

**PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI EKSTERNAL
TERHADAP SAMBARAN PETIR LANGSUNG PADA
GEDUNG UTAMA FAKULTAS EKONOMI DAN BISNIS
UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

NUHA NADHIROH

NIM. 0810630080-63

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2012

LEMBAR PERSETUJUAN

**PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI EKSTERNAL
TERHADAP SAMBARAN PETIR LANGSUNG PADA
GEDUNG UTAMA FAKULTAS EKONOMI DAN BISNIS
UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

NUHA NADHIROH

NIM. 0810630080-63

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Moch. Dhofir, Drs., Ir., MT.

NIP. 19600701 199002 1 001

Soemarwanto, Ir., MT.

NIP. 19500715 198003 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI EKSTERNAL TERHADAP
SAMBARAN PETIR LANGSUNG PADA GEDUNG UTAMA FAKULTAS
EKONOMI DAN BISNIS UNIVERSITAS BRAWIJAYA

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

NUHA NADHIROH
NIM. 0810630080-63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 01 Agustus 2012

Majelis Penguji :

Hery Purnomo, Ir., MT.
NIP. 19550708 198212 1 001

Harry S. Dachlan, Dr., Ir., MSc.
NIP. 19490309 198602 1 001

Wijono, Ir., MT., Ph.D.
NIP. 19621111 198903 1 003

Mengetahui :
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Sholeh Hadi Pramono, Dr., Ir., MS.
NIP. 19580728 198701 1 001

PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan rahmat-Nya sehingga skripsi yang berjudul **“PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI EKSTERNAL TERHADAP SAMBARAN PETIR LANGSUNG PADA GEDUNG UTAMA FAKULTAS EKONOMI DAN BISNIS UNIVERSITAS BRAWIJAYA”** dapat diselesaikan.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu hingga dapat diselesaikannya skripsi ini. Khususnya kepada:

1. Dr. Ir. Sholeh Hadi P, MS., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, M. Azis Muslim, ST., MT., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro dan M. Rif'an, ST., MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
2. Ir. Drs. Moch. Dhofir, MT., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan masukan, koreksi dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
3. Ir. Soemarwanto, MT., atas bimbingan, ide, arahan dan motivasi yang diberikan sehingga terselesaikannya skripsi ini.
4. Seluruh dosen, staf administrasi dan karyawan di lingkungan Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya atas dukungan.
5. Ayah dan Ibu tercinta serta adik tersayang atas segala doa, kasih sayang, pengertian, dorongan moril maupun materiil selama ini.
6. Para sahabat atas segala dukungan kalian: Ibu-ibu paket A 2008 yang telah menemani di saat suka dan duka, rekan-rekan asisten dan laboran Mesin Elektrik atas segala motivasinya. Tak lupa pada Robby Fierdaus beserta keluarga atas doa dan semangat yang diberikan.
7. Teman-teman angkatan 2008 serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas segala bantuannya.

Sebuah penantian panjang telah berakhir, menjadi sebuah titik perjalanan yang baru. Tersadar bahwa skripsi ini sangat jauh dari kesempurnaan, maka kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan dalam penyempurnaan skripsi ini. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Malang, 18 Juli 2012

Penulis

Nuha Nadhiroh

DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	ii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Sistematika Pembahasan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Petir	4
2.2. Jenis Petir	5
2.3. Gelombang Petir.....	6
2.4. Parameter Petir	7
2.4.1. Arus Puncak Petir (I_m).....	8
2.4.2. Muatan Petir (Q).....	9
2.4.3. Arus Kuadrat Impuls	10
2.4.4. Kecuraman Arus Petir.....	11
2.5. Kerapatan Sambaran Petir dan Hari Guruh.....	12
2.6. Sistem Proteksi Petir	14
2.7. Tingkat Proteksi Petir.....	16
2.8. Metode Bola Gelinding (<i>Rolling Sphere Method</i>)	19
2.9. Daerah Lindung	21
2.10. Sistem Proteksi Eksternal	22
2.10.1. Sistem Terminasi Udara (Air Termination System).....	23
2.10.2. Sistem Penghantar Penyalur (<i>Down Conductor</i>).....	25
2.10.3. Sistem Pembumian (<i>Grounding System</i>).....	29
BAB III METODOLOGI.....	33
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	33
3.2. Metode Pengumpulan Data	33
3.2.1. Data Primer	33

3.2.2.	Data Sekunder	37
3.3.	Diagram Alir Penelitian.....	41
3.4.	Perhitungan dan Analisis Data	43
3.5.	Penarikan Kesimpulan.....	45
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		46
4.1.	Penentuan Tingkat Proteksi Gedung	46
4.1.1.	Dimensi, Sifat dan Karakteristik Gedung	46
4.1.2.	Klasifikasi Gedung Berdasarkan PUIPP	46
4.1.3.	Penentuan Efisiensi Sistem Proteksi Petir.....	48
4.2.	Perancangan Sistem Proteksi Menggunakan Metode Bola Gelinding ...	50
4.2.1	Perhitungsn Jarak Sambar Petir	50
4.2.2.	Daerah Lindung yang Terbentuk Pada Gedung.....	51
4.3.	Perancangan Sistem Terminasi Udara.....	52
4.3.1.	Tata Letak Terminasi Udara Tegak (<i>Finial</i>)	52
4.3.2.	Pemilihan Bahan Terminasi Udara Tegak (<i>Finial</i>).....	57
4.4.	Perancangan Sistem Penghantar Penyalur.....	62
4.4.1.	Tata Letak Penghantar Penyalur (<i>Down Conductor</i>).....	63
4.4.2.	Pemilihan Bahan Penghantar Penyalur (<i>Down Conductor</i>).....	64
4.5.	Penentuan Kebutuhan Sistem Pembumian.....	74
4.5.1.	Data Hasil Pengukuran.....	74
4.5.2.	Analisis Data Hasil Pengukuran	75
BAB V PENUTUP.....		78
5.1.	Kesimpulan.....	78
5.2.	Saran	79
DAFTAR PUSTAKA		80
LAMPIRAN.....		82

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tahapan Proses Terjadinya Sambaran Petir.....	5
Gambar 2.2 Empat Jenis Petir.....	6
Gambar 2.3 Bentuk gelombang petir	7
Gambar 2.4 Parameter Parameter Petir.....	8
Gambar 2.5 Energi W dalam Titik Sambaran Arus Petir.....	11
Gambar 2.6 Kecuraman maksimum arus petir (di/dt).....	12
Gambar 2.7 Perbandingan Hari Guruh dan Kerapatan Sambaran Petir per km ² per tahun di Beberapa Belahan Dunia.....	13
Gambar 2.8. Sistem Proteksi Petir	15
Gambar 2.9 Luas Daerah Proteksi (A_e) pada Gedung yang Seragam.....	17
Gambar 2.10 Luas Daerah Proteksi (A_e) pada Gedung yang Seragam.....	18
Gambar 2.11 Proteksi Gedung Menggunakan Metode Bola Gelinding	20
Gambar 2.12 Peletakan Mesh pada Gedung yang Diproteksi Menggunakan Metode Bola Bergulir.....	21
Gambar 2.13 Desain Sistem Terminasi Udara Menggunakan Metode Bola Gelinding	23
Gambar 2.14 Kaidah Tangan Kanan.....	28
Gambar 2.15 Medan Magnet pada Titik P.....	29
Gambar 2.16 Distribusi Tegangan Sekitar Satu Batang Elektroda.....	30
Gambar 2.17 Distribusi Tegangan Sekitar Dua Batang Elektroda	30
Gambar 2.18 Prinsip Pengukuran Resistansi Pembumian	32
Gambar 3.1 Layout Alat Ukur <i>Analogue Earth Tester</i>	35
Gambar 3.2 Skala Alat Ukur.....	36
Gambar 3.3 Btang Elektroda yang Digunakan	36
Gambar 3.4 Rangkaian Pengukuran Tahanan Pembumian.....	37
Gambar 3.5 Gedung Utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Tampak Depan.....	39
Gambar 3.6 Gedung Utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Tampak Samping	39
Gambar 3.7 Diagram Alir Tingkat Proteksi yang Dibutuhkan Gedung	41
Gambar 3.8 Diagram Alir Perancangan Sistem Proteksi Petir Eksternal	42
Gambar 4.1 Metode Bola Gelinding pada Gedung Tampak Depan	53

Gambar 4.2 Metode Bola Gelinding pada Gedung Tampak Samping Kiri 54

Gambar 4.3 Metode Bola Gelinding pada Gedung Tampak Belakang..... 55

Gambar 4.4 Metode Bola Gelinding pada Gedung Tampak Samping Kanan 56

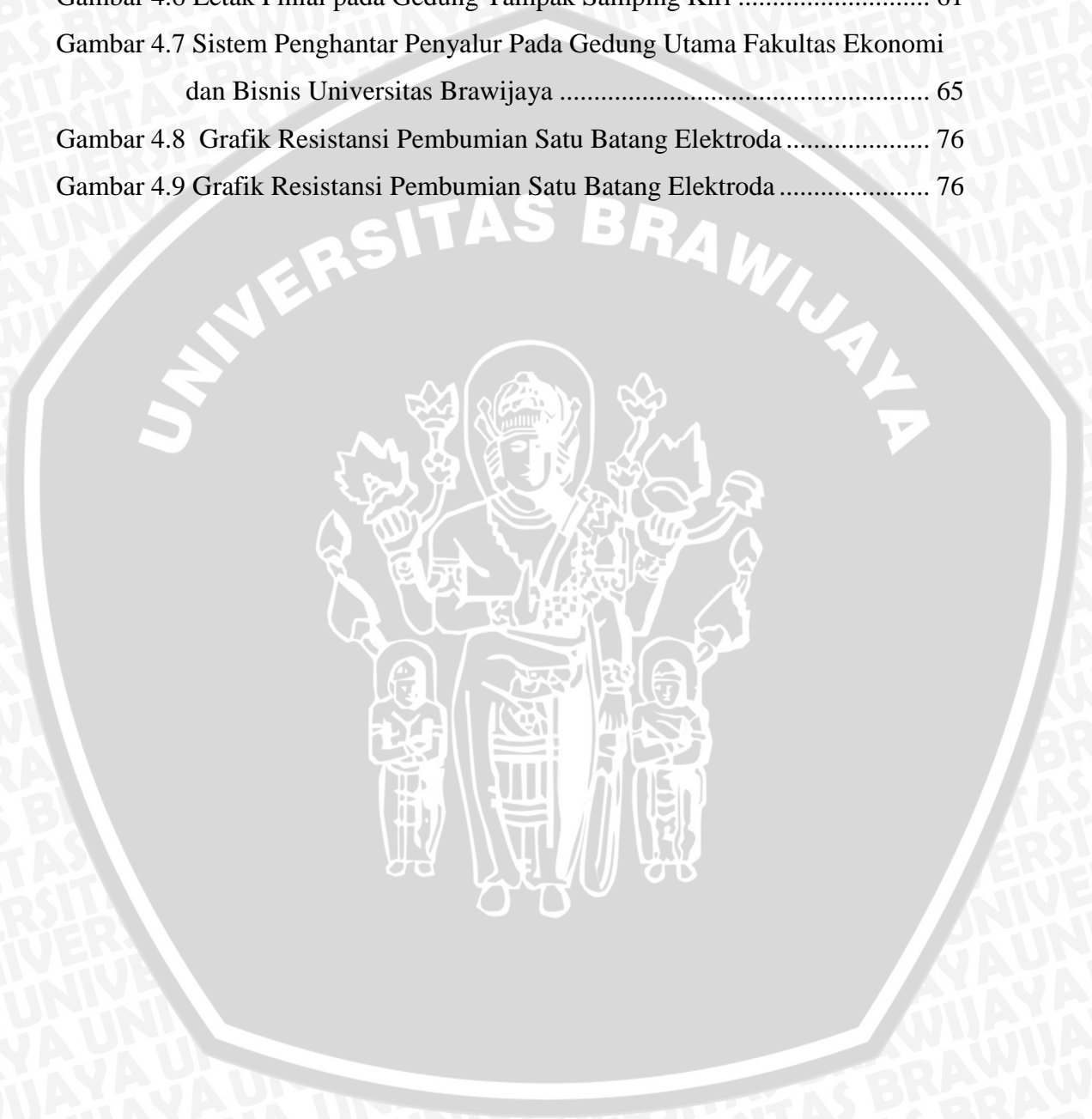
Gambar 4.5 Letak Finial pada Gedung Tampak Depan..... 60

Gambar 4.6 Letak Finial pada Gedung Tampak Samping Kiri 61

Gambar 4.7 Sistem Penghantar Penyalur Pada Gedung Utama Fakultas Ekonomi
dan Bisnis Universitas Brawijaya 65

Gambar 4.8 Grafik Resistansi Pembumian Satu Batang Elektroda 76

Gambar 4.9 Grafik Resistansi Pembumian Satu Batang Elektroda 76

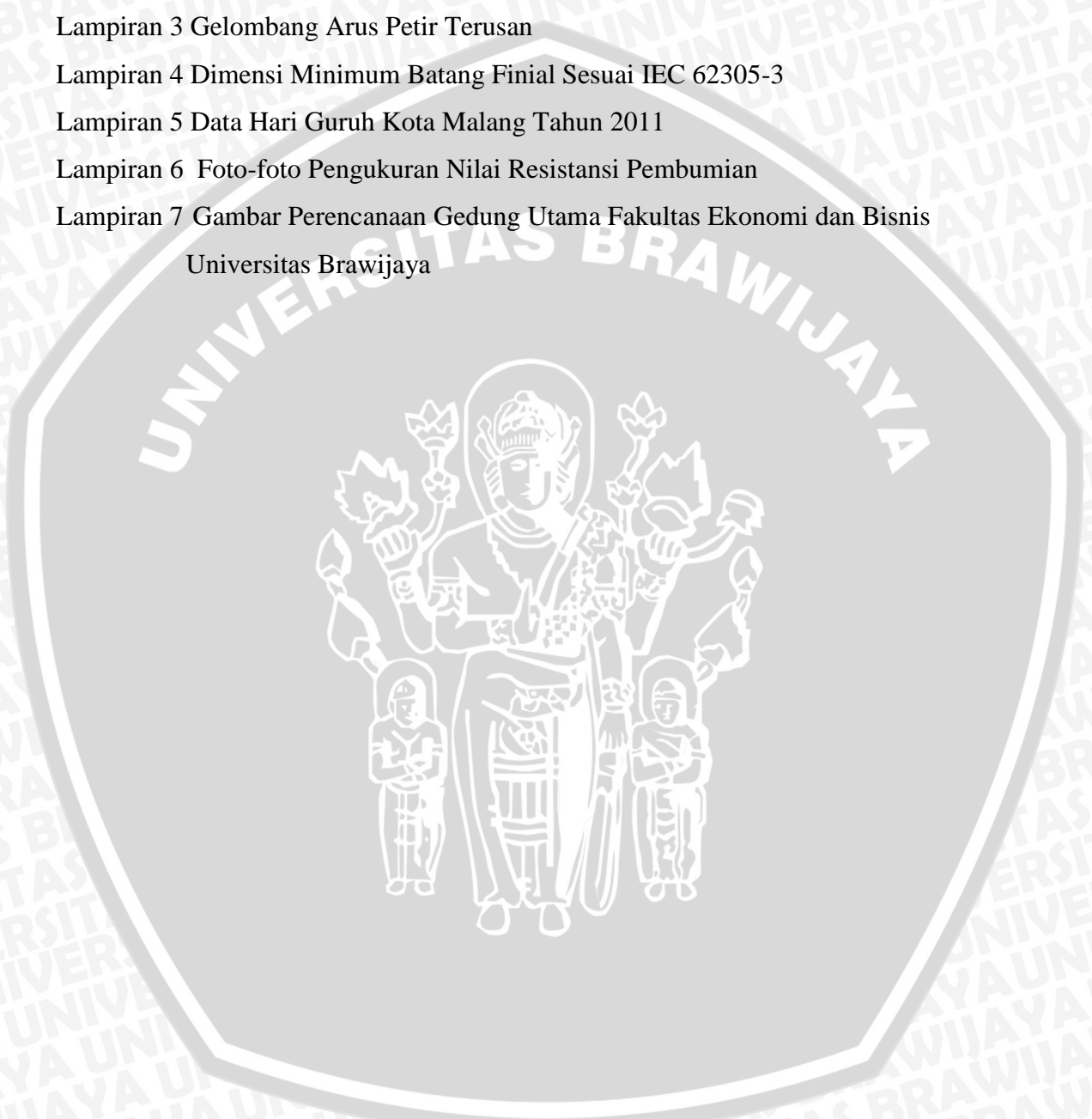


DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai Arus Puncak Petir Sesuai dengan Perencanaan Tingkat Proteksi..	9
Tabel 2.2 Nilai Batas Muatan Arus Petir Menurut Hasil Pengukuran Berger	10
Tabel 2.3 Nilai Kuadrat Impuls Menurut Perhitungan Berger.....	11
Tabel 2.4 Nilai Batas Kecuraman Arus Petir Menurut Perhitungan Berger	13
Tabel 2.5 Faktor Site (Cd).....	17
Tabel 2.6 Efisiensi Sistem Proteksi Petir	19
Tabel 2.7 Nilai Minimum Parameter Arus Petir dan Probabilitasnya	22
Tabel 2.8 Nilai Maksimum Arus Petir dan Probabilitasnya	22
Tabel 2.9 Besaran material logam.....	24
Tabel 2.10 Nilai Jarak Tipikal Antar Penghantar Penyalur dan Antar Cincin Penghantar Sesuai dengan Tingkat Proteksi	26
Tabel 2.11 Kenaikan Temperatur Maksimum Pada Beberapa Bahan Penghantar.....	26
Tabel 2.12 Dimensi Minimum Penghantar Penyalur.....	27
Tabel 2.13 Material Logam Penghantar.....	27
Tabel 2.14 Harga Tahanan Jenis Beberapa Unsur Tanah	31
Tabel 3.1 Akurasi dan Range Pengukuran	34
Tabel 3.2 Pembacaan Skala Alat Ukur	34
Tabel 3.3 Data Hari Guruh Tahun 2011	38
Tabel 3.4 Perkiraan Bahaya Sambaran Petir Berdasarkan PUIPP	40
Tabel 4.1 Data Dimensi, Karakteristik dan Sifat Gedung.....	47
Tabel 4.2 Nilai A_{emax} dan A_{emin} Gedung	49
Tabel 4.3 Parameter dan Volume Pelelehan dari Material Logam Batang <i>Finial</i> 62	
Tabel 4.4 Jumlah Penghantar Penyalur.....	63
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Kenaikan Temperatur dan Tegangan	74
Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Resistansi Pembumian.....	75

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Tabel Indeks Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP)
- Lampiran 2 Gelombang Arus Petir Sambaran Pertama
- Lampiran 3 Gelombang Arus Petir Terusan
- Lampiran 4 Dimensi Minimum Batang Finial Sesuai IEC 62305-3
- Lampiran 5 Data Hari Guruh Kota Malang Tahun 2011
- Lampiran 6 Foto-foto Pengukuran Nilai Resistansi Pembumian
- Lampiran 7 Gambar Perencanaan Gedung Utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya



RINGKASAN

Nuha Nadhiroh (NIM. 0810630080), Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2012, **“Perancangan Sistem Proteksi Eksternal Terhadap Sambaran Petir Langsung Pada Gedung Utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya Malang”**

Dosen Pembimbing: Ir. Drs. Moch. Dhofir, MT. dan Ir. Soemarwanto, MT.

