanah sebesar mungkin. Fungsi pengetanahan adalah untuk membatasi tegangan yang timbul antara peralatan dengan peralatan, peralatan dengan tanah, dan

meratakan gradien tegangan yang timbul pada permukaan tanah akibat arus kesalahan yang mengalir dalam tanah.

b. Proteksi Internal

Proteksi petir Internal adalah perlindungan terhadap sistem elektronika di dalam bangunan/gedung akibat tegangan lebih yang ditimbulkan oleh induksi elektromagnetik akibat sambaran petir langsung. Walaupun bangunan sudah dilindungi terhadap sambaran petir beberapa kerusakan pada peralatan listrik khususnya peralatan elektronika dapat disebabkan karena masuknya surja impuls petir melalui kabel listrik dan kabel komunikasi atau masuknya petir pada waktu sambaran langsung. Sistem proteksi petir internal dapat terdiri dari satu jenis ataupun beberapa alat-alat proteksi petir, antara lain:

❖ Sangkar Faraday

Sangkar Faraday yaitu piranti yang dimanfaatkan menjaga agar medan listrik di dalam ruangan tetap nol meskipun di sekelilingnya terdapat gelombang elektromagnetik dan arus listrik. Piranti tersebut berupa konduktor yang dipasang sedemikian rupa sehingga ruangnya terlindungi oleh konduktor tersebut.



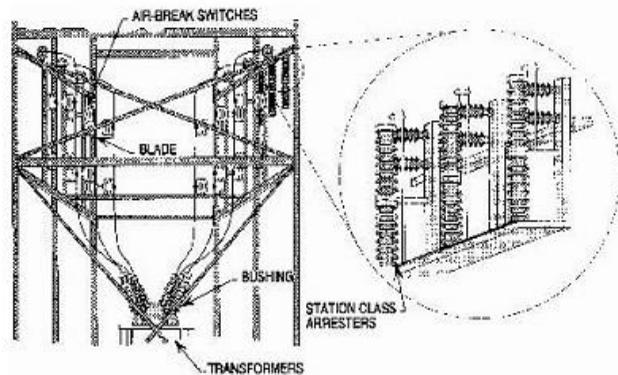
Gambar 2.11 Contoh proteksi sangkar Faraday

Efek Sangkar Faraday adalah suatu fenomena kelistrikan yang disebabkan oleh adanya interaksi partikel subatomik yang bermuatan, misalnya proton dan elektron. Ketika ada medan listrik yang mengenai sangkar konduktor maka akan ada gaya yang menyebabkan partikel bermuatan mengalami perpindahan tempat, gerakan perpindahan tempat

partikel bermuatan akan menghasilkan medan listrik yang berlawanan dengan medan listrik yang mengenainya sehingga tidak ada medan listrik yang masuk ke dalam sangkar konduktor tersebut.

❖ Arrester

Gangguan surja petir merupakan salah satu gangguan alamiah yang akan dialami sistem tenaga listrik, dan salah satu metode untuk mengatasinya yaitu dengan menggunakan arrester yang bekerja sebagai alat potong tegangan lebih pada peralatan. Arrester ini sangat bermanfaat apabila diaplikasikan pada peralatan-peralatan elektronika di suatu bangunan mengingat efek yang ditimbulkan petir sangat besar terhadap peralatan elektronika.



Gambar 2.12 Contoh arrester jenis jenis gardu^[9]

❖ *One Point Earthing System* yaitu pemasangan potensial aqualization busbar yang berfungsi sebagai terminal perbumian.

❖ Penggunaan trafo isolasi untuk mentransformasikan arus besar yang terjadi akibat sambaran petir jala-jala menjadi arus yang sangat kecil.

2.10 Tiang Penangkal Petir

Tipe tiang penangkal petir ada beberapa macam, yaitu :

1. Penangkal Petir Konvensional / Faraday / Franklin

Kedua ilmuwan tersebut Faraday dan Franklin menjelaskan system yang hampir sama, yakni system penyalur arus listrik yang

menghubungkan antara bagian atas bangunan dan grounding, sedangkan system perlindungan yang di hasilkan ujung penerima/splitzer adalah sama pada rentang 30 - 40 derajat. Perbedaannya adalah system yang di kembangkan Faraday bahwa kabel penghantar berada pada sisi luar bangunan dengan pertimbangan bahwa kabel penghantar juga berfungsi sebagai material penerima sambaran petir, yaitu berupa sangkar elektrik atau biasa di sebut dengan *sangkar faraday*.

2. Penangkal Petir Elektrostatis

Prinsip kerja penangkal petir elektrostatis mengadopsi sebagian system penangkal petir radio aktif, yaitu menambah muatan pada ujung finial/splitzer agar petir selalu memilih ujung ini untuk di sambar. Perbedaan dengan system radio aktif adalah jumlah energi yang dipakai.



Gambar 2.13 Contoh penangkal petir elektrostatis

Untuk penangkal petir radio aktif muatan listrik dihasilkan dari proses hamburan zat berradiasi sedangkan pada penangkal petir elektrostatis energi listrik yang dihasilkan dari listrik awan yang menginduksi permukaan bumi.

3. Penangkal Petir Radio Aktif

Penelitian terus berkembang akan sebab terjadinya petir, dan semua ilmuwan sepakat bahwa terjadinya petir karena ada muatan listrik di awan berasal dari proses ionisasi, maka untuk menggagalkan proses ionisasi dilakukan dengan cara menggunakan zat berradiasi seperti *Radium 226* dan *Ameresium 241* karena kedua bahan ini mampu menghamburkan ion radiasinya yang dapat menetralkan muatan listrik awan.



Gambar 2.14 Contoh penangkal petir radio aktif

Maka manfaat lain hamburan ion radiasi tersebut akan menambah muatan pada ujung finial/splitter, bila mana awan yang bermuatan besar tidak mampu di netralkan zat radiasi kemudian menyambar maka akan cenderung mengenai penangkal petir ini. Keberadaan penangkal petir jenis ini telah dilarang pemakaiannya, berdasarkan kesepakatan internasional dengan pertimbangan mengurangi zat beradiasi di masyarakat, selain itu penangkal petir ini dianggap dapat mempengaruhi kesehatan manusia.

Halaman sengaja dikosongkan

BAB III PERANCANGAN SISTEM

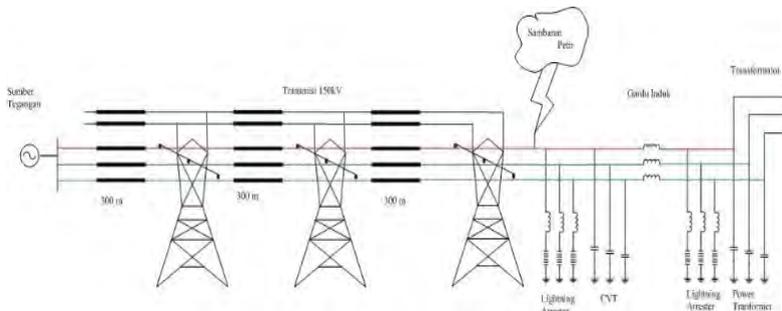
3.1. Bagian Perancangan Sistem

Perlindungan gardu induk dari sambaran petir dapat dianalisa menggunakan metode bola bergulir. Tiang penangkal petir dan kawat tanah digunakan untuk melindungi gardu induk dari sambaran petir. Dengan mengasumsikan seolah-olah terdapat suatu bola dengan radius tertentu yang bergulir di atas tanah dan di sekeliling suatu gedung yang dihubungkan dengan konduktor terminasi udara. Sehingga diperlukan pengaman dari sambaran petir dengan menghitung jarak pengamanan yang dapat dilakukan oleh peralatan. Berikut ini ada beberapa bagian dari sistem perancangan Tugas Akhir meliputi :

1. Analisa dan pemodelan Gardu Induk 150 kV Sukolilo – Surabaya saat petir mengenai peralatan gardu induk dalam software EMTP-RV.
2. Analisa peletakan tiang penangkal petir pada Gardu Induk 150 kV Sukolilo – Surabaya.

3.2. Pemodelan Gardu Induk dengan EMTP-RV

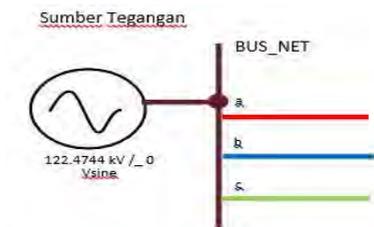
Dalam simulasi kali ini menggunakan perangkat lunak EMTP-RV (ElectroMagnetic Transien Program – Restructured Version) untuk memodelkan dan mensimulasikan koordinasi isolasi gardu induk 150kV Sukolilo-Surabaya terhadap sambaran petir dan dapat berjalan normal dengan perangkat lunak Windows 9x/NT/2000/ XP.