Skripsi ini mengkaji mengenai perancangan sistem proteksi eksternal pada gedung utama fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya. Di dalam penelitian ini dilakukan penentuan tingkat proteksi yang dibutuhkan oleh gedung tersebut dan perancangan sistem proteksi eksternal ini menggunakan metode bola gelinding (*rolling sphere method*). Perancangan sistem proteksi eksternal meliputi perancangan sistem terminasi udara (*air termination system*), sistem penghantar penyalur (*down conductor system*) dan sistem pembumian (*grounding system* atau *earth termination system*). Kajian yang dilakukan merujuk pada standar mengenai sistem proteksi petir yang ada di Indonesia maupun standar yang bersifat internasional. Standar yang digunakan sebagai acuan adalah SNI 03-7015-2004 dan IEC 62305.

Data pendukung di dalam penelitian ini, adalah: (1) gambar perencanaan gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya; (2) data hari guruh Kota Malang selama tahun 2011 yang didapatkan dari Stasiun Geofisika Karang Kates; dan (3) nilai resistansi pembumian pada lokasi pembangunan gedung yang diketahui melalui pengukuran langsung. Dalam pengukuran resistansi pembumian, digunakan metode tiga titik.

Hasil analisis menunjukkan bahwa gedung membutuhkan sistem proteksi eksternal tingkat III dengan efisiensi sistem proteksi sebesar 91%. Tingkat proteksi menentukan jari-jari bola pada metode bola gelinding sebesar 45 meter. Dari hasil analisis menggunakan metode bola gelinding pada gedung, menunjukkan daerah lindung dan daerah yang tidak terlindung. Tingkat proteksi tersebut juga menentukan besarnya volume pelelehan dan kenaikan temperatur. Hasil perancangan sistem proteksi eksternal menunjukkan bahwa gedung membutuhkan 6 batang *finial* dengan panjang masing-masing 1 meter, volume pelelehan terkecil dimiliki oleh besi sebesar $0,2154 \text{ m}^3$. Dibutuhkan pula 3 buah penghantar penyalur dengan luas penampang minimal 50 mm^2 , kenaikan temperatur dan kenaikan tegangan terkecil dimiliki oleh tembaga sebesar 5,3297 K dan 2,07 kV. Sedangkan dari hasil pengukuran dan analisis untuk mendapatkan nilai resistansi pembumian kurang dari 1 ohm, maka dibutuhkan 3 batang elektroda dengan diameter 16 mm yang ditanam sedalam 10 meter. Perancangan sistem proteksi eksternal ini mampu melindungi gedung dari 91% bahaya sambaran petir dengan arus petir antar 10 kA sampai 100 kA.

Kata kunci : petir, daerah lindung, penghantar penyalur, sistem pembumian.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia sebagai sebuah negara kepulauan yang beriklim tropis, terletak di daerah khatulistiwa dengan tingkat curah hujan yang cukup tinggi dan memiliki intensitas sambaran petir yang tinggi pula. Iklim tropis yang panas dan lembab menjadi faktor utama dalam pembentukan awan *cumulonimbus* penghasil petir. Menurut Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG) Indonesia, jumlah hari guruh di Indonesia cukup tinggi yakni berkisar antara 100-200 hari per tahun dengan kerapatan sambaran petir ke tanah mencapai 12 sambaran/km². Dengan demikian hal ini memungkinkan banyaknya bahaya sambaran petir, baik sambaran langsung maupun tidak langsung, yang bersifat destruktif.

Sambaran petir dapat menyebabkan kebakaran dan kerusakan pada gedung, bahkan dapat pula menyebabkan jatuhnya korban jiwa. Untuk melindungi dan mengurangi dampak kerusakan akibat sambaran petir maka perlu dipasang sistem pengamanan pada gedung bertingkat. Rancangan dan pemasangan sistem proteksi petir ditentukan oleh tinggi dan bentuk bangunan serta probabilitas sambaran petir pada bangunan tersebut.

Sistem proteksi petir dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu sistem proteksi eksternal dan sistem proteksi internal. Sistem proteksi eksternal, merupakan sistem proteksi yang bertugas pertama kali menangkap petir dan menyalurkan arus petir ke tanah. Keberadaan sistem proteksi eksternal sangatlah penting karena berfungsi untuk melindungi bangunan beserta isinya dari sambaran langsung petir. Sistem proteksi eksternal terdiri dari sistem terminasi udara, sistem penghantar penyalur (*down conductor*) dan sistem pembumian (*grounding*).

Pada tahun anggaran 2011, telah direncanakan pembangunan gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya yang terdiri dari 11 lantai dengan tinggi 76 m dan luas mencapai 13.000 m². Gedung ini dibangun dalam kurun waktu 3 tahun yang terbagi menjadi tiga tahap, tahap pertama adalah tahap pembangunan struktur gedung, tahap kedua adalah pembangunan prasarana

ME (*Mechanical-Electrical*), sedangkan tahap tiga adalah tahap akhir pembangunan atau *finishing*. Tinggi dan luas gedung semakin meningkatkan nilai probabilitas sambaran petir terhadap gedung tersebut. Mengingat tingginya hari guruh di Indonesia dan sifat petir yang destruktif, maka diperlukan usaha-usaha yang bersifat antisipatif untuk meminimalisir bahkan meniadakan bahaya sambaran petir. Di dalam penelitian ini akan dilakukan beberapa analisis kebutuhan proteksi eksternal terhadap bahaya sambaran petir secara langsung. Analisis kebutuhan proteksi eksternal mencakup penentuan daerah lindung, distribusi penyaluran arus petir, dan kebutuhan pembumian.

Penentuan daerah lindung dan jarak sambar ditentukan berdasarkan tingkat proteksi. Daerah lindung akan dianalisis menggunakan pendekatan metode bola gelinding (*rolling sphere method*) dengan jari-jari bola gelinding sama dengan panjang jarak sambar. Tingkat proteksi ditentukan berdasarkan sifat dan fungsi bangunan gedung yang mengacu pada SNI 03-7015-2004 dan IEC 62305. Selanjutnya tingkat proteksi ini digunakan untuk menentukan kebutuhan proteksi eksternal, yaitu kebutuhan terminasi udara (*finial*) dan sangkar faraday, dimensi dan tata letak pengahantar penyalur arus petir, dan menentukan kebutuhan pembumian.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dalam latar belakang maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

- a. Berapa tingkat proteksi yang sesuai dengan gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya.
- b. Bagaimana sistem proteksi eksternal gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya terhadap bahaya sambaran petir langsung.

1.3. Tujuan

Mengacu pada rumusan masalah, tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang sistem proteksi eksternal terhadap sambaran petir langsung pada gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya.

1.4. Batasan Masalah

Untuk mengarahkan dan memfokuskan pembahasan dalam penelitian ini maka diperlukan beberapa batasan masalah yaitu:

- a. Penelitian ini dilakukan di wilayah gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis yang akan dibangun.
- b. Penelitian dilakukan pada bulan Maret sampai Juni 2012.
- c. Penentuan daerah lindung menggunakan metode bola gelinding (*rolling sphere method*).
- d. Klasifikasi gedung berdasarkan PUIPP (Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir)
- e. Perancangan system proteksi petir eksternal mengacu pada SNI 03-7015-2004 dan IEC 62305.
- f. Analisis yang dilakukan bersifat teknis, tidak dilakukan analisis biaya.

1.5. Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut.

BAB I Berisi latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup, tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II Berisi dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.

BAB III Berisi metode penelitian yang akan dilakukan yang meliputi studi literatur, tempat penelitian, waktu penelitian, peralatan yang digunakan untuk penelitian, model rangkaian penelitian, langkah penelitian dan teknik pengumpulan data.

BAB IV Berisi analisis dan pembahasan berdasarkan rumusan masalah yang diajukan dalam penelitian sehingga didapatkan perancangan sistem proteksi petir yang diperlukan.

BAB V Berisi kesimpulan dari tujuan penelitian yang akan dibuat serta saran dari penulis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Petir

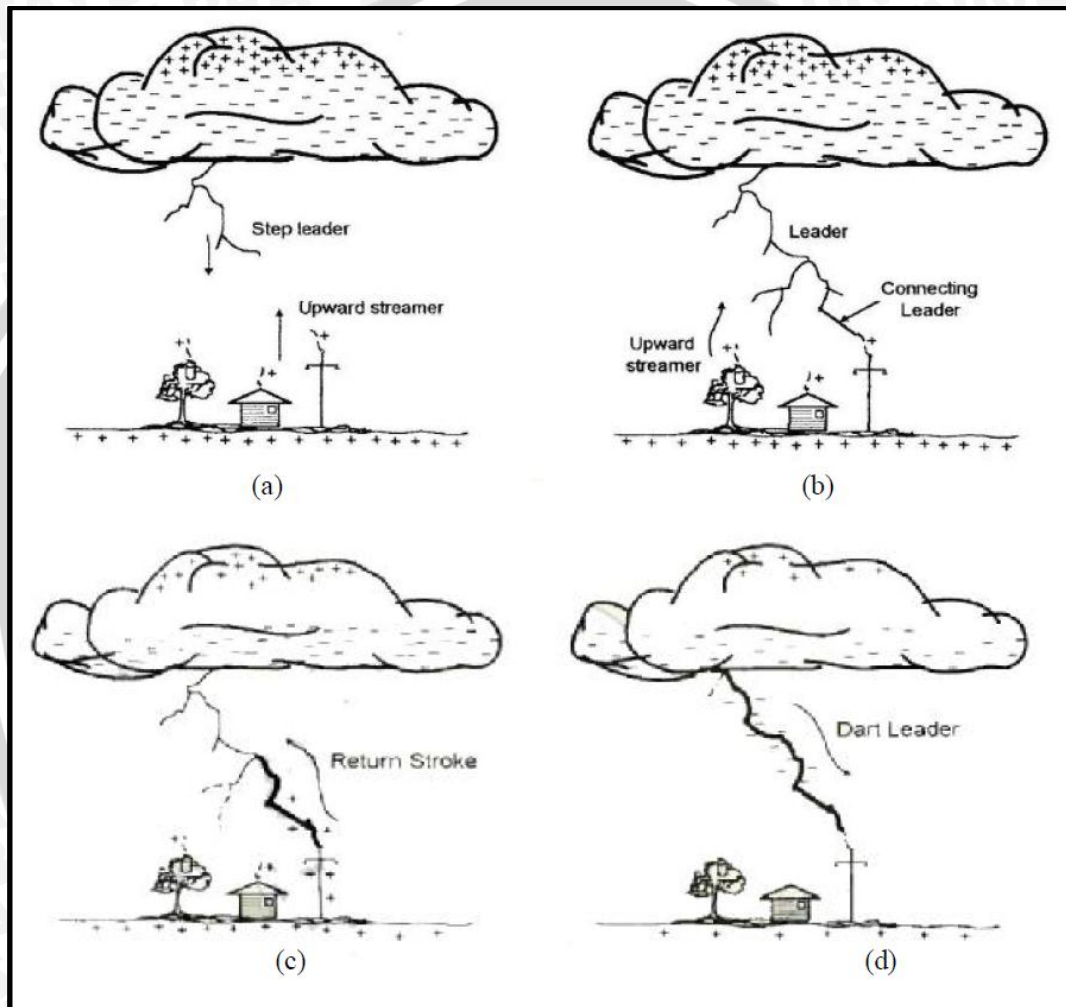
Petir merupakan fenomena alamiah yang terjadi di atmosfer bawah yang merupakan proses pelepasan muatan antara awan bermuatan dengan bumi atau dengan awan bermuatan lainnya. Dengan adanya awan yang bermuatan pada permukaan bumi ini sehingga menimbulkan medan listrik antara awan dengan bumi.

Awan yang terus bergerak, baik secara horizontal maupun vertikal, dan terjadinya benturan antara titik-titik air dalam awan tersebut dengan partikel-partikel udara memungkinkan terjadinya pemisahan muatan listrik di dalam awan tersebut. Butiran air yang bermuatan positif biasanya berada di bagian atas dan yang bermuatan negatif di bagian bawah. Jika perbedaan potensial antara awan dan bumi cukup besar, maka akan terjadi pelepasan muatan dari awan ke bumi atau sebaliknya. Terjadinya pelepasan muatan inilah yang disebut sebagai petir.

Setiap sambaran petir bermula dari suatu lidah petir (*leader*) yang bergerak turun dari awan bermuatan dan disebut *downward leader* yang diilustrasikan pada Gambar 2.1.a. *Downward leader* ini bergerak menuju bumi dalam bentuk langkah-langkah yang disebut *step leader*. Pergerakan *step leader* ini arahnya tidak beraturan dan patah-patah.

Ketika *leader* bergerak mendekati bumi, maka terdapat beda potensial yang semakin tinggi antara ujung *step leader* dengan bumi sehingga terbentuk peluahan mula yang disebut *upward streamer* pada permukaan bumi atau objek. *Upward streamer* ini akan bergerak ke atas menuju ujung dari *step leader*. Apabila *upward leader* telah masuk ke dalam zona jarak sambaran (*striking distance*), maka akan terbentuk petir penghubung (*connecting leader*) yang menghubungkan ujung *step leader* dengan objek yang disambar seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 2.1.b. Setelah itu akan timbul sambaran balik (*return stroke*) yang bercahaya sangat terang bergerak dari bumi atau objek menuju awan dan melepas muatan yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.c.

Jalur yang ditempuh *returnstroke* sama dengan jalur turunnya *step leader*, hanya arahnya yang berlawanan. Selanjutnya terjadi sambaran susulan (*subsequent stroke*) dari awan menuju bumi atau objek sambaran tersebut. Sambaran susulan ini tidak memiliki percabangan dan biasa disebut lidah panah atau *dart leader* yang dapat dilihat pada Gambar 2.1.d. Pergerakan *dart leader* ini sekitar 10 kali lebih cepat dari sambaran yang pertama.



Gambar 2.1 Tahapan Proses Terjadinya Sambaran Petir

Sumber : Vernon Cooray, 2010: 16

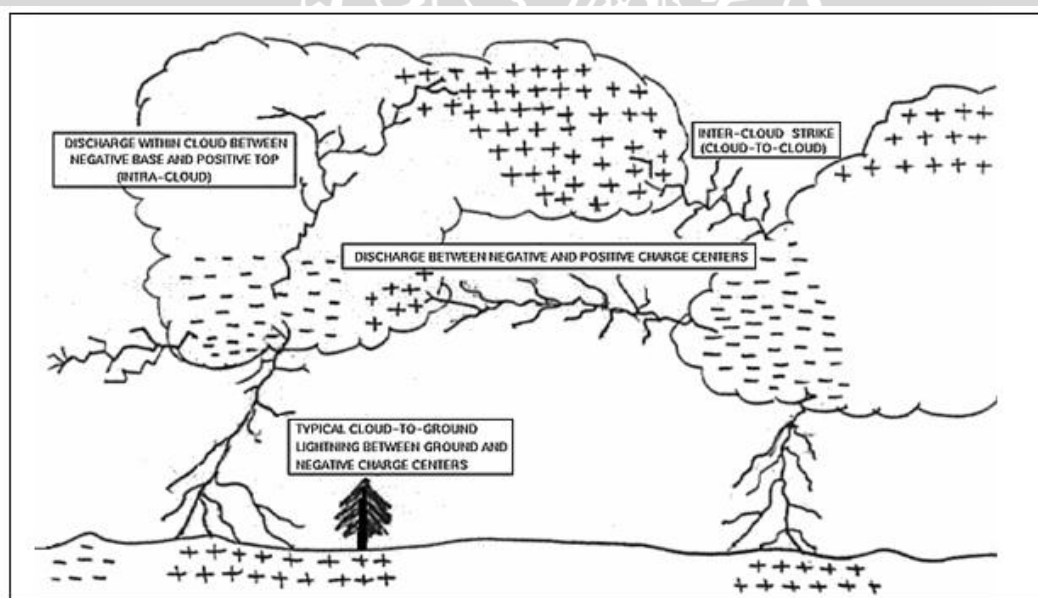
2.2. Jenis Petir

Jenis-jenis petir dapat digolongkan berdasarkan interaksi antara ion-ion yang bermuatan negatif dan positif. Interaksi ini mengklasifikasikan petir menjadi 4 jenis yaitu, petir di dalam awan (*intracloud*), petir antar awan (*cloud to cloud*),

dan petir dari awan ke udara (*cloud to air*), dan petir dari awan ke bumi (*cloud to ground*). Jenis-jenis petir ini ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Intracloud lighting adalah petir yang terjadi karena adanya tubrukan muatan positif dan muatan negatif di dalam awan, petir ini tidak dapat dilihat mata telanjang. *Cloud to cloud lightning* terjadi antara dua buah awan atau lebih yang disebabkan adanya interaksi muatan negatif dengan muatan positif. *Cloud to air lightning* biasanya terjadi jika udara disekitar awan bermuatan positif berinteraksi dengan udara yang beruatan negatif. Sedangkan *cloud to ground lightning* adalah petir yang paling sering terjadi di alam.

Petir awan ke bumi atau yang disebut dengan *cloud to ground* merupakan petir yang bisa diamati langsung dengan mata telanjang dan merupakan jenis petir yang sering menyebabkan kerusakan. Pada petir jenis ini, ion-ion yang bermuatan positif berasal dari bumi dan ion yang bermuatan negatif berasal dari awan, atau sebaliknya. Kebanyakan sambara petir awan-bumi membawa energi negatif ke permukaan tanah, namun ada pula diantaranya yang membawa energi positif, tapi ini jarang terjadi.



Gambar 2.2 Empat Jenis Petir

Sumber: <http://information-humanstudy.blogspot.com/2010/10/mengenal-petir-1.html>

2.3. Gelombang Petir

Petir memiliki bentuk gelombang berupa gelombang impuls. Sesuai pengertian pada standar internasional, gelombang impuls adalah gelombang yang

memiliki polaritas tertentu dan mampu mencapai nilai puncak dalam waktu sangat singkat yang selanjutnya turun perlahan mendekati nilai nol.

Bentuk gelombang tegangan petir dapat dinyatakan dalam persamaan berikut: (Hutauruk, 1988:5)

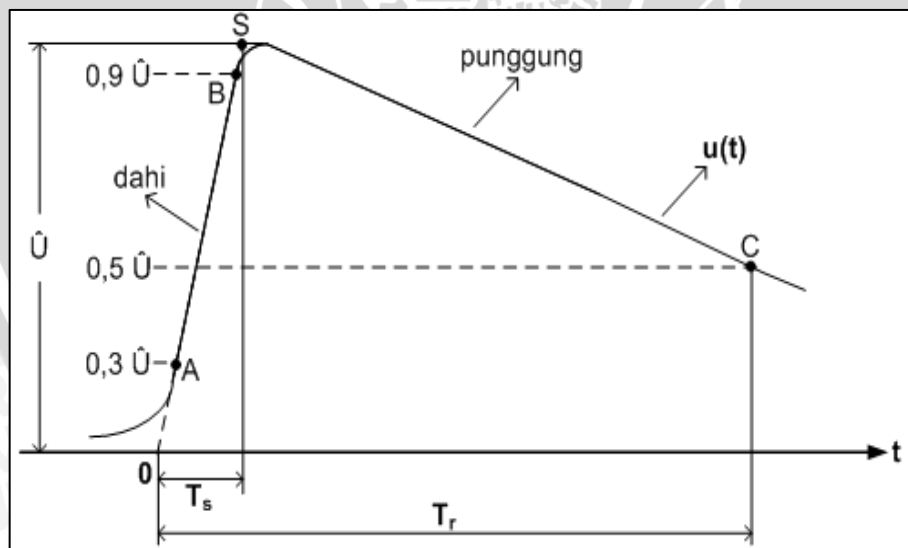
$$e(t) = E(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (2-1)$$

Dengan E, a, dan b adalah konstanta

Sedangkan bentuk gelombang arus petir didapatkan dari persamaan gelombang tegangannya, sebagai berikut: (Hutauruk, 1988: 5)

$$i(t) = A_I \cdot I_m(e^{-at} - e^{-bt}) \cdot 10^{-6} \quad (2-2)$$

Gelombang impuls petir memiliki beberapa parameter seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Waktu muka (T_s) ialah waktu yang terjadi pada muka gelombang dimulai dari titik perpotongan sumbu waktu t dengan garis lurus yang dibentuk dari titik $0,3\hat{U}$ (A), $0,9\hat{U}$ (B) dan S hingga mencapai titik potong sumbu waktu t dengan garis vertikal dari titik S. Sedangkan waktu paruh punggung (T_r) adalah waktu yang dibutuhkan mulai dari titik nol hingga mencapai setengah dari nilai puncak tegangan $0,5\hat{U}$ (titik C) pada ekor gelombang.



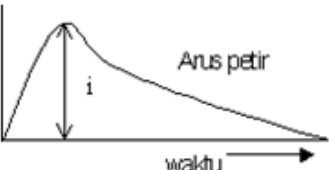
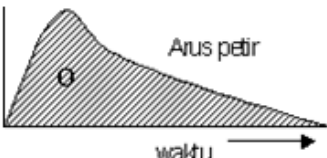
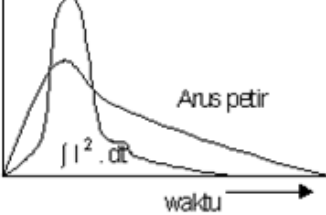
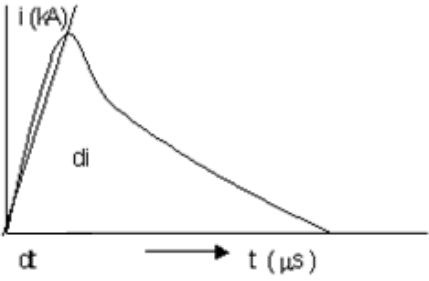
Gambar 2.3 Bentuk gelombang petir

Sumber: Golde, R.H. 1981: 25

2.4. Parameter Petir

Setiap sambaran petir dapat diuraikan secara matematis kelistrikan. Hal tersebut diperlukan guna mengetahui sejauh mana akibat pada objek sambaran

yang ditimbulkan masing-masing parameter tersebut dan untuk menentukan level proteksi yang harus didesain. Berikut ini merupakan parameter-parameter petir yang sangat penting dalam penentuan sistem proteksi petir. Secara umum parameter petir ditunjukkan pada Gambar 2.4.

<p>1. Arus Puncak Petir</p> $U_m = I_m \cdot R_E$	
<p>2. Muatan petir</p> $Q = \int i \, dt$ $W = Q \cdot U_{A,K}$	
<p>3. Arus Kuadrat Impuls</p> $E = \int i^2 \, dt$	
<p>4. Kecuraman Arus Petir</p> $U_m = M \left(\frac{di}{dt} \right)$	

Gambar 2.4 Parameter Parameter Petir

Sumber: <http://www.telkomrdc-media.com/index.php?ch=8&lang=&n=346>

2.4.1. Arus Puncak Petir (I_m)

Arus puncak petir (I_m) merupakan nilai maksimum arus impuls petir yang dapat menyebabkan tegangan lebih pada tempat sambaran. Arus puncak petir menentukan tinggi tegangan jatuh pada tahanan pentanahan objek yang disambar sesuai dengan persamaan berikut: (Peter Hasse, 2008:48)

$$U_m = I_m \cdot R_E \quad (2-3)$$

Dengan :

U_m : tegangan (volt)

I_m : arus puncak petir (ampere)

R_E : tahanan tanah (Ω)

Arus puncak petir juga dapat menentukan tingkat proteksi dari sebuah sistem proteksi petir seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Nilai Arus Puncak Petir Sesuai dengan Perencanaan Tingkat Proteksi

Tingkat Proteksi	Nilai I_m (kA)
I	200
II	150
III-IV	100

Sumber : Peter Hasse, 2008:49

2.4.2. Muatan Petir (Q)

Muatan arus petir (Q) adalah jumlah muatan arus petir yang mengalir atau integral arus petir terhadap waktu. Muatan arus petir menentukan jumlah energi (W) yang terwujud dalam busur listrik yang menembus isolasi. Muatan ini menyebabkan terjadinya pelelehan ujung finial penangkap petir, kulit aluminium pesawat terbang, atau logam yang digunakan sebagai titik sambaran petir. Muatan arus petir dapat dinyatakan dalam persamaan berikut: (Dehn+Söhne, 2007:20)

$$Q = \int_0^t i dt \text{ (As atau coulomb)} \quad (2-4)$$

Sedangkan besarnya nilai batas muatan petir tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Volume pelelehan logam yang disebabkan muatan arus petir dapat dinyatakan dalam persamaan berikut: (Dehn+Söhne, 2007:20)

$$Vol = \frac{W}{\gamma c_w \theta + c_s} \text{ (m}^3\text{)} \quad (2-5)$$

Dengan :

W : energi busur listrik (joule)

θ : temperatur leleh ($^{\circ}\text{C}$)

c_s : panas leleh spesifik (J/kg)

c_w : kapasitas tanah spesifik (J/kg)

γ : kerapatan massa (kg/m^3)

Tabel 2.2 Nilai Batas Muatan Arus Petir Menurut Hasil Pengukuran Berger

Tingkat proteksi	Nilai batas muatan Q (As)	Probabilitas dilampauinya nilai batas muatan arus (%)	
		Petir negatif	Petir positif
Normal	50	± 2	-
Tinggi	300	-	± 10
Sangat tinggi	600	-	± 1

Sumber : Vernon Cooray, 2010: 50

Energi W merupakan nilai perkalian dari muatan Q dan tegangan jatuh pada anoda-katoda dalam satuan mikrometer ($U_{A,K}$) yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 dan di ekspresikan dalam persamaan berikut: (Dehn+Söhne, 2007:20)

$$W = Q \cdot U_{A,K} \tag{2-6}$$

Dengan:

Q : Muatan dari arus petir (joule)

$U_{A,K}$: Tegangan jatuh pada anoda-katoda (volt)

Nilai rata-rata dari $U_{A,K}$ ini sebesar puluhan volt dan sangat dipengaruhi oleh tinggi dan bentuk gelombang arus.

2.4.3. Arus Kuadrat Impuls

Arus kuadrat impuls adalah suatu aksi integral yang bertanggung jawab terhadap efek pemanasan dan elektro-mekanis. Kuadrat impuls menentukan tingginya pemanasan dan tekanan elektrodinamis pada konduktor yang dialiri arus petir. Besarnya energi pemanasan dapat ditunjukkan pada persamaan berikut: (Dehn+Söhne, 2007:21)

$$E = \int_0^t i^2 dt \tag{2-7}$$

$$E = \frac{W}{R} \tag{2-8}$$

Sehingga,

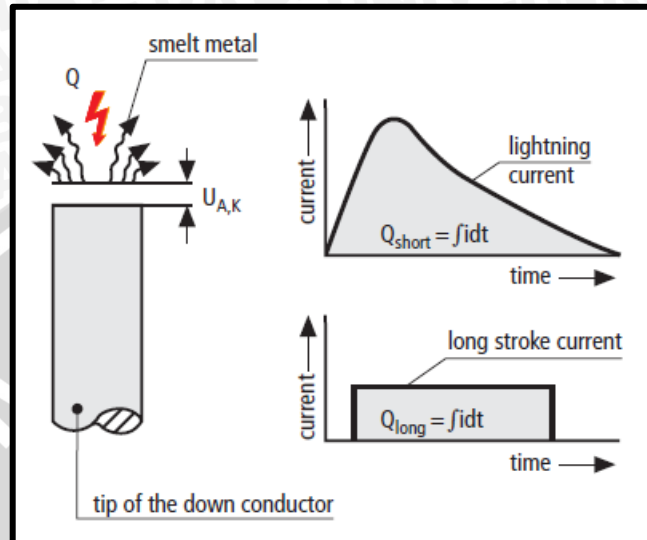
$$\frac{W}{R} = \int_0^t i^2 dt \tag{2-9}$$

Dengan :

W : Energi pemanasan (joule)

I : Arus petir (kA)

R : Tahanan pada konduktor (Ω)



Gambar 2.5 Energi W dalam Titik Sambaran Arus Petir

Sumber : Dehn+Söhne, 2007:20

Penentuan dimensi penangkal petir dapat menggunakan perhitungan Berger mengenai nilai kuadrat impuls yang ditunjukkan pada Tabel 2.3.

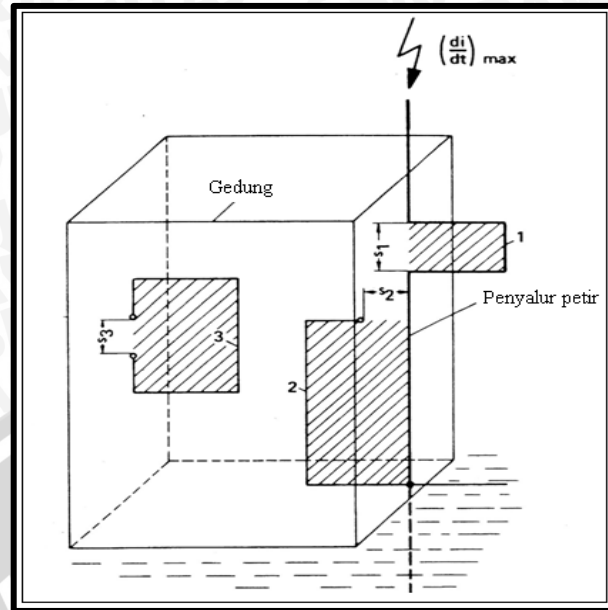
Tabel 2.3 Nilai Kuadrat Impuls Menurut Perhitungan Berger

Tingkat proteksi	Nilai batas kuadrat arus impuls (A^2s atau J/Ω)	Probabilitas dilampauinya nilai batas muatan arus (%)	
		Petir negatif	Petir positif
Normal	10^6	± 2	-
Tinggi	$10 \cdot 10^6$	-	± 10
Sangat tinggi	$100 \cdot 10^6$	-	± 1

Sumber : Vernon Cooray, 2010:50

2.4.4. Kecuraman Arus Petir

Kecuraman arus petir maksimum menyebabkan timbulnya induksi elektromagnetik pada loop yang terdapat di dalam suatu instalasi atau konstruksi yang tertutup atau yang terletak di dekat konduktor yang dialiri arus. Loop yang terbentuk dapat diamati pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Kecuraman maksimum arus petir (di/dt)

Sumber : Peter Hasse, 2008:50

Pengaruh parameter ini dapat menyebabkan adanya tegangan induksi elektromagnetik pada benda logam di dekat instalasi proteksi petir. Besarnya tegangan induksi yang timbul dapat dinyatakan dalam persamaan berikut: (Peter Hasse, 2008:49)

$$U_m = M \left(\frac{di}{dt} \right) \quad (2-10)$$

Dengan:

U_m : Tegangan Induksi (V)

M : Induktansi pada loop (H)

di/dt : Kenaikan arus (A/s)

Nilai tertinggi parameter ini terjadi pada sambaran positif. Efek merusak yang ditimbulkan tegangan induksi, berkaitan dengan kecuraman muka kurva arus petir. Untuk kepentingan perancangan penting diketahui batas nilai kecuraman arus seperti dalam perhitungan Berger yang ditunjukkan pada Tabel 2.4.

2.5. Kerapatan Sambaran Petir dan Hari Guruh

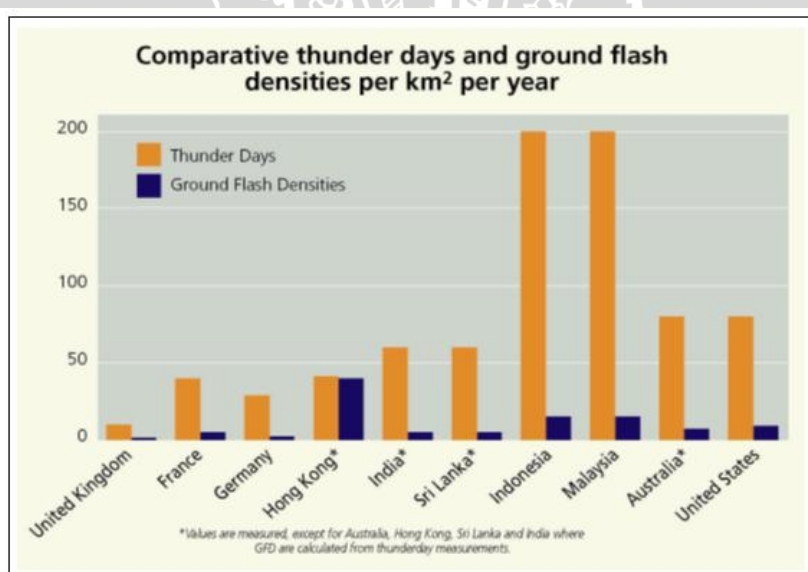
Kerapatan sambaran petir didefinisikan sebagai jumlah sambaran petir pada suatu daerah dalam satu tahun. Kerapatan sambaran petir (N_g) suatu wilayah dapat diestimasi dengan menghitung jumlah sambaran petir pada wilayah

tersebut melalui satelit ataupun alat penghitung sambaran petir. Sedangkan hari guruh adalah banyaknya hari di mana terdengar guruh setidaknya satu kali dalam waktu 24 jam. Data hari guruh tidak mencakup data mengenai jumlah sambaran petir dalam satu hari. Perbandingan data hari guruh dan kerapatan sambaran petir di dunia ditunjukkan pada Gambar 2.7.

Tabel 2.4 Nilai Batas Kecuraman Arus Petir Menurut Perhitungan Berger

Tingkat proteksi	Nilai batas kecuraman arus (A/s)	Probabilitas dilampauinya nilai batas muatan arus (%)	
		Petir negatif	Petir positif
Normal	$60 \cdot 10^9$	± 2	-
Tinggi	$80 \cdot 10^9$	$\pm 0,5$	± 10
Sangat tinggi	$100 \cdot 10^9$	$\pm 0,1$	± 1

Sumber: Vernon Cooray, 2010: 51



Gambar 2.7 Perbandingan Hari Guruh dan Kerapatan Sambaran Petir per km² per tahun di Beberapa Belahan Dunia

Sumber: Reynaldo Zoro, 2011:12

Indonesia adalah kontinen maritim yang terletak di sekitar daerah khatulistiwa dengan hari guruh yang cukup tinggi di dunia, yaitu dengan aktivitas 25 sampai 200 hari guruh pertahun. Ini berarti tingkat sambaran petirnya sangat tinggi, baik frekuensi maupun intensitas arus sambarannya. Informasi kejadian

petir di Indonesia dapat diperoleh dari Jaringan Deteksi Petir Nasional (JADPEN) maupun dari stasiun BMG yang menggunakan sistem deteksi petir real time.