Gambar 3.1 Simulasi gardu induk pada EMTP-RV

EMTP-RV memiliki kemampuan membuat dan menyusun rangkaian listrik dan memilih komponen dari menu yang tersedia. Pada sistem jaringan transmisi 150 kV di Sukolilo-Surabaya terdiri dari

generator, transformator dan penghantar, dimasukkan pada pemodelan EMTP-RV yang kemudian akan disimulasikan untuk mengetahui tegangan maksimum pada salah satu saluran transmisi tersebut. EMTP-RV memiliki keunggulan dalam pengoperasiannya karena memiliki beberapa contoh project yang telah siap untuk digunakan, sehingga memudahkan pengguna dalam mesimulasikan koordinasi isolasi ataupun rangkaian digital dari fenomena transien elektro magnetik. Dalam pemakaiannya ada beberapa komponen yang digunakan selama mensimulasikan gardu induk, seperti sebagai berikut :

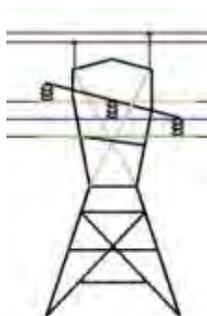


Gambar 3.2 Sumber tegangan pada simulasi EMTP-RV

Sebagai pemodelan dari sumber tegangan. Tegangan yang digunakan :

$$V_{\min} = \left(\frac{V_{\text{nominal}} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) = \left(\frac{150 \text{ kV} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) = 122,4744 \text{ kV}$$

Dengan menggunakan frekuensi : 50 Hz



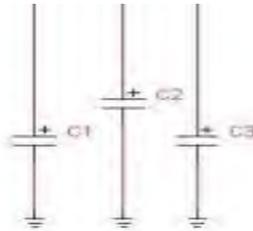
Gambar 3.3 Tower transmisi pada simulasi EMTP-RV

Sebagai pemodelan dari sumber tower transmisi. Menggunakan lima saluran , tiga saluran udara dan dua saluran tanah (kabel tanah).



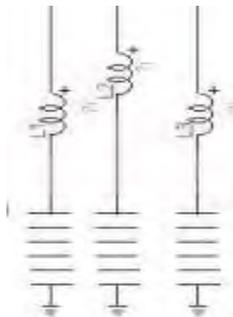
Gambar 3.4 Kawat transmisi pada simulasi EMTP-RV

Sebagai pemodelan dari kabel transmisi. Tiga saluran udara (warna merah, biru dan hijau) dan dua saluran tanah/kabel tanah (warna coklat).



Gambar 3.5 CVT pada simulasi EMTP-RV

Sebagai pemodelan dari CVT (Capacitive Voltage Transformer). Terdiri dari tiga kapasitor masing- masing yang bernilai 5 nf.



Gambar 3.6 LA pada simulasi EMTP-RV

Sebagai pemodelan dari arrester. Menggunakan tipe ZnO A0_1_588.

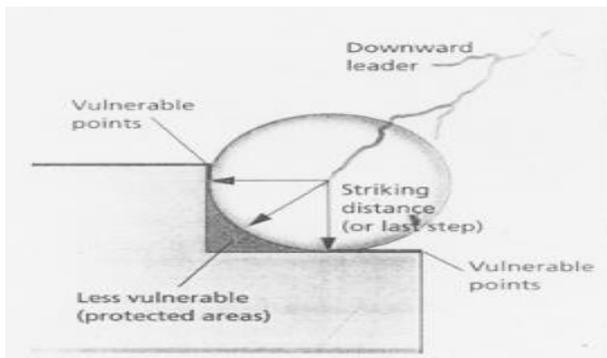


Gambar 3.7 Petir pada simulasi EMTP-RV

Sebagai pemodelan dari sambaran petir menggunakan standar IEC 62305 dengan rise time (1,2 μ s, 1,6 μ s, 2 μ s, 3 μ s, 4 μ s dan 5 μ s) dan I_{max} (10kA, 50kA, 100 kA dan 150 kA)

3.3. Metode Bola Bergulir

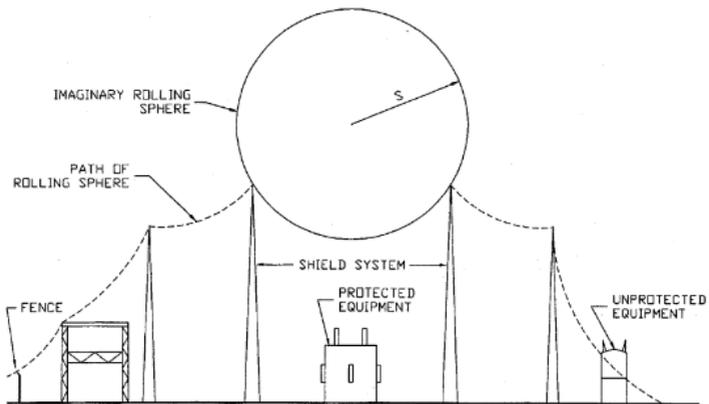
Sesuai dengan teori petir yang telah dijabarkan sebelumnya, dapat kita asumsikan bahwa sambaran petir mencapai tanah atau bangunan pada titik tempat suatu aliran keatas (*upward streamer*) dimulai. Aliran atau berkas (*streamer*) ini dimulai pada pada titik dengan intensitas medan terbesar dan dapat bergerak ke segala arah menuju perintis kebawah (*downward leader*).



Gambar 3.8 Perkembangan langkah terakhir (*Last Step*)^[9]

Karena hal inilah maka pada bangunan – bangunan tinggi petir dapat menyambar bagian samping bangunan daripada titik tertinggi

bangunan tersebut. Posisi dari intensitas medan yang terbesar akan terletak pada titik perintis kebawah sebelum langkah terakhir (*last step*). Jarak sebelum terjadinya langkah terakhir ini disebut dengan jarak sambaran (*striking distance*) dan akan ditentukan oleh besarnya (*amplitudo*) arus petir. Sebagai contoh, beberapa titik dengan jarak yang sama terhadap langkah terakhir dari perintis kebawah akan memiliki kesempatan yang sama untuk tersambar petir, sementara titik – titik yang berjarak lebih jauh akan lebih tidak mungkin tersambar. Jarak sambaran ini dapat ditunjukkan oleh suatu bola dengan jari-jari yang sama dengan jarak sambaran tersebut. Hipotesis ini dapat dijabarkan lebih lanjut untuk menjelaskan kenapa sudut – sudut dari suatu bangunan lebih rentan terhadap sambaran petir. Gambar dibawah menunjukkan suatu bola menggelinding pada permukaan suatu bangunan. Jari-jari lingkaran adalah jarak sambaran(*striking distance*) atau langkah terakhir (*last step*) dari peluahan petir.



Gambar 3.9 Jarak Sambaran^[9]

Oleh karena itu dapat kita lihat dengan jelas bahwa bagian sudut suatu bangunan terpapar oleh seperempat dari lintasan bola. Hal ini berarti apabila langkah terakhir jatuh pada seperempat bagian tersebut maka petir akan menyambar sudut bangunan tersebut. Karena *downward leader* dapat mendekat dari semua arah maka semua sudut pendekatan yang mungkin dapat disimulasikan dengan menggelindingkan sebuah bola khayal disekeliling dan melalui suatu bangunan yang akan dilindungi hingga ke tanah. Bagian bangunan yang tersentuh akan

mebutuhkan perlindungan terhadap petir. Daerah yang tidak terkena permukaan bola tidak perlu diberikan suatu perlindungan terhadap petir. Metode ini cocok untuk menentukan zona perlindungan untuk semua jenis bangunan, terutama bangunan-bangunan yang memiliki struktur geometri yang rumit. Tiang udara dapat digunakan untuk menjauhkan bola bergulir dari bangunan yang akan dilindungi. Jika didimensikan dengan baik, tiang udara akan memastikan bahwa bola tidak akan menyentuh bagian manapun dari atap. Tinggi dari tiang udara yang dipakai sekarang adalah fungsi dari jari-jari bola bergulir dan jarak antara tiang udara tersebut. Jika tiang udara diatur dalam susunan persegi, maka yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan kedalaman penetrasi bola bergulir adalah jarak antara dua tiang yang berseberangan secara diagonal, bukan yang sejajar.

Setelah daerah yang membutuhkan perlindungan dari suatu bangunan ditentukan dengan menggunakan metode bola bergulir, maka selanjutnya adalah merancang suatu jaringan penghenti udara (*air termination network*). Jaringan penghenti udara dapat terjalin dari tiga metode yang telah dijelaskan sebelumnya mengenai pertimbangan rancangan sistem perlindungan petir eksternal. Yaitu tiang udara (*finial*), Konduktor tergantung (*catenary/suspended conductor*), dan Jaringan konduktor jala.