Bagaimanapun juga, kerapatan sambaran petir dapat dihitung menggunakan data hari guruh sebagai berikut: (SNI 03-7015-2004:8)

$$N_g = aT_d^b \text{ sambaran/km}^2 \text{ tahun} \quad (2-11)$$

Dengan T_d adalah jumlah hari guruh. Nilai a dan b berbeda-beda sesuai dengan studi yang banyak dilakukan oleh para ilmuwan. Tetapi menurut SNI 03-7015-2004 nilai a dan b adalah 0,04 dan 1,25. Sehingga dengan memasukkan nilai a dan b pada persamaan (2-11) didapatkan persamaan berikut: (SNI 03-7015-2004:8)

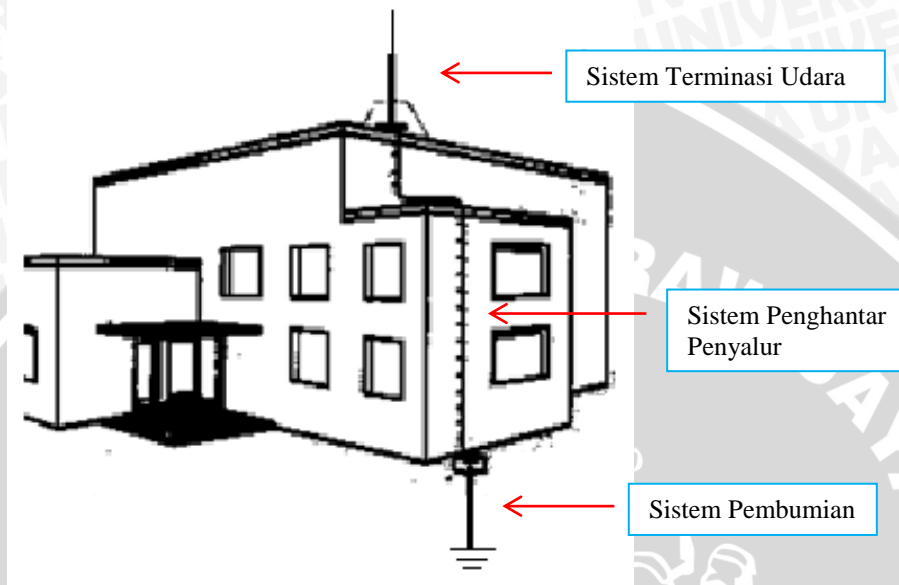
$$N_g = 0,04T_d^{1,25} \text{ sambaran/km}^2 \text{ tahun} \quad (2-12)$$

2.6. Sistem Proteksi Petir

Timbulnya kerusakan akibat sambaran petir, maka munculah berbagai usaha untuk mengatasi bahaya yang diakibatkan sambaran petir. Sistem proteksi yang harus diterapkan bertujuan untuk melindungi bangunan dari sambaran langsung maupun sambaran tidak langsung. Mengacu pada IEC TC 81/1989 tentang konsep Lightning Protection Zone (LPZ), sistem proteksi petir yang sempurna terdiri dari tiga (3) bagian yang ditunjukkan pada Gambar 2.8, yaitu:

- a. Proteksi Eksternal, yaitu instalasi dan alat-alat di luar sebuah struktur untuk menangkap dan menghantarkan arus petir ke sistem pentanahan, atau berfungsi sebagai ujung tombak penangkap arus petir di tempat tertinggi. Proteksi eksternal yang baik terdiri dari terminasi udara (*finial*), penghantar penyalur (*down conductor*) dan ekuipotensial.
- b. Proteksi Pentanahan, merupakan bagian terpenting dalam instalasi sistem proteksi petir. Kesulitan dari sistem pentanahan biasanya disebabkan berbagai macam jenis tanah. Hal ini dapat di atasi dengan perencanaan dan teknik penerapan yang tepat, serta menghubungkan semua ekuipotensial dengan sistem penatanahan sesuai dengan IEC TC 81.
- c. Proteksi Internal, merupakan proteksi peralatan elektronik terhadap efek dari arus petir. Terutama efek medan magnet dan medan listrik

pada instalasi metal atau sistem listrik. Sesuai dengan standar DIV VDE 0185, IEC 1024-1. Proteksi internal terdiri atas pencegahan terhadap dampak sambaran langsung, pencegahan terhadap sambaran tidak langsung, dan ekuiopotensial.



Gambar 2.8. Sistem Proteksi Petir

Sumber : <http://ngelmuelektro.wordpress.com/>

Salah satu sistem pengaman yang dibutuhkan oleh suatu bangunan atau gedung adalah sistem proteksi petir. Suatu instalasi proteksi petir harus dapat melindungi semua bagian dari bangunan, termasuk manusia dan peralatan yang ada di dalamnya terhadap bahaya dan kerusakan akibat sambaran petir. Maka berdasarkan Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir bangunan yang membutuhkan proteksi adalah:

- Bangunan tinggi seperti gedung bertingkat, menara, dan cerobong pabrik.
- Bangunan tempat penyimpanan bahan yang mudah terbakar atau meledak seperti pabrik amunisi atau gudang penyimpanan bahan peledak.
- Bangunan sara umum, seperti sekolah, gedung bertingkat pusat perbelanjaan, gedung pemerintahan.

2.7. Tingkat Proteksi Petir

Besarnya kebutuhan suatu bangunan akan suatu instalasi proteksi petir ditentukan oleh besarnya kemungkinan kerusakan serta bahaya yang terjadi jika bangunan tersebut terkena sambaran petir. Berdasarkan Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP) besarnya kebutuhan tersebut ditentukan berdasarkan penjumlahan indeks-indeks tertentu yang mewakili keadaan bangunan di suatu lokasi dan dirumuskan sebagai: (Emy Hosea, 2004:1)

$$R = A + B + C + D + E \quad (2-13)$$

Besarnya nilai indeks A, B, C, D, dan E di atas diperoleh dari tabel-tabel yang terdapat pada lampiran nantinya. Dari persamaan (2-13) terlihat bahwa semakin besar nilai indeks maka semakin besar pula resiko (R) suatu bangunan sehingga semakin besar kebutuhan suatu bangunan akan adanya sistem proteksi petir.

Untuk keperluan perhitungan yang lebih terperinci maka dapat digunakan standar IEC 1024-1-1. Berdasarkan standar ini, pemilihan tingkat proteksi yang memadai untuk suatu sistem proteksi petir didasarkan pada frekuensi sambaran petir langsung setempat (N_d) yang diperkirakan untuk struktur yang diproteksi dan frekuensi sambaran petir tahunan setempat (N_e) yang diperbolehkan. Kerapatan sambaran petir ke tanah rata-rata tahunan di daerah suatu struktur berada telah dinyatakan sebagai berikut (SNI 03-7015-2004:8)

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot C_d \cdot 10^6 \text{ per tahun} \quad (2-14)$$

Dengan:

A_e : Luas daerah proteksi efektif pada gedung (m^2)

N_g : Kerapatan sambaran petir pada gedung (sambaran/ km^2 tahun)

C_d : Faktor *site*

Besarnya nilai C_d ditentukan sesuai dengan Tabel 2.5, sedangkan nilai A_e dapat dihitung secara grafis maupun secara matematis. Luas daerah proteksi efektif pada gedung yang seragam ditunjukkan pada Gambar 2.9. Sedangkan perhitungan nilai A_e untuk gedung yang berbentuk seragam dapat dilakukan melalui persamaan berikut: (SNI 03-7015-2004:12)

$$A_e = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \quad (2-15)$$

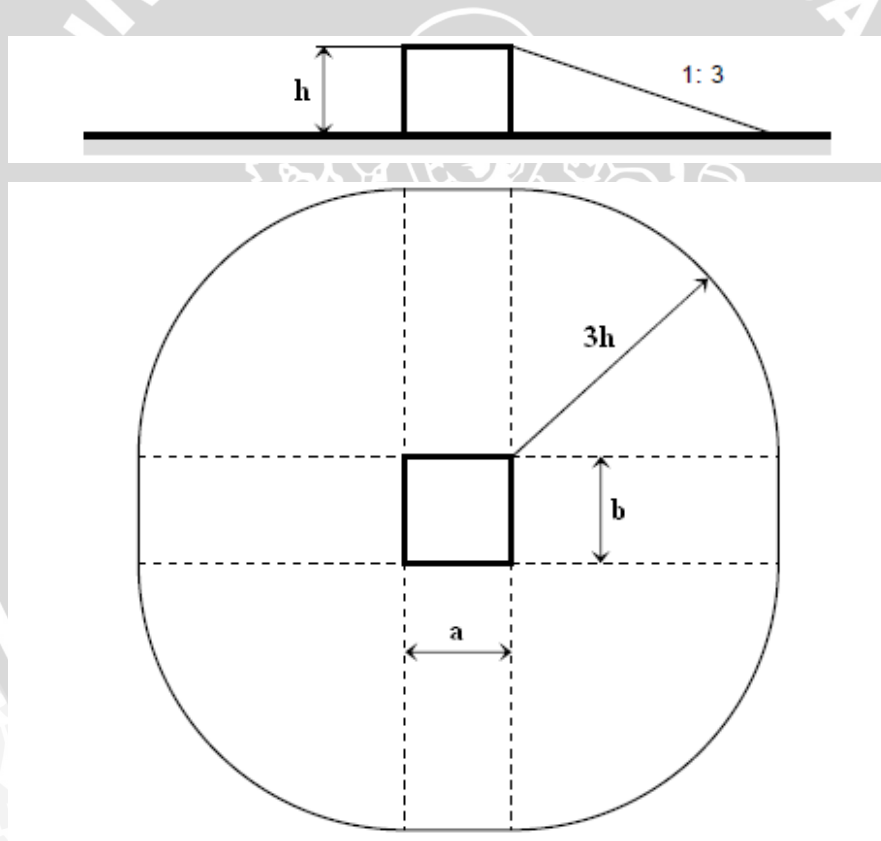
Dengan:

- a : panjang atap gedung (meter)
- b : Lebar atap gedung (meter)
- h : Tinggi gedung (meter) pada tanah datar

Tabel 2.5 Faktor Site (C_d)

Wilayah di Sekitar Gedung	C_d
Objek dikelilingi oleh objek yang lebih tinggi atau pepohonan	0,25
Objek dikelilingi oleh objek lain atau pepohonan yang sama tinggi atau lebih rendah	0,5
Objek yang berdiri bebas : tidak terdapat objek lain didekatnya ($\approx 3h$)	1
Objek yang berdiri bebas di atas pegunungan atau perbukitan	2

Sumber : Dehn+Söhne, 2007:31



Gambar 2.9 Luas Daerah Proteksi (A_e) pada Gedung yang Seragam

Sumber : SNI 03-7015-2004:12

Sedangkan untuk bangunan yang berbentuk kompleks seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10, maka metode grafis harus digunakan untuk menentukan nilai A_e , karena akan terdapat perbedaan yang cukup besar jika nilai

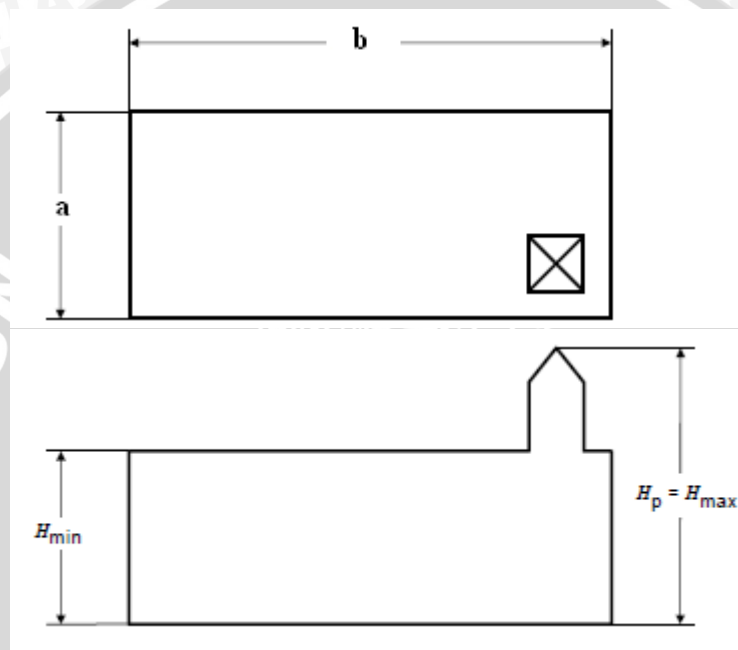
A_e pada ketinggian maksimum dan A_e pada ketinggian minimum digunakan. Sebuah persamaan dapat digunakan untuk mendapatkan nilai yang mendekati antara nilai A_{emin} dan A_{emax} , sebagaimana berikut: (IEC 62305-2,2006:89)

$$A_e' = 9\pi(H_p)^2 \quad (2-16)$$

Dengan:

A_e' : Luas daerah ekuivalen rata-rata (m^2)

H_p : Tinggi gedung maksimum (meter)



Gambar 2.10 Luas Daerah Proteksi (A_e) pada Gedung yang Seragam

Sumber : IEC 62305-2, 2006:91

Pengambilan keputusan perlu atau tidaknya memasang sistem proteksi petir pada bangunan berdasarkan perhitungan N_d dan N_c dilakukan sebagai berikut:

- Jika $N_d \leq N_c$ maka tidak dibutuhkan sistem proteksi petir.
- Jika $N_d > N_c$ maka diperlukan sistem proteksi dengan efisiensi yang ditunjukkan pada persamaan berikut: (SNI 03-7015-2004:12)

$$E \geq 1 - N_c/N_d \quad (2-17)$$

Sesuai dengan standar IEC, tingkat proteksi dibagi ke dalam empat tingkat yaitu tingkat I, II, III, dan IV yang ditunjukkan pada Tabel 2.5. Berdasarkan distribusi statistik dari arus puncak pertama *return stroke*, dapat diestimasikan bahwa tingkat proteksi I akan memproteksi 99% dari keseluruhan *ground flashes*

dan juga untuk tingkat proteksi IV akan memproteksi 84% dari keseluruhan *ground flashes*.

Tabel 2.6 Efisiensi Sistem Proteksi Petir

Tingkat Proteksi	Efisiensi SPP
I	0,99
II	0,97
III	0,91
IV	0,84

Sumber : Vernon Cooray, 2010:173

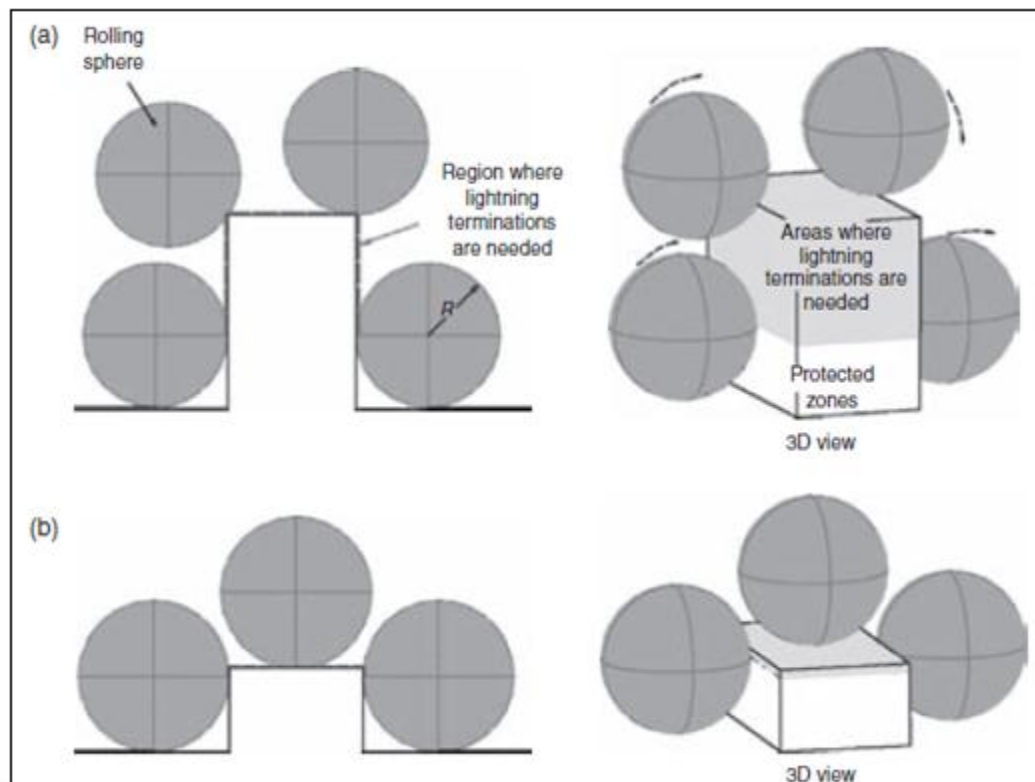
2.8. Metode Bola Gelinding (*Rolling Sphere Method*)

Konsep dari metode bola gelinding berawal dari model elektrogeometri yang didasarkan pada asumsi bahwa *stepped leader* telah mendekati nilai kritis jarak sambar sebelum mengenai bangunan. Konsep ini mengasumsikan bahwa terdapat daerah berbentuk bola, dengan besarnya jari-jari bola sama dengan jarak sambar dan terletak disekitar ujung dari *stepped leader*. Berdasarkan konsep ini sistem terminasi udara harus diletakkan sedemikian rupa sehingga ketika sebuah bola, dengan nilai radius yang telah ditentukan, digelindingkan pada gedung, tepi bola hanya menyentuh konduktor dari sistem proteksi petir yang terpasang. Contoh penerapan dari metode bola gelinding dapat ditunjukkan pada Gambar 2.11.

Pada gambar tersebut ditunjukkan bahwa suatu gedung yang menggunakan sistem proteksi melalui pendekatan metode bola gelinding, ketika bola dengan radius R digelindingkan pada permukaan bangunan, maka bola hanya boleh menyentuh siste proteksi eksternal gedung. Jika tinggi gedung melebihi radius bola, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.a maka sistem proteksi harus mampu melindungi sisi vertikal dinding gedung. Tetapi jika tinggi gedung tidak melebihi radius bola, seperti yang ditunjukkan gambar 2.11.b, maka perlindungan pada sisi vertikal gedung tidak diperlukan.

Jari-jari bola, yang diasumsikan sebagai jarak sambar, diasosiasikan sebagai arus puncak *return stroke* (I_{crit}). Untuk *stepped leader* dengan arus puncak *return stroke* yang lebih besar dari I_{crit} , maka dapat diasosiasikan menggunakan

bola dengan radius yang lebih besar, sehingga *stepped leader* ini tidak dapat memasuki sistem proteksi petir. Sebaliknya, *stepped leader* yang memiliki nilai arus puncak *return stroke* yang lebih kecil dari I_{crit} , akan diasosiasikan menggunakan bola dengan radius yang lebih kecil, sehingga *stepped leader* seperti ini dapat langsung menyambar sistem proteksi petir. Oleh karena itu, untuk mendapatkan sistem proteksi petir yang lebih sensitif terhadap sambaran petir, sebaiknya digunakan bola dengan radius yang lebih kecil dalam desain sistem proteksi petir.



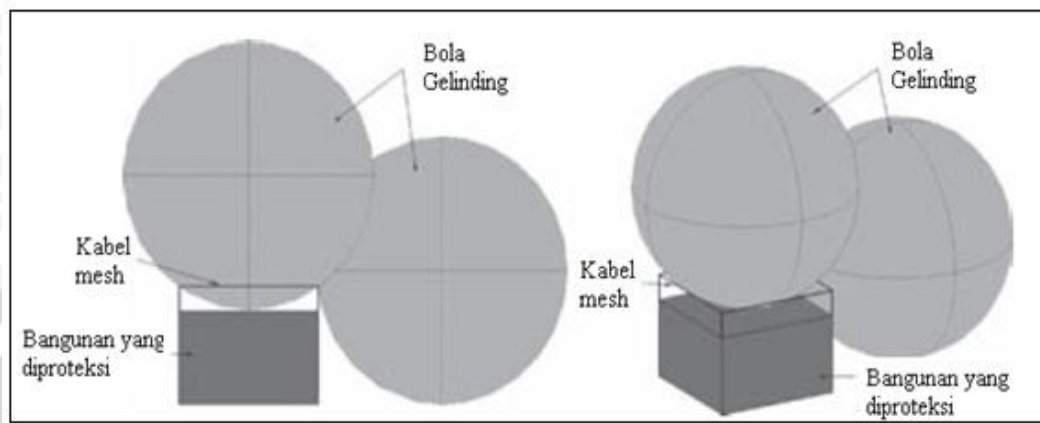
Gambar 2.11 Proteksi Gedung Menggunakan Metode Bola Gelinding

Sumber : Vernon Cooray. 2010:171

Seuai dengan standar proteksi petir menurut IEC, sistem proteksi petir tingkat I memiliki nilai arus puncak kritis *return stroke* sebesar 2,9 kA. Artinya, untuk nilai arus yang lebih besar dari 2,9 kA tidak akan dapat menyambar sistem proteksi yang terpasang. Begitu juga untuk tingkat II, III, dan IV yang memiliki nilai arus puncak kritis *return stroke* sebesar 5,4 kA; 10,1 kA; dan 15,7 kA.

Metode bola gelinding dapat dikombinasikan dengan metode mata jala (mesh) untuk menghasilkan proteksi yang lebih baik untuk melindungi gedung

dari sambaran petir. Metode bola gelinding memprediksi bahwa petir dapat menyambar gedung, jika *mesh* diletakkan langsung menempel pada struktur bangunan. Sehingga untuk menghindari kejadian tersebut, *mesh wire* diletakkan dengan jarak tertentu di atas struktur yang diproteksi, di mana besarnya jarak ini akan semakin kecil dengan semakin meningkatnya tingkat proteksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Peletakan Mesh pada Gedung yang Diproteksi Menggunakan Metode Bola Bergulir

Sumber : Vernon Cooray. 2010:171

2.9. Daerah Lindung

Daerah lindung ditentukan oleh jarak sambar yang terkait dengan nilai puncak arus petir. Jarak sambar adalah jarak sambaran petir terhadap suatu Objek. Hubungan antara jarak sambar dan arus puncak petir dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$h_B = 2I_m + 30\left(1 - e^{-\frac{I_m}{6,8}}\right) \quad (2-18)$$

Dengan :

h_B : jarak sambar (meter)

I_m : arus puncak petir (kA)

Hubungan ini memperlihatkan bahwa petir dengan arus puncak yang kecil memiliki jarak sambar yang pendek. Semakin tinggi suatu tingkat proteksi suatu sistem proteksi eksternal maka semakin kecil arus puncak petir yang harus diperhatikan. Hubungan tersebut dapat terlihat pada Tabel 2.7 dan 2.8.



Teori yang mendasari penentuan daerah lindung disebut teori elektro-geometri. Teori elektro-geometri adalah teori yang mengaitkan hubungan sifat listrik sambaran petir dengan geometri sistem penangkap petir. Seperti yang ditunjukkan Gambar 2.11, daerah lindung menurut teori elektro-geometri mirip dengan daerah lindung konvensional, yakni berbentuk kerucut, tetapi bidang miring dari kerucut tersebut melengkung dengan jari-jari sama dengan jarak sambar petir.

Tabel 2.7 Nilai Minimum Parameter Arus Petir dan Probabilitasnya

Tingkat Proteksi Petir	Nilai Minimum		
	Minimum Arus Puncak Petir	Probabilitas arus puncak petir melampaui nilai minimalnya	Jari-jari dari Bola Gelinding
I	3 kA	99 %	20 m
II	5 kA	97 %	30 m
III	10 kA	91 %	45 m
IV	16 kA	84 %	60 m

Sumber : Dehn+Söhne, 2007:23

Tabel 2.8 Nilai Maksimum Arus Petir dan Probabilitasnya

Tingkat Proteksi Petir	Nilai Maksimum	
	Maksimum Arus Puncak Petir	Probabilitas arus puncak petir kurang dari nilai maksimalnya
I	200 kA	99 %
II	150 kA	98 %
III	100 kA	97 %
IV	100 kA	97 %

Sumber : Dehn+Söhne, 2007:23

2.10. Sistem Proteksi Eksternal

Sistem proteksi suatu bangunan terhadap sambaran petir pada hakekatnya adalah suatu sistem yang direncanakan dan dilaksanakan dengan baik sehingga jika terjadi sambaran petir maka sarana ini yang akan menyalurkan arus petir ke

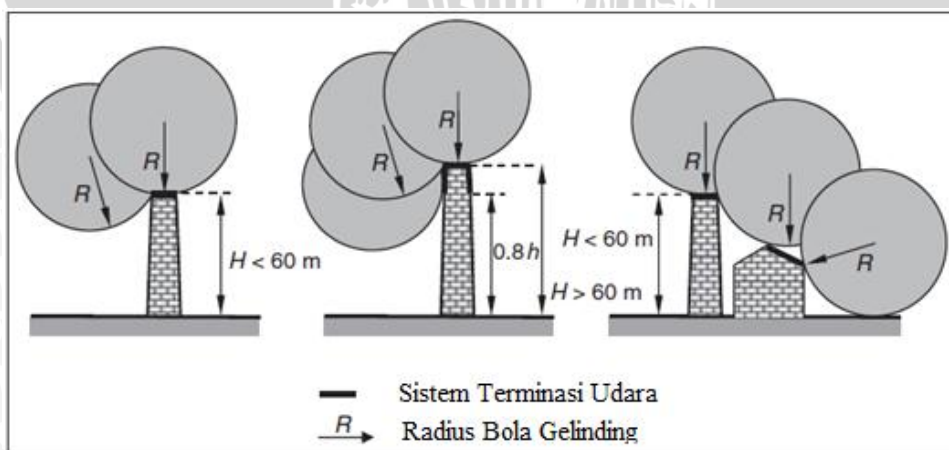
dalam tanah dengan aman tanpa menimbulkan bahaya bagi manusia atau benda berbahaya yang berada di sekitar bangunan. Instalasi sistem proteksi petir eksternal meliputi sistem terminasi udara (*air termination system*), sistem penghantar penyalur (*down conductor system*) dan sistem pembumian (*grounding system* atau *earth termination system*).

2.10.1. Sistem Terminasi Udara (Air Termination System)

Sistem terminasi udara adalah bagian pertama dari sistem proteksi petir eksternal yang bertujuan untuk menangkap petir. Sistem terminasi udara harus dipasang pada titik tertinggi dari suatu bangunan atau peralatan yang ingin dilindungi dari sambaran petir. *Finial* adalah penangkap petir berupa batang pendek yang dipasang pada atap bangunan. Dengan berkembangnya penelitian untuk mengatasi bahaya petir, maka peletakan finial ini dapat menggunakan beberapa pendekatan melalui metode-metode lain seperti metode bola gelinding.

(a) Peletakan Sistem Terminasi Udara pada Bangunan

Sistem terminasi udara dapat disusun dari kombinasi beberapa batang vertikal, *catenary wires*, dan konduktor horizontal atau *mesh*. Batang-batang konduktor ini saling dihubungkan di atap bangunan untuk memastikan adanya pembagian arus. Komponen terminasi udara yang dipasang pada sebuah bangunan dapat diletakkan pada ujung ataupun di beberapa tempat yang langsung terekspose, seperti pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Desain Sistem Terminasi Udara Menggunakan Metode Bola Gelinding

Sumber : Vernon Cooray, 2010: 310

Pada bangunan tinggi, dengan tinggi bangunan lebih besar daripada radius bola ($H > R$). Setiap titik percabangan dari bangunan yang disentuh oleh bola gelinding memungkinkan untuk menjadi titik sambaran. Bagaimanapun juga, probabilitas sambaran petir biasanya diabaikan untuk bangunan yang tingginya kurang dari 60 meter.

(b) Konstruksi Sistem Terminasi Udara

Konstruksi sistem terminasi udara sangat ditentukan oleh parameter petir pada wilayah instalasi. Sistem terminasi udara berupa batang vertikal yang biasa disebut *franklin rod* atau *finial*, dapat dibuat dari berbagai macam logam. Setiap logam memiliki nilai karakteristik yang berhubungan dengan volume pelelehan logam tersebut yang ditunjukkan pada persamaan (2-6). Berikut ini merupakan tabel besaran material logam penyusun *finial*.

Tabel 2.9 Besaran material logam

Besaran	Alumunium	Besi	Tembaga
γ (kg/m ³)	2700	7700	8920
θ (°C)	658	1350	1080
c_s (J/kg)	$356 \cdot 10^3$	$272 \cdot 10^3$	$209 \cdot 10^3$
C_w (J/kg·K)	908	469	385

Sumber : G.F. Moore BSc, 1997: 80

Penentuan besarnya lubang akibat tekanan busur listrik pada suatu plat logam dapat dihitung menggunakan persamaan (R.Golde: 146)

$$\frac{A}{Q} = 25 \cdot S^{-k} \text{ (mm}^2/\text{As)} \quad (2-19)$$

Dengan :

A : luas lubang metal (mm²)

Q : muatan (As)

S : ketebalan plat (mm)

k : konstanta

Konstanta (k) bernilai 0,9 untuk $0 \leq S \leq 0,9$ mm dan bernilai 1,5 untuk $0,9 \leq S \leq 1,5$ mm.

2.10.2. Sistem Penghantar Penyalur (*Down Conductor*)

Sistem penghantar penyalur adalah bagian dari sistem proteksi eksternal yang menghantarkan arus petir dari sistem terminasi udara menuju sistem pembumian. Penghantar penyalur ini harus dipasang vertikal sehingga tercipta jarak terpendek antara ujung bangunan dengan bumi.

(a) Penempatan penghantar penyalur pada bangunan

Pemilihan jumlah dan penempatan penghantar penyalur harus mempertimbangkan fakta bahwa arus petir dapat terbagi dalam beberapa penghantar penyalur sehingga resiko sambaran samping (*side flashes*) dan gangguan elektromagnetik dapat berkurang. Penghantar penyalur seharusnya dipasang seragam dengan susunan simetris sepanjang keliling bangunan. Pembagian arus dapat ditingkatkan tidak hanya dengan menambah jumlah penghantar penyalur tetapi juga dengan menambahkan cincin interkoneksi ekuipotensial.

Pada penghantar penyalur merambat sepasang gelombang berjalan. Gelombang tegangan yang merambat pada penghantar merupakan fungsi jarak dan waktu, sehingga tegangan di suatu titik pada penghantar dapat bervariasi menurut waktu.

Sistem penghantar penyalur mengalirkan arus petir yang diterima oleh batang *finial*. Sesuai dengan analisis gelombang berjalan, maka arus yang mengalir pada penghantar dapat dihitung melalui persamaan berikut: (Hutauruk,1988:34)

$$i_t = 2 \left(1 - \frac{1}{n} \right) i_i \quad (2-20)$$

Dengan:

i_t : arus keluar

i_i ; arus masuk

n : jumlah penghantar

Jarak antar penghantar penyalur yang sesuai dengan ketentuan IEC 62305-3 ditunjukkan pada Tabel 2.10. Hubungan lateral setiap penghantar tidak hanya dipasang pada bagian atas maupun bawah bangunan saja, harus dipasang penghantar lateral sesuai dengan Tabel 2.10 berdasarkan IEC 62305-3.

Tabel 2.10 Nilai Jarak Tipikal Antar Penghantar Penyalur dan Antar Cincin
Penghantar Sesuai dengan Tingkat Proteksi

Tingkat proteksi	Minimum Jarak Tipikal (m)
I	10
II	10
III	15
IV	20

Sumber : Vernon Cooray, 2010:321

Sistem penghantar penyalur dapat langsung dipasang menempel pada struktur bangunan selama kenaikan temperatur yang terjadi pada setiap saluran tidak melebihi dari batas kenaikan temperatur seperti yang terdapat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Kenaikan Temperatur Maksimum Pada Beberapa Bahan Penghantar

q mm ²	Ø	Tingkat Proteksi Petir								
		Aluminium (K)			Besi (K)			Tembaga (K)		
		III+IV	II	I	III+IV	II	I	III+IV	II	I
16		146	454	*	1120	*	*	56	143	309
50	8 mm	12	28	52	37	96	211	5	12	22
78	10 mm	4	9	17	15	34	66	3	5	9

Sumber : Dehn + Sohne 2007:82

Jika dinding terbuat dari bahan yang dapat terbakar dan kenaikan suhu pada penghantar melebihi dari ketentuan yang telah diberikan pada IEC, maka dibutuhkan jarak antara pemasangan sistem penghantar penyalur dengan dinding lebih besar dari 0,1 meter. Pada praktisnya dipasaran, *clamp* yang digunakan unruk memasang penghantar penyalur rata-rata memiliki jarak 20 cm.

(b) Konstruksi sistem penghantar penyalur

Jika dimungkinkan, penghantar penyalur seharusnya dipasang pada setiap sudut terbuka pada gedung yang diproteksi. Penghantar penyalur harus dipasang lurus dan vertikal, sehingga terbentuk jalur terpendek dari sistem terminasi udara

sampai sistem pembumian. Semakin pendek penghantar penyalur, maka semakin kecil pula nilai induktansinya.

Berikut ini merupakan tabel dimensi minimum penghantar penyalur menurut material penyusunnya.

Tabel 2.12 Dimensi Minimum Penghantar Penyalur

Material	Dimensi minimum (mm ²)
Tembaga (Cu)	16
Aluminium (Al)	25
Besi (Fe)	30

Sumber : SNI 03-7015-2004:31

Di dalam penentuan dimensi penghantar, juga perlu dipertimbangkan mengenai kenaikan temperatur yang terjadi. Pada Tabel 2.13 ditunjukkan pula parameter dari material penghantar penyalur yang digunakan sebagai variabel dalam persamaan 2-19. Sehingga dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\int i^2 dt \alpha \rho}{q^2 \gamma c_w} - 1 \right] \quad (2-21)$$

Dengan :

θ : Kenaikan temperatur (°K)

α : Koefisien temperatur dari tahanan (1/°K)

ρ : Resistivitas Spesifik (Ωm)

q : luas penampang kabel (m²)

γ : Kerapatan massa (kg/m³)

c_w : Energi panas spesifik (J/kg·K)

Tabel 2.13 Material Logam Penghantar

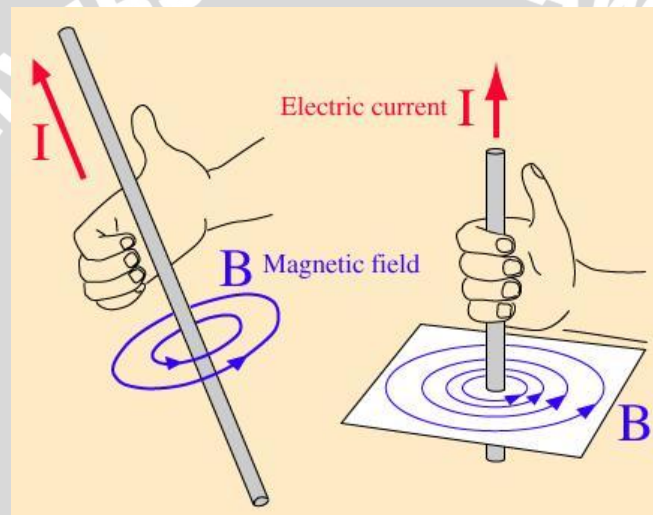
Besaran	Aluminium	Besi	Tembaga
α (1/°K)	$4 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^3$
ρ (Ωm)	$2,9 \cdot 10^{-8}$	$12 \cdot 10^{-8}$	$3,92 \cdot 10^{-8}$
γ (kg/m ³)	2700	7700	8920
c_w (J/kg·K)	908	469	385

Sumber : G.F. Moore BSc, 1997: 80

(c) Medan Elektromagnet pada Penghantar

Arus listrik yang mengalir pada penghantar menimbulkan medan magnet di sekitar penghantar tersebut. Kuat medan magnet bergantung pada besarnya arus yang mengalir pada penghantar. Semakin besar arusnya, maka semakin kuat medan magnetnya.

Untuk menentukan hubungan antara arus yang mengalir dengan arah medan magnet, maka dapat digunakan kaidah tangan kanan (*right-hand rule*). Kaidah tangan kanan dapat diperagakan seolah-olah telapak tangan kanan memegang penghantar berarus dengan ibu jari menunjukkan arah arus. Maka arah keempat jari menunjukkan arah medan magnet, seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Kaidah Tangan Kanan

Sumber : <http://pyrotigero.wordpress.com/2010/10/06/medan-magnet/>

Jika terdapat sebuah konduktor dengan panjang tak terhingga, maka untuk mencari besarnya medan magnet pada titik yang berada pada titik P dengan jarak r , seperti pada Gambar 2.15, maka dapat dihitung melalui persamaan berikut: (Edminister, A. Joseph, 1993:115)

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} a_\phi \quad (2-22)$$

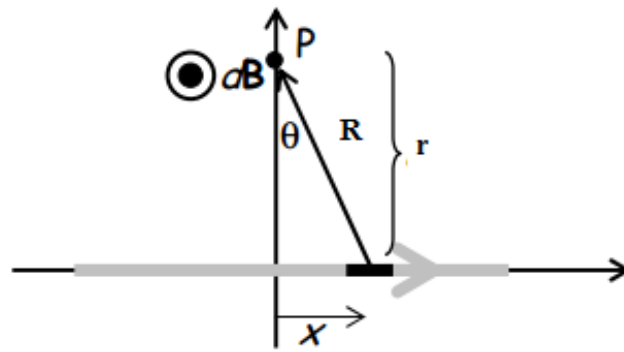
Dengan :

B = Medan Magnet (tesla)

μ_0 = permeabilitas ruang bebas (H/m)

I = arus (A)

r = jarak (meter)



Gambar 2.15 Medan Magnet pada Titik P

Sumber : <http://www.phys.itb.ac.id/~khbasar/arsip/F11201/GayadanMedanMagnet.pdf>

2.10.3. Sistem Pembumian (*Grounding System*)

Sistem pembumian adalah bagian dari sistem proteksi eksternal yang berfungsi untuk mengalirkan arus petir ke tanah. Selain itu terdapat beberapa fungsi lain yaitu untuk mendisipasi energi petir ke dalam tanah, jalur resistansi rendah ke tanah, memberikan jalur pada arus gangguan, mengurangi noise dalam rangkaian sinyal dan rangkaian kontrol, dan sebagai potensial acuan. Ujung penghantar penyalur dihubungkan dengan tahanan pembumian. Untuk mendapatkan tahanan pembumian yang kecil, diperlukan elektroda pembumian. Prinsip dasar untuk memperoleh tahanan pembumian yang kecil adalah dengan membuat permukaan elektroda bersentuhan dengan tanah sebesar mungkin.