3.4. Metode Peletakan Penangkal Petir

Perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung dapat dianalisa menggunakan metode bola bergulir. Tiang penangkal petir (*lightning mast*) dan kawat tanah digunakan untuk melindungi gardu induk dari sambaran petir langsung. Seperti berikut :

a. Perlindungan dengan Satu Tiang Penangkal Petir

Menampilkan metode bola bergulir menggunakan satu tiang penangkal petir untuk melindungi objek. Lingkaran tersebut adalah bola yang bergulir yang merupakan sambaran petir. Untuk menentukan besarnya impedansi surja dari konduktor dengan korona (Z_s) terlebih dahulu harus dicari nilai radius korona dari konduktor.

$$R_c = \ln\left(\frac{2xh}{R_c}\right) - \frac{V_c}{E_0} \quad (3.1)$$

Dimana :

R_c = radius korona (meter) ;

h = tinggi rata-rata dari konduktor (meter)

V_c = BIL untuk post insulator (kV)

E_0 = Batas gradien korona, besarnya sama dengan 1500 kV/m

Dengan menggunakan iterasi Newton-Raphson, persamaan tersebut berubah menjadi:

$$R_c \approx 1,2 \times 10^{-4} V_c \quad (3.2)$$

Sehingga besarnya impedansi surja dari konduktor adalah :

$$Z_s = 60 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{2h}{R_c}\right) \times \ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \quad (3.3)$$

Dimana r = radius dari konduktor (meter)

Dengan mengetahui nilai Z_s (impedansi surja) dalam satuan ohm dan I_s yaitu arus sambaran (kA) yang diijinkan dalam gardu induk dapat ditentukan besarnya jarak sambaran yang menjadi nilai dari radius bola (S).

$$I_s = 2,2 \times \frac{BIL}{Z_s} \quad (3.4)$$

$$S = 8 \text{ k}l^{0,65} \quad (3.5)$$

$$C = \sqrt{S^2 - (S - A)^2} \quad (3.6)$$

$$T = S - C \quad (3.7)$$

Dimana : (semua satuan dalam meter)

S = radius bola ; H = Tinggi Tiang penangkal petir

A = Tinggi bus ; C = jarak horisontal dari titik asal bola ke bus

T = Jarak maksimum dari tiang penangkal petir ke bus untuk perlindungan

b. Jarak Maksimum Antara Dua Tiang Penangkal Petir

Penentuan jarak maksimum antara dua tiang penangkal petir adalah untuk melindungi gardu induk dari sambaran samping.

$$W = \sqrt{S^2 - (S - A)^2} \quad (3.8)$$

$$Z = W - Y \quad (3.9)$$

$$L = \sqrt{S^2 - Z^2} \quad (3.10)$$

$$X = 2L \quad (3.11)$$

Dimana : (semua satuan dalam meter)

S = Radius bola ;

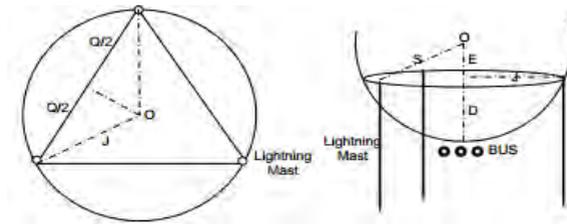
W = jarak horisontal dari titik asal bola ke bus

Z = Jarak horisontal antara OOS dan garis batas bola antara dua tiang penangkal petir

- Y = jarak antara tiang penangkal petir ke bus
- L = Setengah jarak antara dua tiang penangkal petir
- X = Jarak maksimum antara dua tiang penangkal petir

c. Jarak Maksimum untuk Tiga Tiang Penangkal Petir

Penentuan jarak maksimum untuk tiga tiang penangkal petir seperti pada gambar berikut :



Gambar 3.10 Proteksi Tiga Tiang Penangkal Petir

$$Q = 2 \cdot \cos\left(\pi \frac{30}{180}\right) \cdot J$$

- Dimana : (semua satuan dalam meter)
- Q = Jarak antara tiang penangkal petir ketika perlindungan dengan tiga tiang penangkal petir.
 - J = Jarak horisontal antara OOS dan tiang penangkal petir

d. Jarak Maksimum Untuk Empat Tiang Penangkal Petir

Penentuan jarak maksimum antara empat tiang penangkal petir untuk melindungi gardu induk dari sambaran vertikal dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$D = H - A \tag{3.12}$$

$$E = S - D \tag{3.13}$$

$$L = \sqrt{S^2 - Z^2} \tag{3.14}$$

$$K = 2 \cdot J \tag{3.15}$$

$$P = \frac{k}{\sqrt{2}} \tag{3.16}$$

- Dimana : (Semua satuan dalam meter)
- D = Perbedaan elevasi antara tiang penangkal petir dan bus
 - E = Perbedaan elevasi antara tiang penangkal petir dan OOS

J = Jarak horisontal antara OOS dan tiang penangkal petir
 K = Jarak diagonal antara tiang penangkal petir untuk empat tiang penangkal petir
 P = Jarak antara tiang penangkal petir untuk empat tiang penangkal petir

e. Perlindungan dengan Satu Kawat Tanah

Dengan mengetahui nilai Zs dan Is dapat ditentukan besarnya jarak sambaran yang menjadi nilai dari radius bola. Besarnya jarak pisah horisontal maksimum dari kawat tanah dan bus untuk perlindungan pada bus dengan tinggi A adalah :

$$R = \sqrt{S^2 - (S - H)^2} \quad (3.17)$$

$$R = \sqrt{S^2 - (S - A)^2} \quad (3.18)$$

$$C = R - T \quad (3.19)$$

Dimana : (semua satuan dalam meter)

S = radius bola ;

H = Tinggi kawat tanah A = Tinggi bus

R = Jarak horisontal antara OOS dan kawat tanah

T = Jarak horisontal antara OOS dan bus

C = Jarak horisontal antara kawat tanah dan bus

f. Jarak Maksimum antara Dua Kawat Tanah

Perhitungan jarak maksimum antara dua kawat tanah sebagai perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung adalah sebagai berikut :

$$D = H - A \quad (3.20)$$

$$E = S - D \quad (3.21)$$

$$L = \sqrt{S^2 - E^2} \quad (3.22)$$

$$X = 2L \quad (3.23)$$

Dimana :

Semua satuan dalam meter

D = Jarak elevasi antara kawat tanah dan bus ;

H = Tinggi kawat tanah

A = Tinggi bus ;

S = radius bola

E = Perbedaan elevasi antara kawat tanah dan OOS

L = Setengah dari jarak antara dua kawat tanah

X = jarak maksimum antara dua kawat tanah

Halaman sengaja dikosongkan

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISA

4.1. Profil gardu induk 150 kV Sukolilo – Surabaya

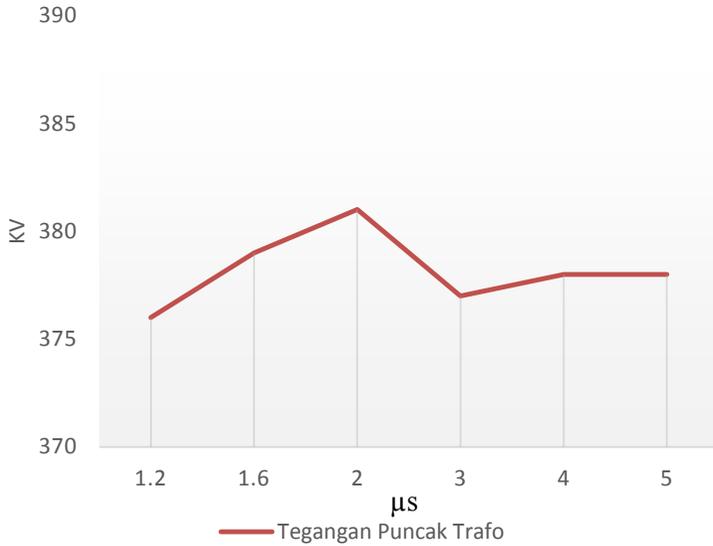
Gardu induk yang dianalisis terhadap sambaran petir langsung adalah gardu induk 150 kV Sukolilo - Surabaya. Incoming gardu induk 150 kV Sukolilo – Surabaya adalah GI 150 kV Rungkut - Surabaya. Outgoingnya tegangan yaitu 150 kV menuju ke Kenjeran I, Kenjeran II, Wonokromo I, Wonokromo II Ngagel I dan Ngagel II. Untuk perlindungan terhadap sambaran petir langsung, gardu induk ini menggunakan kawat tanah yang dipasang di atas kuncup serandang dengan ketinggian 18 m. layout dapat dilihat di lampiran. Dari layout tersebut data-data yang diambil untuk menentukan perlindungan gardu induk 150 kV Sukolilo – Surabaya dari sambaran petir langsung dengan metode bola bergulir adalah:

Tabel 4.1 Data Profil Gardu Induk 150 kV Sukolilo - Surabaya

Tegangan nominal	150 kV
BIL Bus	650 kV
BIL Peralatan	650 kV
Diameter Konduktor Fasa	32,9 mm
Tinggi konduktor fasa	13 m
Tinggi objek yang dilindungi	13 m
Tinggi tiang penangkal petir	30 m
Tinggi kawat tanah	18 m

4.2. Simulasi Nilai Puncak Tegangan terhadap Perubahan Nilai Rise Time

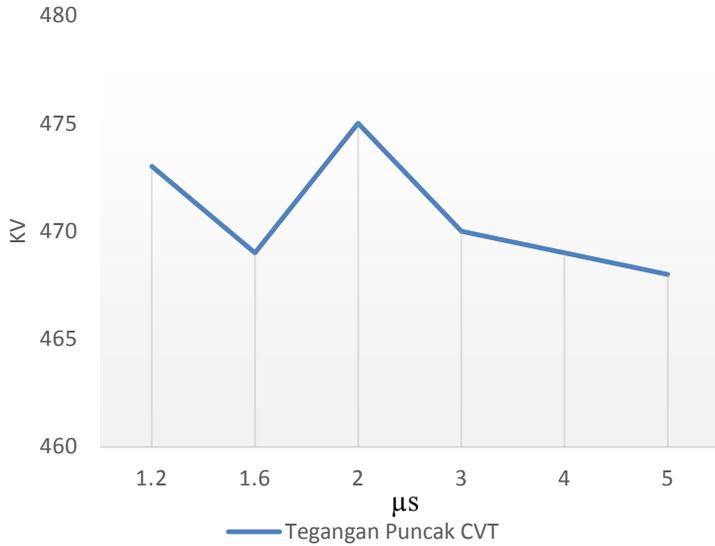
Pemodelan dari sambaran petir pada gardu induk akan di simulasikan dengan menggunakan EMTP-RV. Dalam simulasi ini, akan diasumsikan adanya sambaran petir pada tower terdekat dari gardu induk sehingga terjadi back-flashover. Pada pembahasan ini akan disimulasikan adanya sambaran petir yang mengenai peralatan pada gardu induk, sehingga ada gelombang surja yang mengalir ke sistem pada gardu induk. Dilakukan beberapa simulasi dengan mengubah nilai arus maksimalnya (10-150kA) dan front time (1,2-5 μ s).



Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada trafo (I_{max} petir 10 kA)

Tabel 4.2 Tegangan puncak trafo saat I_{max} petir 10 kA

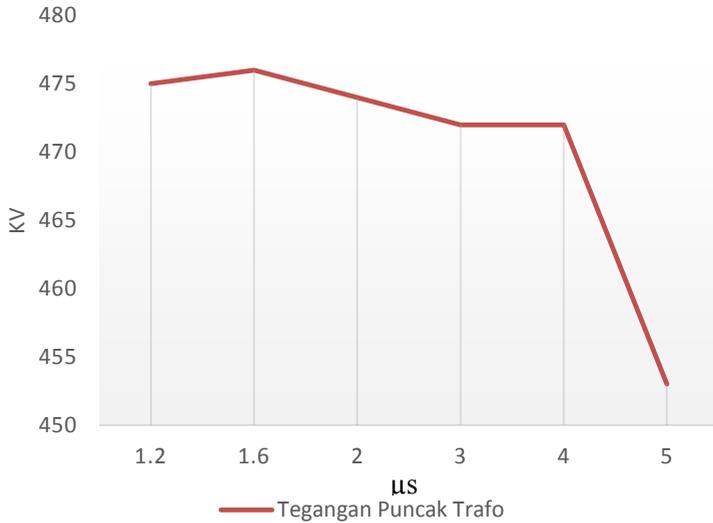
Tegangan puncak pada Trafo 10 kA	
time rise	tegangan puncak
1.2	376
1.6	379
2	381
3	377
4	378
5	378



Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada CVT (I_{\max} petir 10 kA)

Tabel 4.3 Tegangan puncak CVT saat I_{\max} petir 10 kA

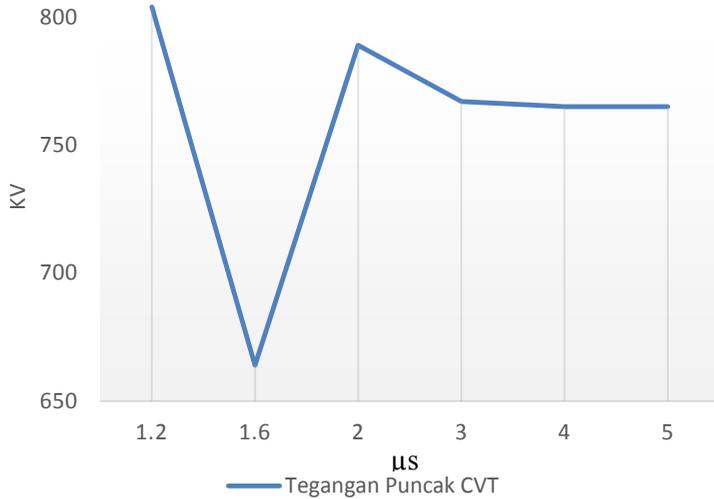
tegangan puncak pada CVT 10 kA	
time rise	tegangan puncak
1.2	473
1.6	469
2	475
3	470
4	469
5	468



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada trafo (I_{max} petir 50 kA)

Tabel 4.4 Tegangan puncak trafo saat I_{max} petir 50 kA

tegangan puncak pada Trafo 50 kA	
time rise	tegangan puncak
1.2	475
1.6	476
2	474
3	472
4	472
5	453



Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada CVT (I_{\max} petir 50 kA)

Tabel 4.5 Tegangan puncak CVT saat I_{\max} petir 50 kA

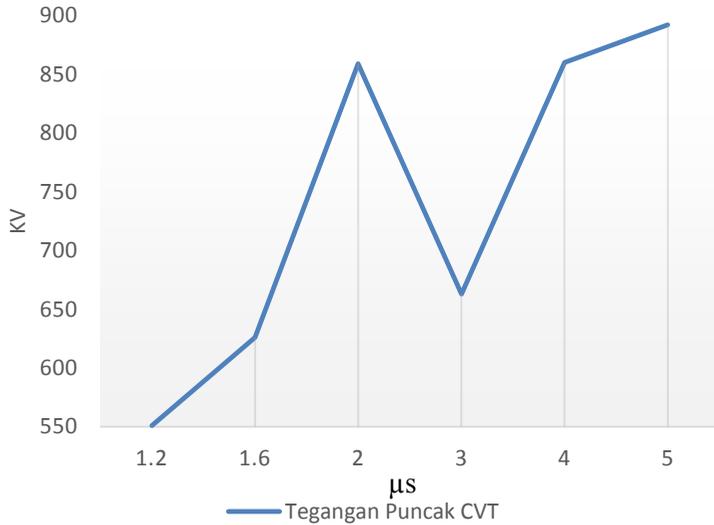
tegangan puncak pada CVT 50 kA	
time rise	tegangan puncak
1.2	804
1.6	664
2	789
3	767
4	765
5	765



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada trafo (I_{max} petir 100 kA)

Tabel 4.6 Tegangan puncak trafo saat I_{max} petir 100 kA

tegangan puncak pada Trafo 100 kA	
time rise	tegangan puncak
1.2	603
1.6	512
2	502
3	497
4	494
5	491



Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada CVT (I_{\max} petir 100 kA)

Tabel 4.7 Tegangan puncak CVT saat I_{\max} petir 100 kA

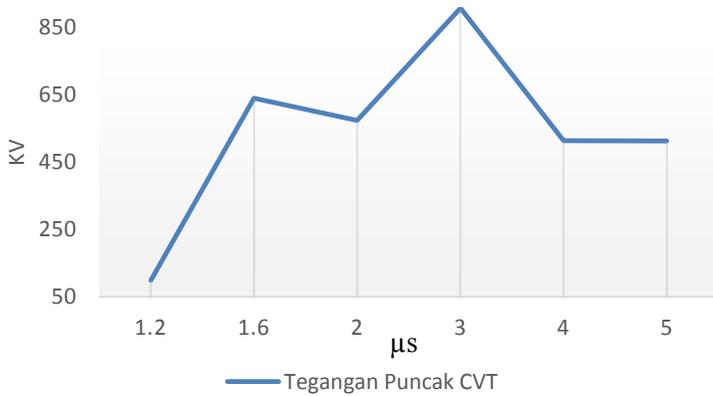
tegangan puncak pada CVT 100 kA	
time rise	tegangan puncak
1.2	551
1.6	626
2	859
3	663
4	860
5	892



Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada trafo (I_{\max} petir 150 kA)

Tabel 4.8 Tegangan puncak trafo saat I_{\max} petir 150 kA

tegangan puncak pada Trafo 150 kA	
time rise	tegangan puncak
1.2	99
1.6	640
2	574
3	516
4	514
5	513



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Nilai Rise Time Terhadap Nilai Tegangan puncak pada CVT (I_{\max} petir 150 kA)

Tabel 4.9 Tegangan puncak CVT saat I_{\max} petir 150 kA

Tegangan puncak pada CVT 150 kA	
time rise	tegangan puncak
1.2	99
1.6	640
2	574
3	908
4	514
5	513

Menurunnya tegangan puncak dipengaruhi oleh dua hal yaitu: arus maksimum dan rise time dari petir. Jadi saat ada kenaikan nilai dari rise time maka tegangan puncak yang diukur pada trafo dan CVT akan mengalami penurunan. Hal ini juga terjadi pada saat arus maksimum petir diubah-ubah, nilai puncak yang diukur pada trafo dan CVT akan mengalami perubahan, apabila arus maksimumnya di naikan maka

tegangan puncak juga akan naik. Pada saat I_{max} 150 kA dan rise time 1,2 dapat terjadi back flashover. Karena arus yang masuk terlalu cepat dan tegangan yang masuk terlalu besar. Nilai tegangan yang terukur pada CVT lebih tinggi dari pada trafo, hal ini dikarenakan tegangan surja petir yang belum sepenuhnya diredam oleh *lightning arrester*.

4.3. Perlindungan Gardu Induk Menggunakan Tiang Penangkal Petir

Untuk perlindungan menggunakan tiang penangkal petir:

1. Menentukan nilai Radius korona dari konduktor

Dengan persamaan (3.1) dapat dihitung besarnya nilai radius korona dari konduktor Dimana untuk BIL post insulator besarnya 650 kV.

$$R_c \approx 1,2 \times 10^{-4} V_c \quad (3.1)$$

$$R_c \approx 1,2 \times 10^{-4} \times 650$$

$$R_c \approx 0,078 \text{ meter}$$

2. Menentukan impedansi surja dengan korona

Dengan tinggi konduktor(h) yang nilainya 13 meter, radius dari konduktor (r) 0,01645 meter dan nilai R_c yang didapatkan dari perhitungan sebelumnya adalah 0,078 meter maka besarnya impedansi surja dari konduktor dengan korona dapat dihitung dengan persamaan (3.2).

$$Z_s = 60 \sqrt{\ln\left(\frac{2xh}{R_c}\right) \times \ln\left(\frac{2xh}{r}\right)} \quad (3.2)$$

$$Z_s = 60 \sqrt{\ln\left(\frac{2 \times 13}{0,078}\right) \times \ln\left(\frac{2 \times 13}{0,01645}\right)} = 393 \text{ ohm}$$

Jadi besar impedansi surja dari konduktor adalah 393 ohm.

3. Menghitung arus sambaran kritis (I_s) dimana BIL untuk gardu induk 150kV-650kV dengan persamaan (3.3).

$$I_s = 2,2 \times \frac{BIL}{Z_s} \quad (3.3)$$

$$I_s = 2,2 \times \frac{650}{393} = 3,64 \text{ m}$$

4. Menghitung jarak sambaran (S) yang menjadi sphere radius dengan menggunakan persamaan (3.4)

$$S = 8 k I^{0,65} \quad (3.4)$$

Dimana nilai $k=1,2$ untuk tiang penangkal petir

$$S = 8 \times 1,2 \times 3,64^{0,65} = 22,23$$

5. Perlindungan dengan Satu Tiang Penangkal Petir

Dengan persamaan (3.4), (3.5), dan (3.6) dapat dihitung nilai T dimana T adalah jarak horisontal maksimum dari tiang ke sebuah objek yang dilindungi dengan tinggi A, dari sambaran petir langsung. Berdasarkan data didapat bahwa objek yang akan dilindungi adalah 13 meter yang merupakan tinggi konduktor. Sebagai catatan ketika mendesain perlindungan terhadap sambaran petir langsung pada gardu induk direkomendasikan didasarkan pada parameter dari bus tertinggi.

$$H = 30 \text{ m}$$

$$A = 13 \text{ m}$$

$$C = \sqrt{S^2 - (S - A)^2} \quad (3.5)$$

$$C = \sqrt{22,23^2 - (22,23 - 13)^2}$$

$$C = \sqrt{408,98} = 20,22 \text{ m}$$

$$T = S - C$$

$$T = 22,23 - 20,22 = 2,01 \text{ m} \quad (3.6)$$

6. Jarak maksimum antara dua tiang untuk sambaran samping.

$$W = \sqrt{S^2 - (S - A)^2} \quad (3.7)$$

$$W = \sqrt{22,23^2 - (22,23 - 13)^2}$$

$$W = 20,22 \text{ m}$$

$$Y = 4 \text{ m}$$

$$Z = W - Y \quad (3.8)$$

$$Z = 20,22 - 4 = 16,22 \text{ m}$$

$$L = \sqrt{S^2 - Z^2} \quad (3.9)$$

$$L = \sqrt{22,23^2 - 16,22^2}$$

$$L = 15,2 \text{ m}$$

$$X = 2L \quad (3.10)$$

$$X = 2 \times 15,2 = 30,4 \text{ m}$$

Nilai tersebut adalah jarak maksimum dari dua tiang untuk perlindungan bus dengan tinggi A = 13m.

7. Jarak maksimum antara empat tiang penangkal petir.

Jarak maksimum antara empat tiang penangkal petir dapat dihitung dengan persamaan (3.11), (3.12), (3.13), (3.14) dan (3.15) sebagai berikut :

$$D = H - A \quad (3.11)$$

$$D = 30 - 13 = 17 \text{ m}$$

$$E = S - D \tag{3.12}$$

$$E = 22,23 - 17 = 5,23 \text{ m}$$

$$L = \sqrt{S^2 - Z^2} \tag{3.13}$$

$$L = \sqrt{22,23^2 - 5,23^2} = 21,6 \text{ m}$$

$$K = 2 \cdot J \tag{3.14}$$

$$K = 2 \times 21,6 = 43,19 \text{ m}$$

$$P = \frac{k}{\sqrt{2}} \tag{3.15}$$

$$P = \frac{43,2}{\sqrt{2}} = 30,54 \text{ m}$$

8. Jarak maksimum antara tiga tiang penangkal petir.

Jarak maksimum antara tiga tiang penangkal petir dapat dihitung dengan persamaan (3.16).

$$Q = 2 \cdot \cos\left(\pi \frac{30}{180}\right) \cdot J \tag{3.16}$$

$$Q = 2 \cdot \cos\left(\pi \frac{30}{180}\right) \cdot 21,6 = 37,4 \text{ m}$$

Dari perhitungan yang diperoleh maka dapat disimpulkan nilai jarak pisah maksimum antar tiang penangkal petir seperti sebagai berikut

Tabel 4.10 Jarak pisah maksimum antar tiang penangkal petir

Jarak	Jarak pisah maksimum tiang penangkal petir
X	43,19
Y	37,4
Z	30,4

Untuk menentukan hasil tinggi tiang penangkal petir yang optimum maka dilakukan perhitungan dengan mencoba menentukan jarak maksimum pada berbagai tinggi tiang penangkal petir. Hasil perhitungan untuk jarak pisah maksimum untuk satu, dua, tiga dan empat tiang penangkal petir dari berbagai ketinggian tiang penangkal petir dengan tinggi bus (A) = 13 m dan jarak sambaran (S) = 22,23 meter ditunjukkan pada tabel 4.3 dibawah ini:

Tabel 4.11 Jarak Pisah Maksimum Untuk Penggunaan Tiang Penangkal Petir dengan tinggi bus 13 m dan jarak sambaran 22,23 m

Tinggi Tiang (meter)	Satu Tiang (meter)	Dua Tiang (Z) (Meter)	Tiga Tiang (Y) (Meter)	Empat Tiang (meter)	
				Jarak Antar Tiang	Jarak Diagonal (X)
14	0,43	30,40	11,42	9,32	13,18
15	0,80	30,40	15,96	13,03	18,43
16	1,12	30,40	19,32	15,77	22,31
17	1,38	30,40	22,03	17,99	25,44
18	1,60	30,40	24,33	19,86	28,09
19	1,77	30,40	26,31	21,48	30,38
20	1,89	30,40	28,05	22,90	32,39
21	1,97	30,40	29,58	24,15	34,16
22	2,01	30,40	30,94	25,26	35,73
23	2,01	30,40	32,15	26,25	37,13
24	2,01	30,40	33,23	27,13	38,37
25	2,01	30,40	34,18	27,91	39,47
26	2,01	30,40	35,03	28,60	40,45
27	2,01	30,40	35,77	29,20	41,30
28	2,01	30,40	36,41	29,73	42,04
29	2,01	30,40	36,96	30,18	42,68
30	2,01	30,40	37,42	30,56	43,21
31	2,01	30,40	37,80	30,86	43,65
32	2,01	30,40	38,09	31,10	43,99
33	2,01	30,40	38,31	31,28	44,24
34	2,01	30,40	38,44	31,39	44,39
35	2,01	30,40	38,50	31,44	44,46

Dengan daerah yang ingin dilindungi untuk tiap bagian maksimumnya adalah 28 m x 28 m maka berdasarkan tabel di atas, tinggi tiang yang optimum digunakan untuk jarak tersebut adalah 26 m. Pada gardu induk di ilustrasikan ada beberapa section dimana tiap section terdiri dari beberapa tiang penangkal petir. Hal ini akan ditunjukkan pada tabel 4.4 :

Tabel 4.12 Pembagian penangkal petir berdasarkan letak pada section

Nomor section	Nomor Penangkal Petir
1	1,2,23,24
2	2,3,24,25
3	3,4,26,27
4	1,2,11,12
5	2,3,10,11
6	3,4,6,7
7	4,5,8,9
8	5,6,7,8
9	9,10,14,15
10	8,9,15,16
11	7,8,16,17
12	13,14,22,21
13	14,15,20,21
14	15,16,19,20
15	16,17,18,19

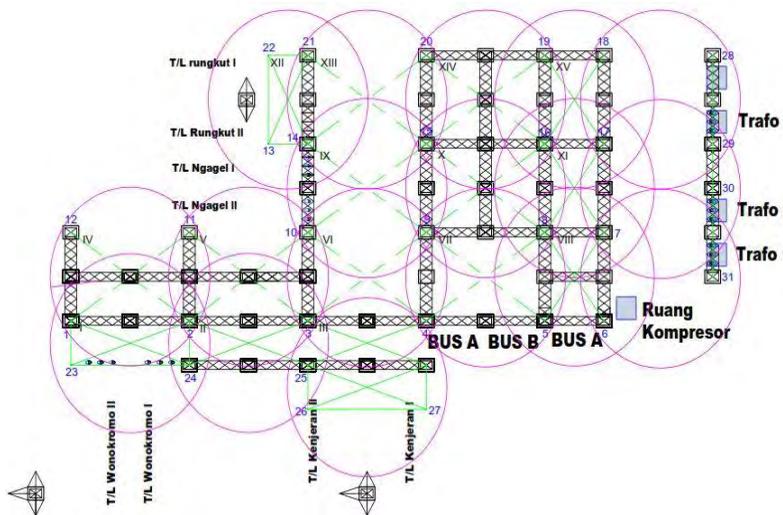
Tabel 4.13 Pembagian section berdasarkan luas daerah yang terlindungi oleh penangkal petir

Tipe Section	Nomor section	Luas bagian terlindungi
I	4,5,6,7,9,10,13 dan 14	28 m x 28 m
II	1,2,8,11 dan 15	14 m x 28 m
III	3	28 m x 28,255 m
IV	12	14,255 m x 28 m
V	LA no. 29-31	1 m x 28 m 1 m x 14 m

Untuk penempatan tiang penangkal petir bisa dilihat pada lampiran. Dari layout tersebut terlihat bahwa:

1. Dibutuhkan sebanyak 31 tiang penangkal petir untuk melindungi gardu induk dari sambaran langsung dengan tinggi 26 m. Tiang 1 sampai 21 tiang-tiang ini dipasang di atas kuncup dari serandang.
2. Untuk section I memiliki jarak antar tiang 28 m x 28 m sehingga nilai X adalah 39,598 m. karena nilai X lebih kecil dari 40,45 m

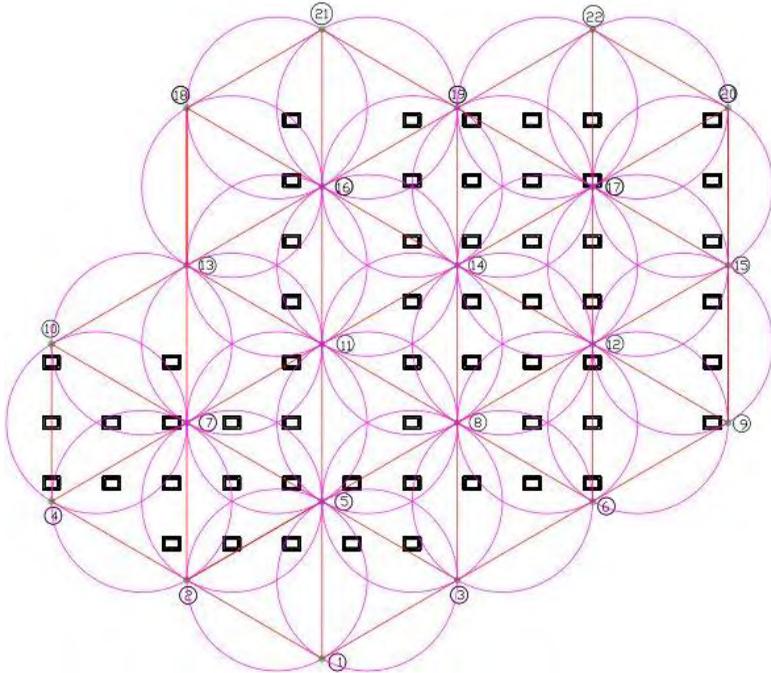
- maka daerah antara empat tiang tersebut terlindungi dari sambaran vertikal. Jarak antaradua tiang yang besarnya 28 m juga masih berada di bawah nilai Z sehingga aman dari sambaran samping.
3. Pada section II jarak antar tiang adalah 14 m x 28 m sehingga nilai X yang merupakan diagonalnya adalah 31,205 m. karena nilai X tersebut di bawah 40,45 maka daerah antara empat tiang tersebut terlindungi. Jarak antara dua tiang yaitu untuk tiang 1 dan 2 sebesar 28 m dan untuk tiang 1-23 dan 2-24 memiliki jarak 14 m sehingga jaraknya di bawah nilai Z yang besarnya 30,4 m sehingga aman dari sambaran samping.
 4. Untuk section III memiliki jarak 28 m x 28,255 m sehingga nilai X untuk empat tiang ini adalah 39,779 m. karena nilai X lebih kecil dari 40,45 m maka daerah antara empat tiang tersebut terlindungi dari sambaran vertikal. Jarak antara tiang 3 dan 4 adalah 28 m dan jarak antara tiang 26 dan 27 yaitu 14,255 m dimana kedua nilai tersebut di bawah dari nilai Z yaitu 21,9 m sehingga aman dari sambaran sampingan.
 5. Untuk section IV memiliki jarak antara 14,255 m x 28 m sehingga nilai X untuk empat tiang ini adalah 31,420 m. karena nilai X lebih kecil dari 40,45 m maka daerah antara empat tiang tersebut terlindungi dari sambaran vertikal. Jarak antara tiang 13 dan 22 adalah 28 m dan jarak antara tiang 21 dan 22 yaitu 14,255 m dimana kedua nilai tersebut di bawah dari nilai Z yaitu 21,9 m sehingga aman dari sambaran sampingan.
 6. Untuk section V terdiri dari dua penangkal petir yang memiliki dua macam jara, yaitu 14 m dan 28 m. Karena nilai X lebih kecil dari 30,5 m maka daerah antara dua tiang tersebut terlindungi dari sambaran vertical dan samping. Jarak antara tiang 28-29 dan 30-31 adalah 28 m dan jarak antara tiang 29-30 yaitu 14 m.



Gambar 4.9 Gambar peletakan penangkal petir dengan empat penangkal petir

Gambar diatas merupakan gambar dari posisi tiang penangkal petir. Angka pada gambar mewakili jumlah tiang penangkal petir pada gardu induk. Model peletakan posisi tiang penangkal yang digunakan diatas yaitu model empat tiang penangkal petir. Pada gambar tersebut terdapat 31 titik yang dibutuhkan untuk melindungi area wilayah gardu induk Sukolilo-Surabaya. Jarak antar tiang sebesar 36.41 meter. Tinggi tiang penangkal petir sebesar 28 meter. Radius dengan model empat tiang penangkal petir sebesar setengah dari jarak diagonal empat tiang tersebut. Proteksi dari penangkal petir diwakili oleh besar radius dari setengah nilai diagonal. Garis diagonal didapat dengan menarik dua titik yaitu antara titik 1 dan titik 9 dari gambar yang tertera pada gambar diatas. Untuk dapat memproteksi semua area gardu membutuhkan 31 tiang penangkal petir. Dari desain peletakan penangkal petir pada gambar diatas area gardu dapat terlindungi dari sambaran petir. Jumlah tiang penangkal petir sebanyak 31 tiang terlalu banyak sehingga dengan menggunakan model tiang penangkal petir segitiga jumlah tiang

penangkal petir bisa diperkecil sehingga biaya untuk membuat tiang penangkal petir bisa diperkecil.