Sesuai dengan persamaan

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{2-23}$$

Dengan :

R : resistansi pembumian (Ω)

ρ : tahanan jenis tanah (Ωm)

L : panjang lintasan arus di tanah (m)

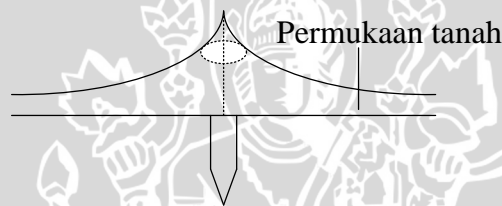
A : luas penampang lintasan arus di tanah (m^2)

Pada awalnya sistem pembumian dilakukan dengan melakukan pemasangan batang-batang elektroda pembumian yang ditanam secara tegak lurus dalam tanah. Jika tahanan pembumian masih terlalu tinggi, maka perlu adanya penambahan elektroda pembumian yang berfungsi untuk menurunkan tahanannya.

Cara yang dilakukan dengan menanam batang-batang elektroda disebut pbumian batang atau pbumian rod.

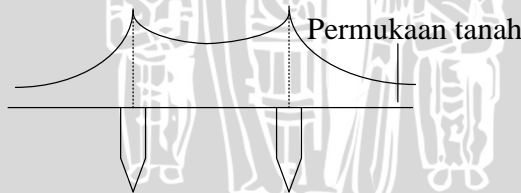
(a) Pbumian Batang Vertikal

Tujuan dari pbumian batang vertikal adalah untuk memperoleh tahanan tanah yang rendah sehingga dapat memungkinkan arus gangguan yang terjadi dengan cepat dapat terdistribusi ke tanah. Jika dengan 1 batang elektroda pbumian vertikal masih diperoleh tahanan tanah yang tinggi maka dapat dilakukan dengan cara menggunakan beberapa batang elektroda pbumian vertikal sehingga diperoleh tahanan tanah yang rendah dan diharapkan distribusi tegangan yang terjadi lebih merata. Namun untuk areal pbumian yang luas dan mempunyai tahanan jenis tanah yang besar maka penanaman elektroda dengan beberapa batang vertikal perlu dikaji karena dari segi ekonomis kurang efisien.



Gambar 2.16 Distribusi Tegangan Sekitar Satu Batang Elektroda

Sumber: <http://ngelmuelektro.wordpress.com/>



Gambar 2.17 Distribusi Tegangan Sekitar Dua Batang Elektroda

Sumber: <http://ngelmuelektro.wordpress.com/>

Pada Gambar 2.16 dan 2.17 di atas diperlihatkan distribusi tegangan yang terjadi untuk satu batang elektroda dan dua batang elektroda yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah, di mana arus kesalahan mengalir dari elektroda tersebut ke tanah sekitarnya. Dengan demikian untuk jumlah elektroda yang lebih banyak yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah maka tahanan pentanahan semakin kecil dan distribusi tegangan akan lebih merata.

(b) Tahanan Jenis Tanah

Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tergantung dari beberapa faktor, yaitu :

- Jenis tanah : tanah liat, barpasir, barbatu dan lain-lain.
- Lapisan tanah : berlapis-lapis dengan tahanan jenis berlainan atau uniform.
- Kelembaban tanah
- Temperatur

Tahanan jenis tanah bervariasi dari 500 sampai 50.000 Ohm per cm^3 . kadang-kadang harga ini dinyatakan dalam Ohm-cm. Pernyataan Ohm-cm merepresentasikan tahanan antara dua permukaan yang berlawanan dari suatu volume tanah yang berisi 1 cm^3 .

Harga tahanan jenis tanah pada kedalaman yang terbatas sangat bergantung dengan keadaan cuaca. Untuk mendapatkan tahanan jenis tanah rata-rata untuk keperluan perencanaan maka diperlukan penyelidikan atau pengukuran dalam jangka waktu tertentu misalnya selama satu tahun. Biasanya tahanan tanah juga tergantung dari tingginya permukaan tanah dari permukaan air yang konstan.

Beberapa tahanan jenis dari berbagai unsur tanah ditunjukkan pada Tabel 2.14 di bawah ini :

Tabel 2.14 Harga Tahanan Jenis Beberapa Unsur Tanah

Jenis Tanah	Tahanan Jenis ($\Omega\cdot\text{cm}$)
Tanah liat, tanah kebun	500-5.000
Tanah Liat	800-5.000
Campuran tanah liat, pasir dan kerikil	4.000-25.000
Pasir dan kerikil	6.000-10.000
Batu tulis, pasir berbatu, dll	1.000-50.000
Batu Karang	20.000-1.000.000

Sumber: Tagg, G.F., 1964: 4

Tahanan pembumian atau resistansi pembumian dari satu batang elektroda dapat dihitung melalui persamaan:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \quad (2-24)$$

Dengan:

R : tahanan pembumian satu batang elektroda (Ω)

ρ : tahanan jenis tanah (Ωm)

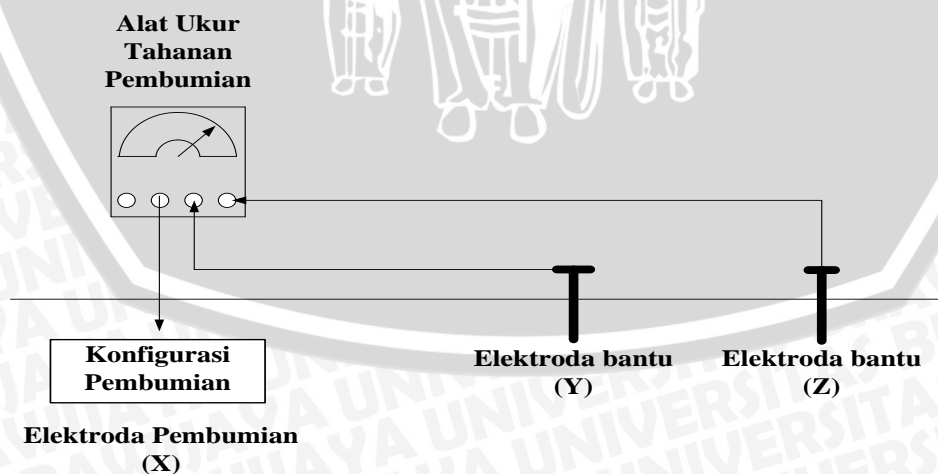
L : panjang elektroda pembumian (m)

a : jari-jari elektroda pembumian (m)

(c) Pengukuran Tahanan Sistem Pembumian

Resistansi pembumian biasanya diasumsikan sebagai resistansi rod pembumian, yaitu resistansi ohmik antara sebuah elektrode pembumian dan sebuah elektrode acuan (sebagai elektrode bantu) yang dibumikan dan ditempatkan pada jarak yang jauh dari sistem pembumian yang diuji.

Dalam praktek pengukuran resistansi pembumian diukur antara dua titik, yaitu rod dibawah pengujian dan elektroda bantu yang dihubungkan dengan terminal Y dari tester pembumian seperti terlihat pada Gambar 2.18. Metode pengukuran ini diacu sebagai metode jatuh tegangan. Agar hubungan dengan bumi terbentuk, dua elektroda bantu (elektroda arus Z dan elektroda tegangan Y) yang ditanam di tanah dibuat segaris. Sebuah generator arus mensuplai arus konstan antara rod yang diuji dan elektroda bantu Z. Pengukuran jatuh tegangan antara rod yang diuji dan elektroda Y dilakukan selangkah demi selangkah bergerak dari elektroda yang diuji ke arah elektroda Z.



Gambar 2.18 Prinsip Pengukuran Resistansi Pembumian

Sumber : Instruction Manual "Analogue Earth Tester" Model 4102

BAB III

METODOLOGI

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di lokasi pembangunan gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis dengan kondisi belum ada tahap pembangunan struktur yang telah dilakukan. Waktu pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan Maret 2012 sampai dengan Juni 2012.

3.2. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan dengan cara mengumpulkan data primer, data sekunder dan studi literatur. Data primer yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah data resistansi pbumian pada lokasi pembangunan gedung. Data sekunder yang dibutuhkan berupa gambar perencanaan gedung dan jumlah hari guruh per tahun (*isokeraunic level*) wilayah Kota Malang. Studi pustaka dilakukan dengan cara mempelajari seluruh aspek teoritis dari berbagai referensi untuk memperoleh rumusan dan standar-standar yang digunakan dalam perancangan sistem proteksi eksternal pada gedung tersebut.

3.2.1. Data Primer

Data primer adalah data yang didapatkan dari hasil pengamatan dan survei. Data primer yang diperoleh adalah data resistansi pbumian pada lokasi pembangunan gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya. Pengukuran nilai resistansi pbumian dilakukan menggunakan metode tiga titik dengan menggunakan alat ukur *Analogue Earth Tester* tipe 4102.

(a) Peralatan yang Dibutuhkan

Untuk mendapatkan data primer yang diperlukan di dalam melakukan penelitian ini, maka dibutuhkan:

1. Alat Ukur

Untuk mengetahui nilai resistansi pbumian diperlukan alat pengukur tahanan pbumian, yaitu:

- Pengukur Tahanan Pembedaan Analog (*Analogue Earth Tester*) Model 4102, dengan data teknis seperti terlihat pada Tabel 3.1 dan 3.2, serta melalui Gambar 3.1 dan 3.2.
- Model 4102 digunakan untuk saluran distribusi daya dalam sistem pengawatan rumah dan aplikasi-aplikasi listrik lainnya.
- Dirancang dengan standar keamanan IEC 61557.
- Konstruksi tahan debu sesuai standar IEC 60529 (IP54).
- Memiliki probe pengukuran sederhana menggunakan penjepit buaya.
- Dimensi:
 - Panjang : 105 mm
 - Lebar : 158 mm
 - Tinggi : 70 mm
 - Berat : 600 gram

Tabel 3.1 Akurasi dan Range Pengukuran

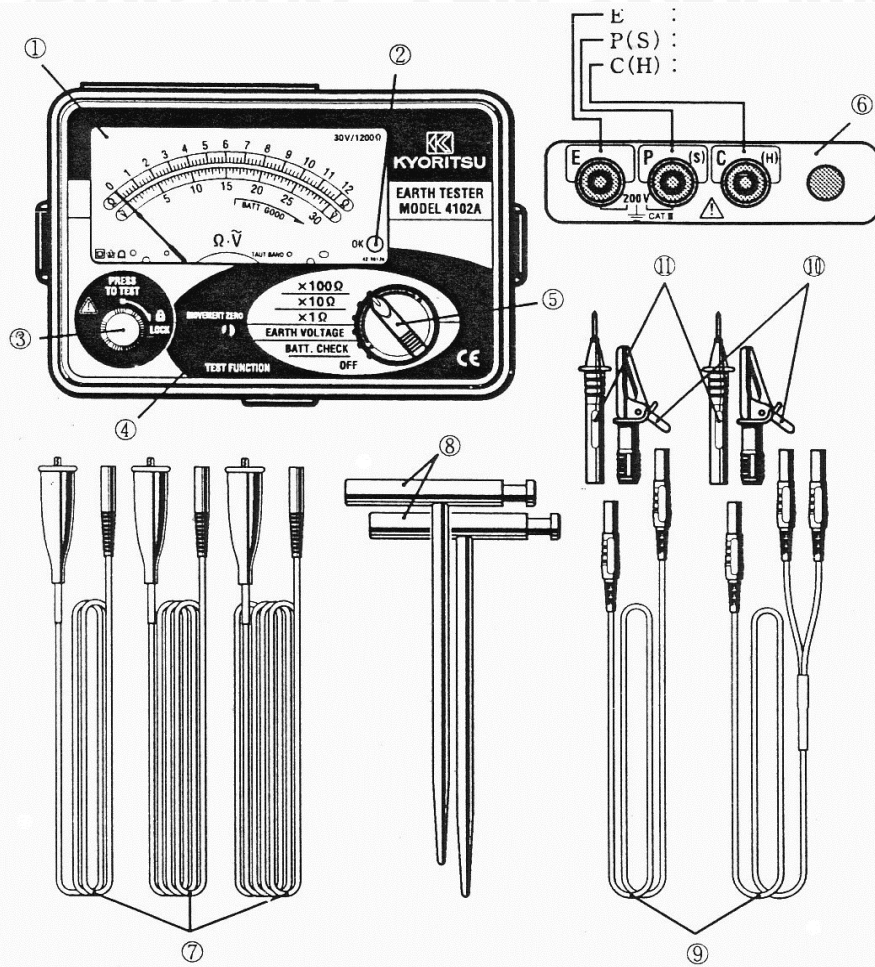
Range	Range Pengukuran	Akurasi
Tegangan Pembedaan	0 – 30 V	$\pm 3\%$ pada skala penuh
Tahanan Pembedaan x 1 Ω x 10 Ω x 100 Ω	0 – 12 Ω	$\pm 3\%$ pada skala penuh (tahanan pembedaan elektroda bantu 100 Ω \pm 5%) (tegangan pembedaan 10 V atau kurang)
	0 – 120 Ω	
	0 – 1200 Ω	

Sumber: Instruction Manual "Analogue Earth Tester" Model 4102

Tabel 3.2 Pembacaan Skala Alat Ukur

Besaran	Batas Ukur	Skala		Faktor Pengali
Tegangan Pembedaan	0 – 30 V	A	30	x 1
Tahanan Pembedaan	0 – 12 Ω	B	12	x 1
	0 – 120 Ω	B	12	x 10
	0 – 1200 Ω	B	12	x 100

Sumber : Instruction Manual "Analogue Earth Tester" Model 4102



Gambar 3.1 Layout Alat Ukur Analogue Earth Tester

Sumber : Instruction Manual "Analogue Earth Tester" Model 4102

Keterangan :

- | | |
|------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Papan Skala | 7. Kabel Penghantar |
| 2. Lampu OK | 8. Elektroda Bantu |
| 3. Tombol Uji | 9. Probe untuk Pengukuran Sederhana |
| 4. Adjuster Kalibrasi | 10. Penjepit Buaya |
| 5. Selektor Range Pengukuran | 11. Sekat Uji |
| 6. Terminal Pengukuran | |

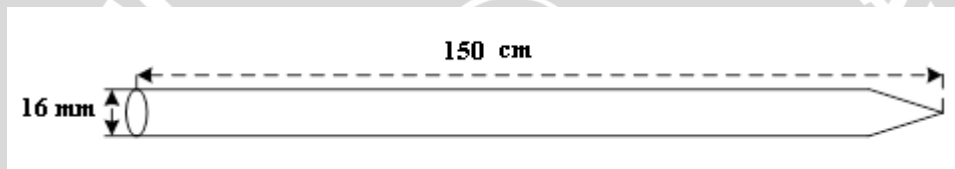


Gambar 3.2 Skala Alat Ukur

Sumber: Instruction Manual "Analogue Earth Tester" Model 4102

2. Batang Elektroda Pengukuran

Batang elektroda yang digunakan pada pengukuran pembumian ini ditunjukkan pada Gambar 3.3 :



Gambar 3.3 Batang Elektroda yang Digunakan

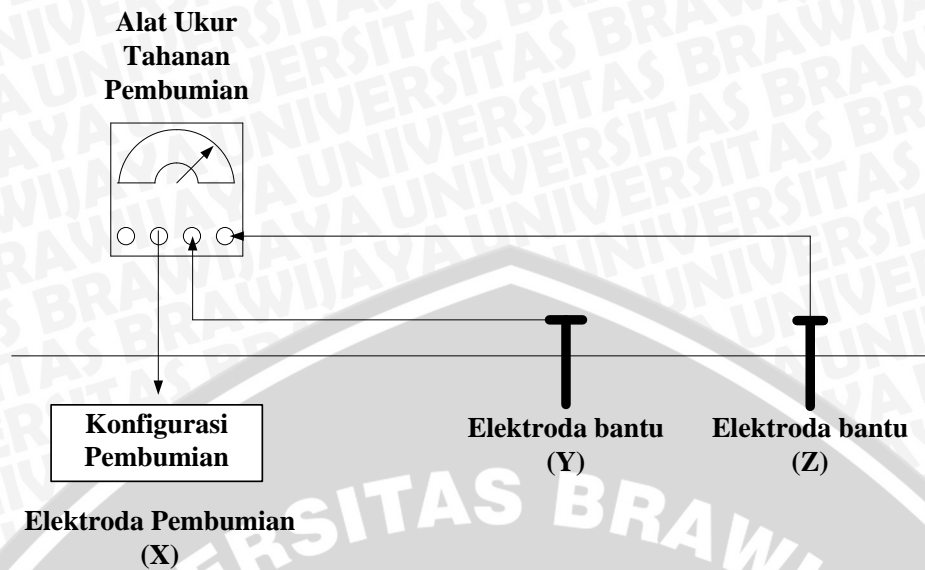
Sumber: Penulis

Spesifikasi :

- Bahan : Batang besi yang disepuh tembaga
- Panjang : 150 cm
- Diameter : 16 mm
- Jumlah : 2 batang

(b) Rangkaian Pengukuran

Pengukuran menggunakan metode tiga titik dengan menginjeksikan arus AC konstan sebesar I di antara elektroda uji (x) dan elektroda arus (z) yang menimbulkan beda potensial sebesar V di antara elektroda uji (x) dan elektroda tegangan (y). Sehingga didapatkan nilai tahanan pembumian sebesar R . Gambar 3.4 di bawah menunjukkan gambar rangkaian pengukuran yang digunakan dalam pengambilan data.



Gambar 3.4 Rangkaian Pengukuran Tahanan Pembumian

Sumber : Instruction Manual "Analogue Earth Tester" Model 4102

(c) Pengukuran Resistansi Pembumian

Pengukuran nilai resistansi pembumian ini dilakukan menggunakan 1 batang elektroda dengan variasi kedalaman dari 10 cm sampai 100 cm. Selain itu juga dilakukan pengukuran menggunakan 2 batang elektroda yang dipasang paralel dengan variasi kedalaman dari 10 cm sampai 100 cm. Pengukuran ini dilakukan pada satu lokasi karena lokasi pembangunan gedung yang tidak terlalu luas.