Gambar 4.10 Gambar peletakan penangkal petir dengan tiga penangkal petir

Dengan model tiga tiang penangkal petir diharapkan dapat mengurangi biaya tetapi fungsi yang diharapkan untuk melindungi area gardu dari sambaran petir dapat tercapai. Ketidak efisienan terjadi pada tiang nomor 1,8,6,7,15,27,28,29,31. Hal ini dikarena perlu di pasang satu penangkal petir untuk menutupi peralatan yang tidak terlindungi.

4.4. Perlindungan Gardu Induk Menggunakan Kawat Tanah

Untuk perlindungan menggunakan kawat tanah :

1. Menentukan nilai impedansi surja (Z_s) dimana nilai ini dapat diambil dari perhitungan dengan persamaan (3.2) dengan $Z_s=393$ ohm.
2. Menghitung arus sambaran kritis (I_s) dimana BIL = 650kV
Dengan persamaan (3.3) dapat dihitung arus sambaran kritisnya yang mana telah dihitung pada saat menentukan arus sambaran kritis dengan perlindungan tiang penangkal petir. Didapatkan

$$I_s = 3,64 \text{ kA}$$

3. Menghitung jarak sambaran (S) yang akan menjadi sphere radius menghitung sphere radius menggunakan persamaan (3.5)

$$S = 8kI^{0,65}$$

Dimana nilai k = 1,0 untuk kawat tanah

$$S = 8 \times 1,0 \times 3,64^{0,65} = 18,53 \text{ m}$$

4. Jarak horisontal maksimum untuk satu kawat tanah
Untuk menghitung jarak horisontal maksimum satu kawat tanah dengan menggunakan persamaan (3.17), (3.18) dan (3.19) seperti berikut:

H = 18 m (tinggi kuncup dari gardu induk)

A = 13m

$$R = \sqrt{S^2 - (S - H)^2} \quad (3.17)$$

$$R = \sqrt{18,53^2 - (18,53 - 18)^2}$$

$$R = 18,52 \text{ m}$$

$$R = \sqrt{S^2 - (S - A)^2} \quad (3.18)$$

$$R = \sqrt{18,53^2 - (18,53 - 13)^2}$$

$$R = 17,69 \text{ m}$$

$$C = R - T \quad (3.19)$$

$$C = 18,52 - 17,69 \text{ m} = 0,83 \text{ m}$$

Nilai C adalah jarak horisontal maksimum untuk kawat tanah dengan tinggi bus A = 13 m.

5. Jarak maksimum antara dua kawat tanah dapat dihitung dengan persamaan (3.20), (3.21), (3.22) dan (3.23)

$$D = H - A \quad (3.20)$$

$$D = 18 - 13$$

$$D = 5 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 E &= S - D & (3.21) \\
 E &= 18,53 - 5 \\
 E &= 13,03 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L &= \sqrt{S^2 - E^2} & (3.22) \\
 L &= \sqrt{18,53^2 - 13,03^2} \\
 L &= 13,17 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X &= 2L & (3.23) \\
 X &= 2 \times 13,17 \\
 X &= 26,34 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Nilai X merupakan jarak maksimum dari dua kawat tanah untuk perlindungan bus dengan tinggi A.

Dari hasil yang diperoleh nilai X adalah jarak horinsontal maksimum pada kawat tanah dan Y jarak maksimum dua kawat tanah. Dengan metode bola bergulir gardu induk Sukolilo-Surabaya aman dari sambaran petir langsung, karena kawat tanah yang terpasang memiliki tinggi 18 m dan jarak pisah antar kawat 14 m.

Halaman ini sengaja di kosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

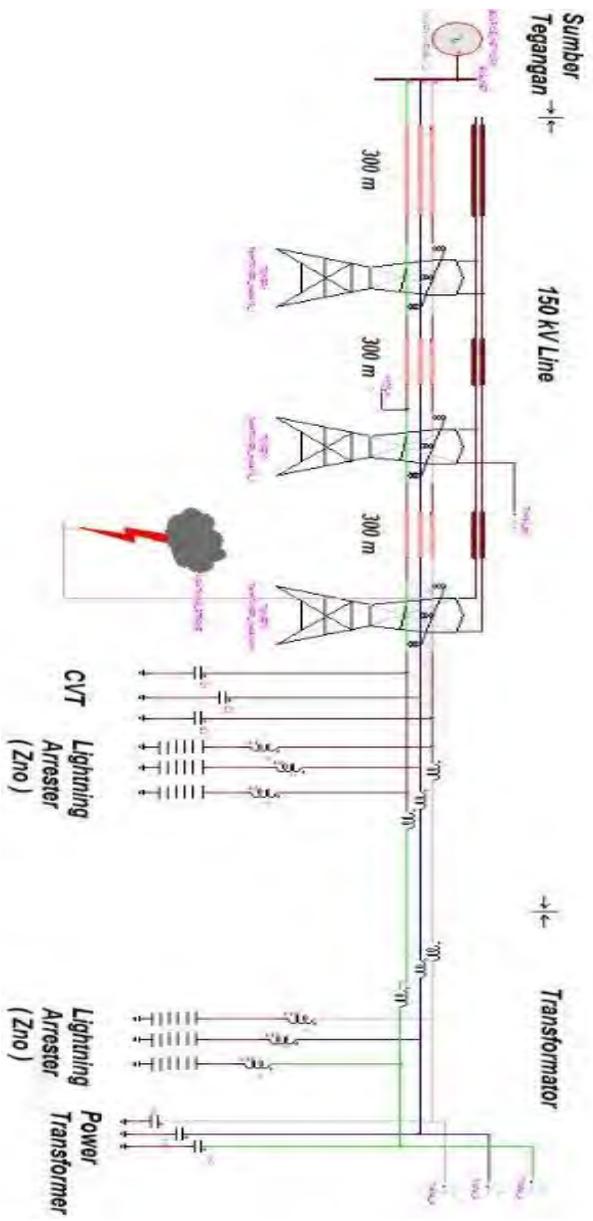
Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil simulasi dapat diketahui bahwa penambahan nilai rise time menyebabkan menurunnya tegangan puncak pada CVT dan trafo di phasa A, B dan C yang ada pada gardu induk Sukolilo-Surabaya. I_{max} mempengaruhi besar tegangan maksimum, semakin besar I_{max} maka tegangan gangguan semakin besar.
2. Penggunaan kawat tanah yang telah terinstal pada gardu induk sudah mencukupi untuk melindungi peralatan gardu induk dari sambaran petir langsung. Berdasarkan perhitungan pemodelan perlindungan gardu induk dari sambaran petir langsung menggunakan metode bola bergulir dimana pada gardu induk tersebut dipasang kawat tanah setinggi 18 m sehingga jarak pisah maksimumnya adalah 26,34 m, untuk pemasangan kawat tanah dengan jarak pisah 14 m sudah aman.
3. Penggunaan tiang penangkal petir dapat menjadi pilihan untuk melindungi peralatan gardu induk dari sambaran petir. Dengan memodelkan gardu induk 150kV sukolilo-Surabaya menggunakan metode bola bergulir, akan memerlukan tiang penangkal petir sebanyak 31 tiang dengan tinggi 26 m untuk penggunaan empat tiang penangkal petir, sedangkan untuk penggunaan tiga tiang penangkal petir dibutuhkan 22 buah tiang dengan tinggi 28 meter. Luas daerah yang terlindungi bergantung pada penempatan dan jumlah tiang penangkal petir yang digunakan.
4. Menggunakan tiga tiang penangkal petir lebih efisien ditinjau dari jumlah tiang yang digunakan. Penggunaan jumlah tiang bergantung pada luas dan bentuk wilayah gardu induk yang akan dilindungi.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan simulasi ini adalah sebagai berikut :

1. Membandingkan hasil dari metode satu dengan yang lain akan membantu menentukan mana metode yang terbaik dalam melindungi gardu induk dari sambaran petir langsung.
2. Letak geografi dan kontur tanah dapat mempengaruhi sistem pengaman. Sehingga perlu diperhatikan dalam memilih sistem pengaman proteksi eksternal.
3. *Software EMTP - RV* ini dapat digunakan untuk melakukan simulasi dan menganalisa koordinasi isolasi agar didapatkan performa peralatan yang maksimal.





T/L Wonokromo II

T/L Wonokromo I

T/L Kenjeran II

T/L Kenjeran I

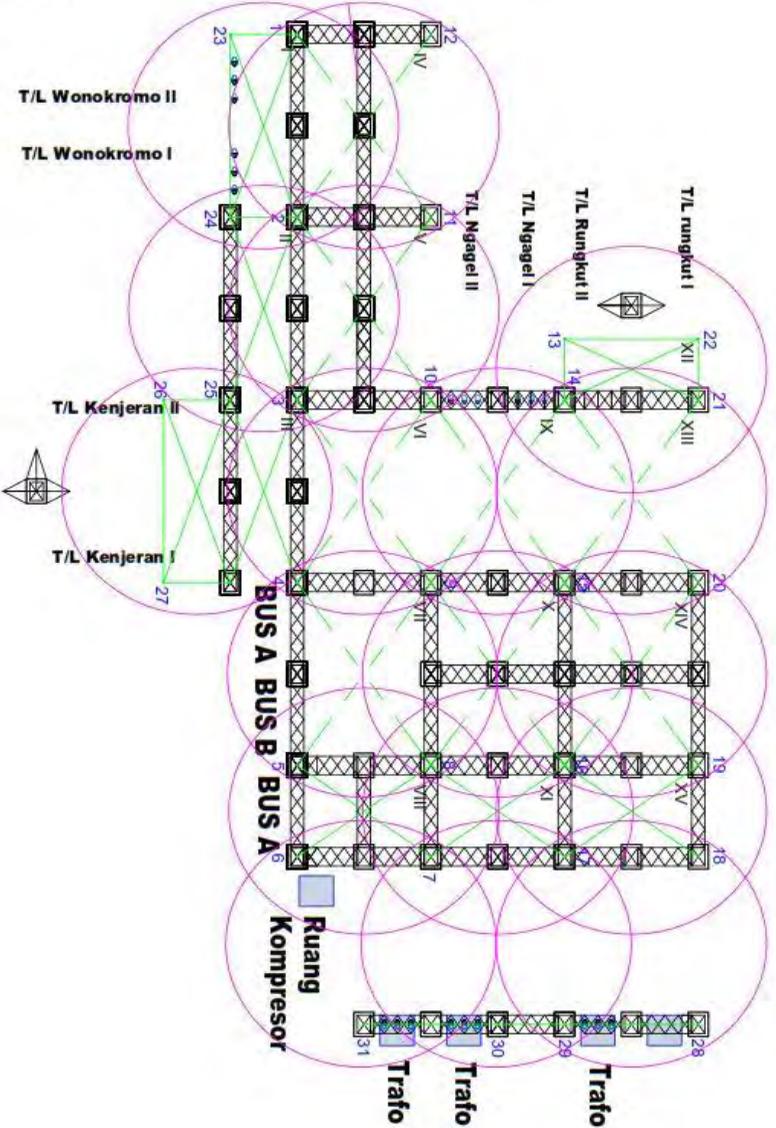
BUS A
BUS B
BUS A
BUS A

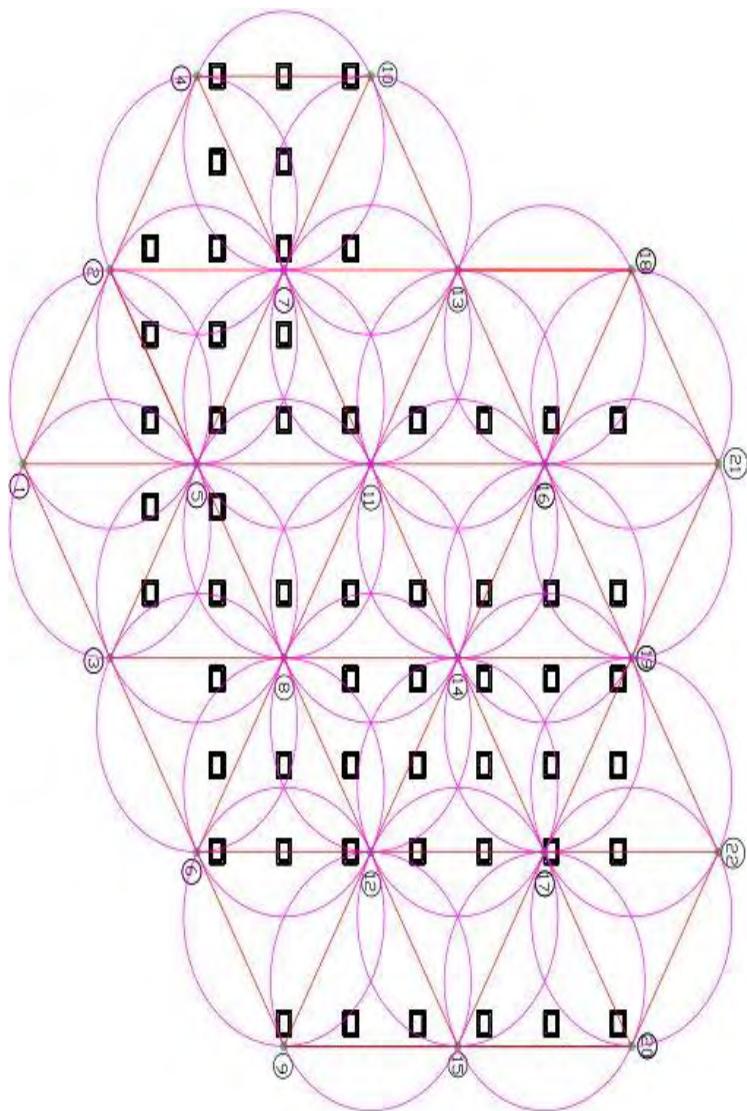
Ruang Kompresor

Trafo

Trafo

Trafo





DAFTAR PUSTAKA

1. Carlos, T. Mata., Fernandez., Mark I., Rakov. Vladimir A., Uman. Martin A., “*EMTP Modeling of a Triggered-Lightning Strike to the Phase Conductor of an Overhead Distribution Line*”, IEEE Transactions on Power Systems Deliver, Vol. 15, No. 4, October 2000.
2. Farouk A.M. Rizk, “Modeling of Substation Shielding Againsts Direct Lightning Strikes”, *IEEE Trans.On Electromagnetic Compatibility*, vol.52, No. 3, August 2010.
3. Matsuura, Susumu., Noda. Taku, Asakawa. Akira, Yorino. Shigeru Yokoyama, “EMTP Modeling of a Distribution Line for Lightning Overvoltage Studies”, The International Conference on Power Systems Transients (IPST'07), June 4-7, Lyon, France, 2007.
4. IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Clasification of Power System Stability*” IEEE Transaction on Power System, Vol.19, No.2., May. 2004.
5. Rakov, Vladimir A. , Uman Martin A. , “Lightning Physics and Effects”, Department of Electrical and Computer Engineering University of Florida, 2003.
6. Cooray, Vernon, “ *An Introduction to Lightning* ”, Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 3 Januari 2014. Uppsala : Sweden.
7. Hutahuruk, T.S, “*Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*”, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1989.
8. Aslimeri, Ganefri, Zaenal Hamdi, “*Teknik Transmisi Tenaga Listrik Jilid 2 untuk SMK*”, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, Jakarta, 2008.
9. Dahliana, Nina., “Pemodelan Perlindungan Gardu Induk dari Sambaran Petir Langsung di PT. PLN (Persero) Gardu Induk 150

- kV Ngimbang-Lamongan”. Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2013.
10. Octaviani, Ika Pramita., “Analisis Koordinasi Isolasi Saluran Udara Tegangan Tinggi 150kV terhadap Sambaran Petir di GIS Tandes Menggunakan Perangkat Lunak EMTP – RV”, Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2009
 11. Prabandoko, Habib., “Studi Evaluasi Sistem Terminasi Udara pada Gedung Bertingkat dengan Metode Bola Bergulir, Sudut Perlindungan dan Metode Jala ”. Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2008.
 12. Kurniawan. Taufiq A., Sumadiyana. Achmad B., “*Sistem Proteksi Petir Internal dan Eksternal*”, Departemen Teknik Elektro, Universitas Indonesia, Jakarta, Oktober, 2007.
 13. Arif, Rezon. “*Lightning Arrester*”, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Jawa Tengah, 2010.

BIODATA PENULIS



I Gd. A. Widya W.S., dilahirkan di kota Surabaya pada 2 Juni 1991. Penulis Memulai jenjang pendidikan di SDN Semolowaru II/262 Surabaya, SMPN 12 Surabaya, SMAN 15 Surabaya, dan menempuh pendidikan Diploma III di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya – Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, hingga lulus pada tahun 2012. Pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember program Lintas Jalur dan memilih program studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui email widyasatyawan@yahoo.co.id

Halaman ini sengaja dikosongkan