3.2.2. Data Sekunder

Data-data yang diperlukan dalam kajian ini terdiri dari data sekunder yang bersumber dari buku referensi, jurnal, skripsi, dan internet. Data sekunder yang digunakan dalam pembahasan skripsi ini antara lain sebagai berikut :

(a) Data Hari Guruh di Wilayah Kota Malang

Data hari guruh (*thunderstormday*) di Wilayah Kota Malang didapatkan dari Stasiun Geofisika Karangates, Balai Besar Wilayah III Denpasar, Jl.Raya Bendungan Lahor No. 40, Karangates, Kec. Sumber Pucung, Malang, Jawa Timur, Telp. 0341-385667 / 0341-386261. Adapaun hari guruh yang teramati pada tahun 2011 ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Data Hari Guruh Tahun 2011

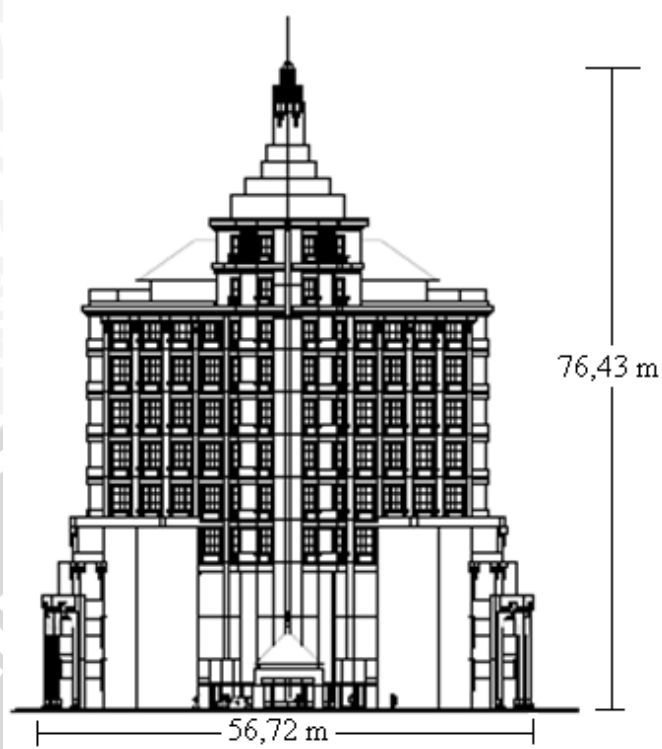
Bulan	Jumlah Hari Guruh
Januari	9
Februari	7
Maret	15
April	14
Mei	10
Juni	0
Juli	0
Agustus	0
September	0
Oktober	10
November	17
Desember	11
TOTAL	93

Sumber : Stasiun Geofisika Karangates – Malang

(b) Denah Gedung Utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya

Denah gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya meliputi : tampak depan, tampak samping kanan, tampak samping kiri, dan tampak belakang. Denah tampak depan dari gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis dapat dilihat pada Gambar 3.5.

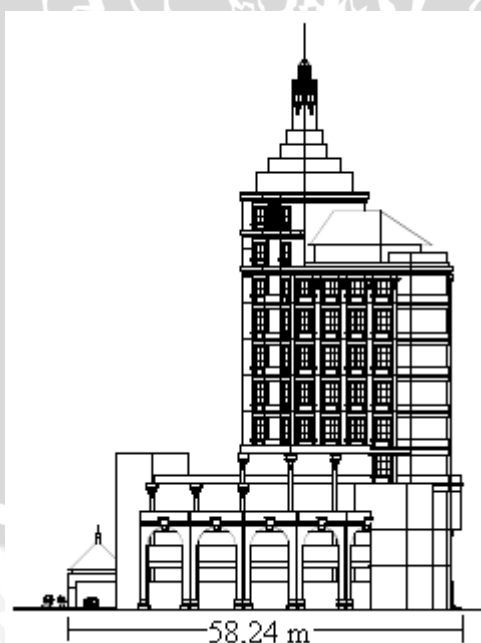
Pada Gambar 3.5 di bawah, gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis memiliki panjang bangunan 56,72 m dan tinggi bangunan 76,43 m. Sedangkan pada Gambar 3.6 merupakan gambar tampak samping dari gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis. Dari gambar tersebut tampak bahwa gedung memiliki lebar bangunan sebesar 58,24 m.



Gambar 3.5 Gedung Utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Tampak Depan

Sumber : Gambar Perencanaan Gedung Utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis

Universitas Brawijaya



Gambar 3.6 Gedung Utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Tampak Samping

Sumber : Gambar Perencanaan Gedung Utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis

Universitas Brawijaya

(c) **Tabel Indeks menurut Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP)**

Besarnya kebutuhan akan sistem proteksi petir ditentukan oleh penjumlahan indeks-indeks tertentu yang mewakili keadaan bangunan di suatu lokasi. Pada Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP) telah dicantumkan lima tabel yang memuat indeks A sampai indeks E. Setiap indeks memiliki poin-poin tertentu yang disesuaikan dengan kondisi bangunan.

Indeks A mengklasifikasikan bahaya berdasarkan jenis bangunan, indeks B mengklasifikasikan bahaya berdasarkan konstruksi bangunan, indeks C mengklasifikasikan bahaya berdasarkan tinggi bangunan, indeks D mengklasifikasikan bahaya berdasarkan situasi bangunan, dan indeks E mengklasifikasikan bahaya berdasarkan hari guruh per tahun setempat. Penjelasan lebih lanjut mengenai indeks A sampai indeks E yang ditentukan oleh PUIPP dapat dilihat pada lampiran 1.

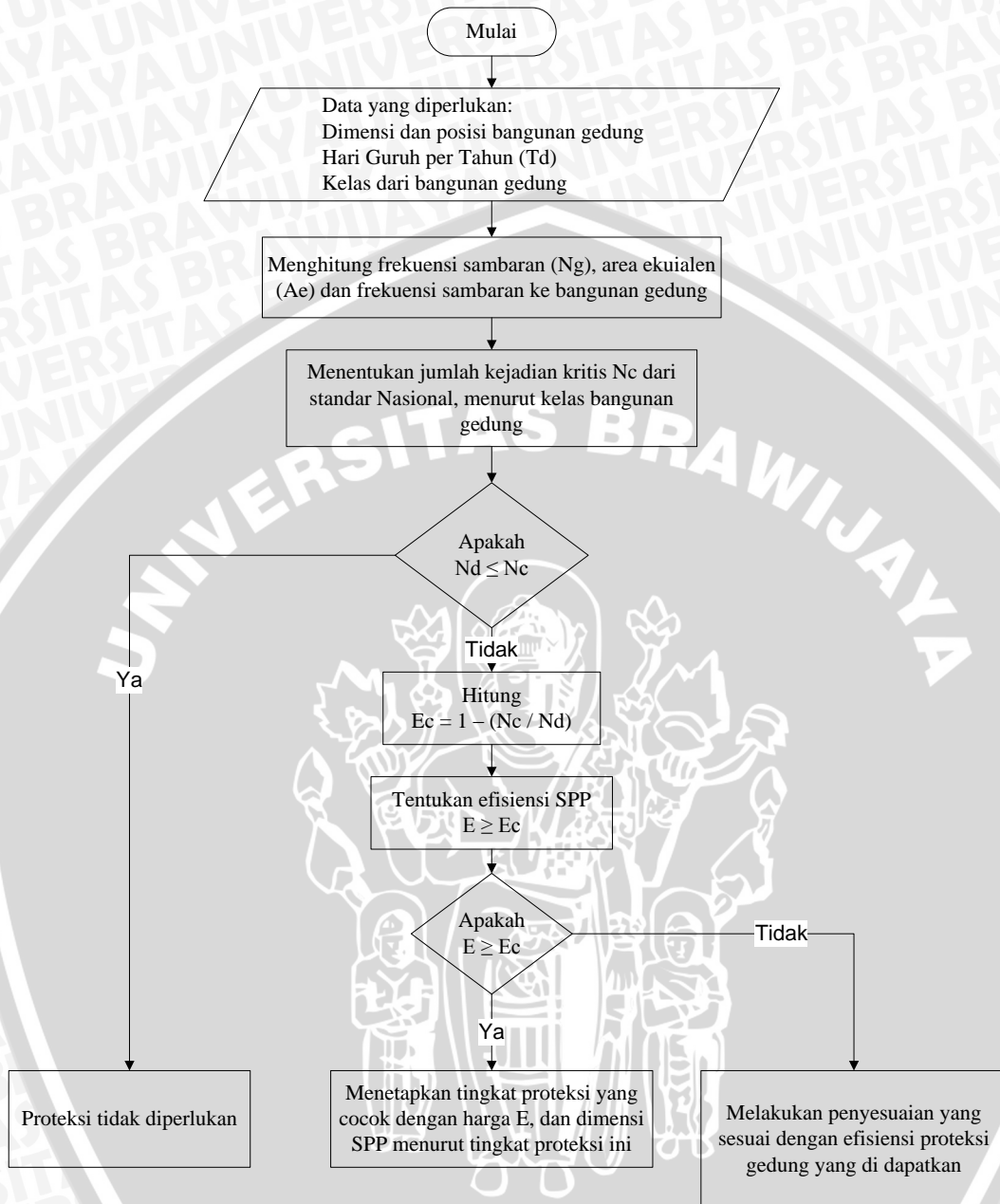
Dari kelima indeks tersebut maka dapat ditentukan tingkat kebutuhan suatu bangunan akan adanya sistem proteksi petir. Hubungan antara hasil penjumlahan dari indeks-indeks tersebut dengan kebutuhan sistem proteksi petir ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Perkiraan Bahaya Sambaran Petir Berdasarkan PUIPP

R	Perkiraan bahaya	Pengamanan
Di bawah 11	Diabaikan	Tidak Perlu
Sama dengan	11 Kecil	Tidak Perlu
	12 Sedang	Dianjurkan
	13 Agak Besar	Dianjurkan
	14 Besar	Sangat Dianjurkan
Lebih dari 14	Sangat Besar	Sangat Perlu

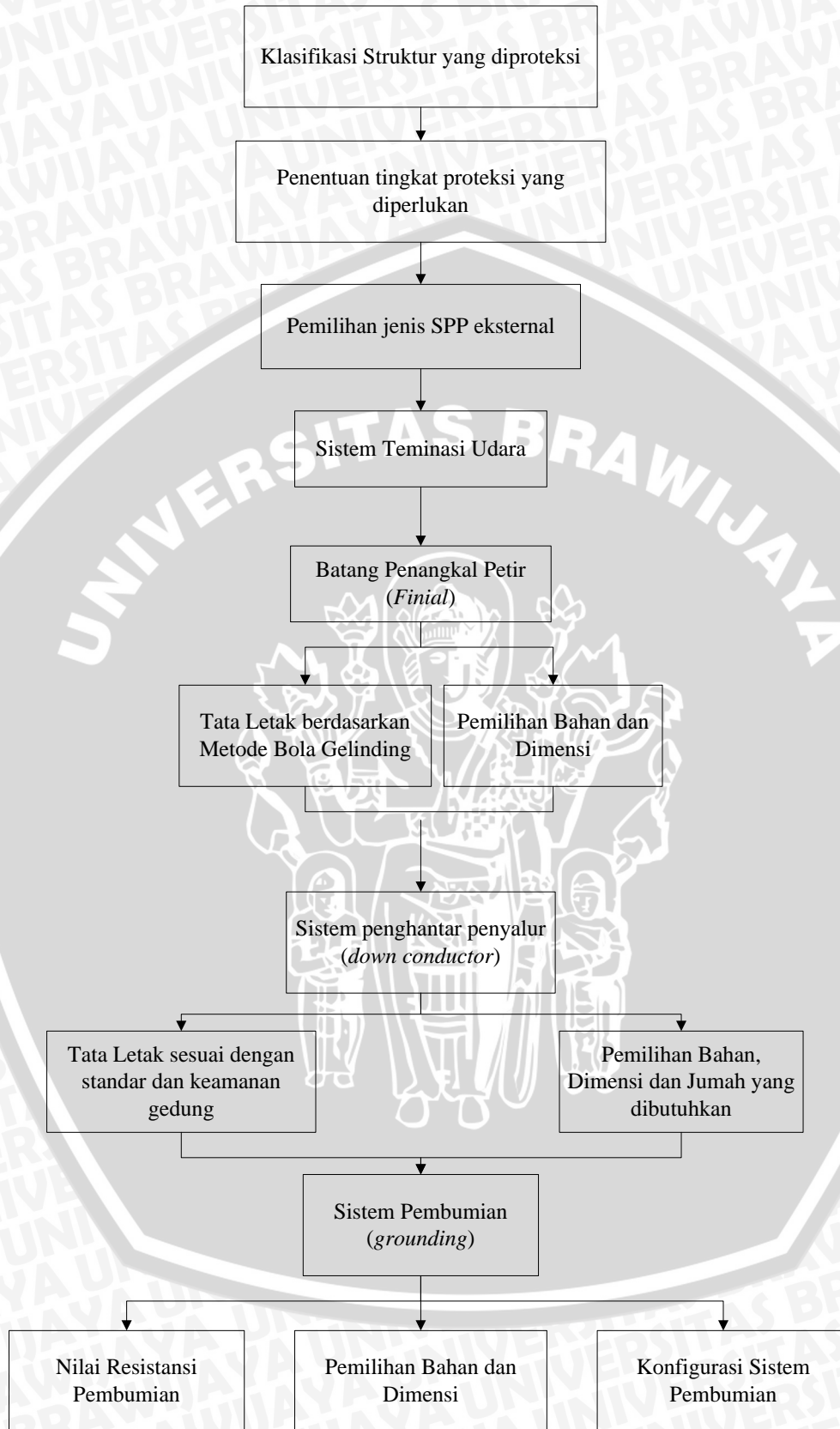
Sumber : Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, 1983.

3.3. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.7 Diagram Alir Tingkat Proteksi yang Dibutuhkan Gedung

Sumber : Penulis



Gambar 3.8 Diagram Alir Perancangan Sistem Proteksi Petir Eksternal

Sumber : Penulis

3.4. Perhitungan dan Analisis Data

Langkah awal dari penelitian ini yakni dimulai dengan pengumpulan data. Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan dengan cara mengumpulkan data primer, data sekunder dan studi literatur. Data primer yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah data resistansi pembumian pada lokasi pembangunan gedung. Nilai resistansi pembumian ini digunakan untuk keperluan perancangan sistem pembumian gedung. Resistansi yang didapatkan harus sekecil mungkin, diusahakan dapat lebih kecil dari 1Ω . Semakin kecil nilai resistansi pembumian yang didapat maka akan semakin besar arus petir yang dapat dibumikan, sehingga memberikan proteksi yang lebih baik terhadap bangunan dan peralatan-peralatan elektronik, yang terkait dengan sistem proteksi internal.

Dalam pengumpulan data primer, hanya dilakukan variasi kedalaman penanaman elektroda batang dari kedalaman 10 cm sampai 100 cm. Dilakukan dua kali pengukuran yakni menggunakan 1 batang elektroda dan pengukuran menggunakan 2 batang elektroda yang dihubungkan secara paralel. Dari hasil pengukuran, maka akan didapatkan grafik hasil pengukuran yang selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan penanaman elektroda pembumian yang sesuai dengan jenis tanah dan bentuk gedung.

Data sekunder yang dibutuhkan berupa gambar perencanaan gedung dan jumlah hari guruh per tahun (*isokeraunic level*) wilayah Kota Malang. Gambar perencanaan gedung digunakan untuk menghitung luas daerah ekuivalen yang berhubungan erat dengan frekuensi sambaran petir. Selain itu juga digunakan untuk mengetahui lebih jelas rancangan tata letak sistem proteksi eksternal meliputi sistem terminasi udara, sistem penghantar penyalur dan sistem pembumian pada gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis. Sedangkan data hari guruh pertahun wilayah Kota Malang digunakan sebagai variable di dalam perhitungan efisiensi sistem proteksi petir yang berhubungan dengan penentu tingkat proteksi petir pada gedung tersebut.

Data-data yang sudah terkumpul tersebut selanjutnya diolah melalui perhitungan dan analisis sehingga diperoleh perancangan sistem proteksi eksternal yang diharapkan. Data-data yang sudah ada, termasuk metode perhitungan

diterapkan pada langkah ini lebih detail dan sesuai dengan keadaan yang sesungguhnya di lapangan.

Perhitungan akan tingkat proteksi yang dibutuhkan oleh gedung dapat ditunjukkan melalui diagram alir pada Gambar 3.7. Perhitungan ini dimulai dari pemilihan sistem proteksi petir sesuai dengan standar yang ada. Sebagai data masukan pertama dibutuhkan data dimensi dan posisi gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya yang akan diproteksi, hari guruh dalam satu tahun untuk wilayah Kota Malang yang dinotasikan dengan T_d , dan kelas dari gedung menurut Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP). Selanjutnya dilakukan perhitungan kerapatan sambaran petir (N_g) sesuai persamaan (2-2). Kemudian dilakukan perhitungan frekuensi sambaran petir ke gedung dan luas daerah ekuivalen sesuai dengan persamaan (2-12) dan (2-13). Selanjutnya menentukan kejadian kritis (N_c) menurut kelas gedung sesuai dengan PUIPP.

Dari perhitungan di atas maka akan didapatkan besarnya nilai N_d dan N_c . Jika nilai kejadian kritis sambaran petir kurang dari atau sama dengan frekuensi sambarannya ($N_c \leq N_d$) maka sistem proteksi pada gedung tidak diperlukan. Sedangkan, jika nilai N_d lebih dari nilai N_c maka langkah selanjutnya adalah perhitungan E_c sesuai dengan persamaan (2-14). Setelah didapatkan nilai E_c maka dapat dipilih efisiensi sistem proteksi petir sesuai dengan yang ditunjukkan pada Tabel 2.5. Pada IEC 62305-1 dijelaskan bahwa untuk nilai E_c yang melebihi nilai efisiensi yang ditentukan oleh IEC, maka harus dilakukan penyesuaian yang tidak tercantum dalam standar. Tetapi kemungkinan terjadinya nilai $E_c > E$ sangat kecil, yaitu kurang dari 2%.

Selanjutnya setelah dilakukan pemilihan tingkat proteksi maka dilakukan analisis perancangan sistem proteksi petir eksternal yang diawali dengan perancangan sistem terminasi udara yang terdiri dari penentuan lokasi penempatan terminasi udara dan pemilihan material sesuai dengan besarnya energi pelelehan material. Perancangan terminasi udara menggunakan pendekatan metode bola gelinding.

Perancangan sistem penghantar penyalur yang terdiri dari perancangan dimensi dan jumlah penghantar serta lokasi penempatan sistem penghantar

penyalur. Kemudian dilanjutkan dengan perancangan sistem pembumian yang terdiri dari pemilihan sistem elektroda pembumian. Keseluruhan perancangan sistem proteksi eksternal dapat dilihat melalui diagram alir pada Gambar 3.8.

3.5. Penarikan Kesimpulan

Pada tahapan ini dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan teori, hasil perhitungan serta analisis. Tidak hanya itu, akan dicantumkan juga saran-saran terkait pelaksanaannya, misalnya peletakan batang terminasi udara yang tepat, pemilihan jumlah konduktor penyalur, maupun sistem pembumian yang seharusnya digunakan. Dan juga dilakukan pemberian saran kepada pembaca yang akan melakukan studi terkait dengan skripsi ini. Meliputi hal-hal yang menjadi kendala dalam penelitian ataupun hal-hal yang masih memerlukan kajian lebih dalam lagi.



BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas beberapa hal mengenai sistem proteksi eksternal pada gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya. Permasalahan yang akan dibahas adalah penentuan kebutuhan tingkat proteksi sesuai dengan klasifikasi gedung yang berdasarkan Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP), penentuan daerah lindung, dan perancangan sistem proteksi eksternal gedung tersebut yang meliputi perancangan sistem terminasi udara, penghantar penyalur dan pembumian. Dalam analisis akan dicantumkan pula rekomendasi untuk masing-masing kebutuhan proteksi eksternal yang aman dan efektif untuk melindungi gedung dari sambaran petir.

4.1. Penentuan Tingkat Proteksi Gedung

Penentuan tingkat proteksi suatu gedung harus berdasarkan pada klasifikasi gedung tersebut. Dalam Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP) telah dicantumkan tabel-tabel klasifikasi gedung yang disusun dalam beberapa indeks dengan parameter tertentu yang masing-masing memiliki nilai atau poin dalam bentuk angka, untuk mempermudah dalam perhitungan kebutuhan proteksi gedung.

4.1.1. Dimensi, Sifat dan Karakteristik Gedung

Sebelum diklasifikasikan maka perlu diketahui dimensi, sifat dan karakteristik gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya Malang sesuai yang dicantumkan pada Tabel 4.1.

4.1.2. Klasifikasi Gedung Berdasarkan PUIPP

Besarnya kebutuhan suatu bangunan akan adanya sistem proteksi petir dapat ditentukan oleh indeks-indeks yang menyatakan faktor-faktor tertentu sesuai dengan PUIPP pada Lampiran 1 yakni Tabel 1 sampai dengan Tabel 5. Hasil penjumlahan indeks-indeks tersebut, merupakan indeks perkiraan bahaya akibat sambaran petir. Semakin besar hasil penjumlahan indeks-indeks tersebut maka



akan semakin besar bahaya serta kerusakan yang terjadi akibat sambaran petir pada gedung.

Tabel 4.1 Data Dimensi, Karakteristik dan Sifat Gedung

Karakteristik	Ukuran
Tinggi Gedung	76,43 meter
Panjang Gedung	58,24 meter
Lebar Gedung	56,72 meter
Sifat bangunan	Penting
Karakteristik material	Beton bertulang dengan kerangka besi pada bagian atap

Sumber : Gambar Perencanaan Gedung Utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya

Sesuai dengan pengamatan yang dilakukan pada gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis, maka sesuai dengan tabel Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP) yang dicantumkan pada lampiran 1, maka:

- Berdasarkan Tabel L1-1, gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis merupakan sebuah prasarana pendidikan sehingga memiliki nilai indeks A sebesar 3 poin.
- Berdasarkan Tabel L1-2, gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis memiliki konstruksi beton bertulang dan atap bukan logam sehingga memiliki nilai indeks B sebesar 2 poin.
- Berdasarkan Tabel L1-3, tinggi gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis mencapai 76 meter sehingga memiliki nilai indeks C sebesar 7 poin.
- Berdasarkan Tabel L1-4, gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis terletak pada tanah datar, sehingga tidak mendapatkan nilai pada indeks D.
- Sesuai data dari Stasiun Geofisika Kelas III Karang Kates, Kota Malang memiliki 93 hari garuh pada tahun 2011. Berdasarkan Tabel L1-5, maka gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis memiliki nilai indeks E sebesar 6 poin.

Dari poin-poin yang didapatkan sesuai dengan karakteristik gedung ini akan digunakan sebagai parameter akan kebutuhan sistem proteksi pada bangunan tersebut. Besarnya kebutuhan tersebut ditentukan berdasarkan penjumlahan indeks-indeks tertentu yang mewakili keadaan bangunan yang dirumuskan sesuai dengan persamaan (2-11)

$$R = A + B + C + D + E$$

Dengan nilai indeks $A=3$, $B=2$, $C=7$, $D=0$ dan $E=6$, sehingga

$$R = 3 + 2 + 7 + 0 + 6$$

$$R = 18$$

Dengan nilai $R > 14$, sesuai Tabel 3.4 mengenai perkiraan bahaya sambaran petir berdasarkan PUIPP, maka menunjukkan bahwa gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya sangat memerlukan sebuah sistem proteksi petir.

4.1.3. Penentuan Efisiensi Sistem Proteksi Petir

Penentuan efisiensi suatu sistem proteksi sangat dipengaruhi oleh perhitungan kerapatan sambaran petir (N_g), luas daerah proteksi efektif (A_e), dan kerapatan sambaran petir tahunan (N_d).

(a) Perhitungan kerapatan sambaran petir (N_g)

Kerapatan sambaran petir pada lokasi pembangunan gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis (N_g) dapat diestimasi dengan cara menghitung jumlah sambaran petir pada wilayah tersebut. Kerapatan sambaran petir dapat dihitung pula menggunakan data hari guruh sesuai persamaan (2-2).

$$N_g = 0,04T_d^{1,25}$$

Dengan T_d sebesar 93 hari pada tahun 2011, maka

$$N_g = 0,04 \cdot 93^{1,25}$$

$$N_g = 11,5522 \text{ sambaran / km}^2 \text{ / tahun}$$

(b) Perhitungan luas daerah proteksi efektif (A_e)

Perhitungan selanjutnya adalah luas daerah proteksi efektif pada gedung (A_e). A_e merupakan luas permukaan tanah yang dianggap sebagai bangunan gedung yang mempunyai frekuensi sambaran petir langsung tahunan. Gedung

utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis termasuk gedung yang berbentuk kompleks. Nilai $A_{e\max}$ dan $A_{e\min}$ gedung dapat dihitung melalui persamaan (2-13).

$$A_e = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2$$

Dengan:

$$\text{Panjang gedung (a)} = 58,24 \text{ meter};$$

$$\text{Lebar gedung (b)} = 56,72 \text{ meter};$$

$$\text{Tinggi maksimum (h}_{\max}) = 76,43 \text{ meter, sehingga diperoleh}$$

$$A_{e\max} = 58,24 \cdot 56,72 + 6 \cdot 76,43(58,24 + 56,72) + 9\pi 76,43^2$$

$$A_{e\max} = 221254 \text{ m}^2$$

Sedangkan jika nilai $h_{\min}=31,6$ meter, maka diperoleh

$$A_{e\min} = 58,24 \cdot 56,72 + 6 \cdot 31,6(58,24 + 56,72) + 9\pi 31,6^2$$

$$A_{e\min} = 53344 \text{ m}^2$$

Gedung ini memiliki selisih nilai $A_{e\min}$ dan $A_{e\max}$ yang cukup besar seperti ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Nilai $A_{e\max}$ dan $A_{e\min}$ Gedung

Parameter	Nilai A_e maksimum (m^2)	Nilai A_e minimum (m^2)
Dimensi Gedung (a,b,h)	221254	53344

Sumber: Hasil Perhitungan

Maka sesuai persamaan (2-14) didapatkan luas ekuivalen rata-rata sebagai berikut

$$A_e' = 9\pi(H_p)^2$$

Dengan $H_p = H_{\max} = 76,43$ meter, maka

$$A_e' = 9\pi(76,43)^2$$

$$A_e' = 165232 \text{ m}^2$$

(c) Perhitungan Efisiensi Sistem Proteksi Petir

Perhitungan terperinci sesuai dengan standar IEC 62305-4, pemilihan tingkat proteksi yang memadai untuk suatu sistem proteksi petir didasarkan pada kerapatan sambaran petir ke tanah rata-rata tahunan di lokasi pembangunan gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya yang dinyatakan dengan persamaan (2-12)

$$N_d = N_g \cdot A_e' \cdot C_d \cdot 10^{-6}$$

$$N_d = 11,5522 \cdot 165232 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6}$$

$$N_d = 0,954396 \text{ sambaran / km}^2 \text{ / tahun}$$

Dari data Stasiun Meteorologi dan Geofisika Kota Malang diperoleh nilai frekuensi sambaran petir tahunan setempat (N_c) yang diperbolehkan sebesar 10^{-1} sambaran/km²/tahun. Karena nilai N_d lebih besar daripada nilai N_c maka gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis memerlukan sebuah sistem proteksi petir yang sesuai dengan kondisi bangunan. Efisiensi dari suatu sistem proteksi petir pada gedung dapat ditentukan menggunakan persamaan (2-15).

$$E \geq 1 - N_c/N_d$$

$$E \geq 1 - 10^{-1}/0,954396$$

$$E \geq 0,8952$$

Berdasarkan standar IEC 62305-3, nilai efisiensi sistem proteksi berkaitan dengan tingkat proteksi yang digunakan pada gedung tersebut. Sesuai dengan Tabel 2.6 maka tingkat proteksi minimal yang dibutuhkan oleh gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya adalah tingkat III dengan efisiensi sebesar 0,91 atau 91%. Artinya sistem ini akan memproteksi 91% dari keseluruhan sambaran petir ke tanah pada gedung tersebut, sedangkan 9% sisanya merupakan resiko gedung tersambar petir melewati sistem proteksi yang terpasang.

4.2. Perancangan Sistem Proteksi Menggunakan Metode Bola Gelinding

Metode bola gelinding (*rolling sphere method*) merupakan suatu metode yang prinsipnya adalah menggelindingkan suatu bola dengan jari-jari tertentu pada gedung untuk mengetahui titik sambaran dan daerah lindung yang terbentuk pada gedung tersebut. Perancangan sistem proteksi menggunakan metode bola gelinding meliputi perhitungan jarak sambar dan daerah lindung yang terbentuk pada gedung.

4.2.1. Perhitungan Jarak Sambar Petir

Besarnya jarak sambar petir pada gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis dinyatakan dalam persamaan (2-16)

$$h_B = 2I_m + 30 \left(1 - e^{-\frac{I_m}{6,8}} \right)$$

Dengan nilai arus puncak petir yang harus diperhatikan sesuai dengan tingkat proteksi pada Tabel 2.7 yang telah ditentukan adalah 10 kA. Sehingga,

$$h_B = 2 \times 10 + 30 \left(1 - e^{-\frac{10}{6,8}} \right)$$

$$h_B = 43,1063 \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan didapatkan nilai jarak sambar sebesar 43,1 meter, maka nilai jari-jari bola gelindingnya pun sebesar 43,1 meter. Semakin kecil jari-jari bola maka akan semakin kecil pula arus petir yang diperhatikan untuk dapat menyambar gedung. Maka dilakukan penyesuaian nilai jari-jari bola dari hasil perhitungan dengan nilai yang tercantum pada Tabel 2.8. Sehingga untuk kepentingan perhitungan selanjutnya, digunakan jari-jari bola sebesar 45 meter untuk mengetahui daerah lindung dan titik sambaran petir pada gedung.

4.2.2. Daerah Lindung yang Terbentuk Pada Gedung

Bagian gedung yang tersentuh bola merupakan tempat terjadinya sambaran petir, sedangkan bagian yang tidak tersentuh bola merupakan daerah lindung. Daerah lindung ditentukan oleh jarak sambar yang terkait dengan nilai puncak arus petir. Metode bola gelinding yang diterapkan pada gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya dengan jari-jari bola sebesar 45 meter, dapat digambarkan dalam bentuk 2 dimensi seperti pada Gambar 4.1 sampai Gambar 4.4.

Gambar 4.1 memperlihatkan tampak depan gedung dengan bola berjari-jari 45 meter yang digelinding di sepanjang gedung. Bola yang digelindingkan akan membentuk daerah yang terproteksi dan daerah-daerah yang tidak terproteksi. Daerah yang terproteksi ditunjukkan dengan arsiran. Sedangkan titik-titik terjadinya sambaran dinotasikan dengan angka, yakni 1, 2, dan 3.

Bila terdapat ujung lidah petir yang menyentuh batas permukaan C maka akan terjadi sambaran petir menuju bagian kerangka besi pada atap gedung. Jika lidah petir menyentuh batas permukaan A, B, D, dan E maka akan terjadi sambaran petir menuju bagian tepi atap gedung. Selanjutnya, jika terdapat ujung lidah petir yang mendekati perpotongan permukaan A dan B, B dan C, C dan D,

serta D dan E maka sambaran akan terjadi pada objek terdekat dari ujung lidah petir tersebut, sambaran terjauh tidak akan melebihi jarak sambar petir itu sendiri. Tetapi hal ini memiliki probabilitas yang kecil untuk dapat terjadi.

Gambar 4.2 adalah gambar yang memperlihatkan tampak samping kiri gedung dengan boala berjari-jari 45 meter yang digelindingkan di sepanjang gedung. Bola yang digelindingkan akan membentuk daerah yang terproteksi dan daerah-daerah yang tidak terproteksi. Titik-titik terjadinya sambaran dinotasikan dengan angka, yakni 1, 2, 3, 4, dan 5.

Bila terdapat ujung lidah petir yang menyentuh batas permukaan C maka akan terjadi sambaran petir menuju bagian kerangka besi pada atap gedung. Jika lidah petir menyentuh batas permukaan A, B, dan D maka akan terjadi sambaran petir menuju bagian tepi atap gedung. Jika terdapat ujung lidah petir yang menyentuh batas permukaan E maka akan terjadi sambaran petir pada bagian sisi gedung. Selanjutnya, jika terdapat ujung lidah petir yang mendekati perpotongan permukaan A dan B, B dan C, C dan D, serta D dan E maka sambaran akan terjadi pada objek terdekat dari ujung lidah petir tersebut, sambaran terjauh tidak akan melebihi jarak sambar petir itu sendiri. Tetapi hal ini memiliki probabilitas yang kecil untuk dapat terjadi. Penjelasan untuk Gambar 4.3 dan 4.4 pada dasarnya adalah sama seperti penjelasan Gambar 4.1 dan 4.2.

4.3. Perancangan Sistem Terminasi Udara

Fungsi utama dari sistem terminasi udara pada suatu sistem proteksi petir adalah untuk mencegah sambaran petir langsung dapat merusak gedung yang diproteksi. Dengan pemilihan dimensi sistem terminasi udara yang tepat, maka efek dari sambaran petir langsung dapat dikurangi. Perancangan sistem terminasi udara meliputi penentuan tata letak dan pemilihan bahan terminasi udara tegak (batang *finial*).

4.3.1. Tata Letak Terminasi Udara Tegak (*Finial*)

Bagian-bagian gedung yang dapat tersambar petir harus dilindungi oleh sistem terminasi udara yang merupakan komponen penting dalam sistem proteksi petir yang berfungsi untuk menangkap petir dan menyalurkannya melalui penghantar penyalur.

Mengacu pada Gambar 4.1 sampai Gambar 4.4 beserta penjelasannya maka beberapa batang terminasi udara atau *finial* harus diletakkan pada titik-titik terjadinya sambaran petir ke gedung. Letak batang *finial* yang tepat untuk melindungi gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis dari sambaran petir langsung ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6. Terlihat pada gambar bahwa gedung membutuhkan 6 batang *finial*.

Setelah dilakukan pemasangan sistem terminasi udara pada titik-titik yang telah dijelaskan sebelumnya, maka ketika terdapat ujung lidah petir yang mengenai batas permukaan sambaran, maka akan langsung diterima oleh sistem terminasi udara, tanpa merusak gedung. Sesuai dengan tingkat proteksi yang telah ditentukan sebelumnya, sistem terminasi udara ini akan menangkap 91% seluruh sambaran petir.

4.3.2. Pemilihan Bahan Terminasi Udara Tegak (*Finial*)

Untuk pemilihan bahan dan dimensi sebuah sistem terminasi udara maka digunakan perhitungan umum sebagai berikut:

(a) Volume Pelelehan

Finial merupakan komponen proteksi petir eksternal yang berfungsi menangkap petir. Dalam setiap sambarannya petir membawa energi yang cukup besar sehingga dapat melelehkan bagian *finial* yang tersambar. Besarnya nilai energi petir ini dipengaruhi oleh nilai batas muatan yang didapatkan melalui perhitungan dari persamaan 2-4 dan 2-5.

Dari persamaan mengenai gelombang arus petir yaitu

$$i(t) = A_I \cdot I_m (e^{-at} - e^{-bt}) \cdot 10^{-6}$$

Dan persamaan besarnya muatan arus petir,

$$Q = \int_0^{\infty} i(t) dt$$

Sehingga

$$Q = \int_0^{\infty} (A_I \cdot I_m (e^{-at} - e^{-bt}) \cdot 10^{-6}) dt$$

Dengan:

$$\text{Konstanta } A_I = 1,0244 ;$$

$$\text{Arus puncak petir } (I_m) = 100 \text{ kA};$$

$$\text{Konstanta } a = 0,00204 ;$$

$$\text{Konstanta } b = 0,5632 \text{ maka}$$

$$Q = \int_0^{\infty} 1,0244 \cdot 100 \cdot 10^{-3} (e^{-0,00204t} - e^{-0,5632t}) \cdot 10^{-6} dt$$

$$Q = 1,0244 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \left[\frac{1}{-0,00204} e^{-0,00204t} - \frac{1}{-0,5632} e^{-0,5632t} \right]_0^{\infty}$$

$$Q = 1,0244 \cdot 100 \cdot 10^{-3}$$

$$\left[\left(\frac{1}{-0,00204} e^{\infty} - \frac{1}{-0,5632} e^{\infty} \right) - \left(\frac{1}{-0,00204} e^0 - \frac{1}{-0,5632} e^0 \right) \right]$$

$$Q = 1,0244 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{0,00204} - \frac{1}{0,5632} \right)$$

$$Q = 50,0338 \text{ As}$$

Nilai tegangan kontak ($U_{A,k}$) bekisar antara puluhan vol, jika ditentukan besarnya $U_{A,k}$ adalah 30 V, sehingga berdasarkan persamaan 2-7 didapatkan nilai energi busur listrik (W) sebesar

$$W = Q \cdot U_{A,k}$$

$$W = 50,0338 \cdot 30$$

$$W = 1501,014 \text{ joule}$$

Bahan *finial* yang digunakan dalam perhitungan ini berupa aluminium, baja, dan tembaga, dengan parameter yang tercantum pada Tabel 2.7. Berikut ini merupakan perhitungan volume pelelehan yang terjadi akibat sambaran petir pada bahan-bahan yang telah ditentukan.

– Bahan Aluminium

Perhitungan volume pelelehan untuk bahan Aluminium menggunakan persamaan 2-6,

$$Vol = \frac{W}{\gamma c_w \theta + c_s}$$

Dengan:

$$\text{Kerapatan massa } (\gamma) = 2700 \text{ kg/m}^3;$$

$$\text{Temperatur leleh } (\theta) = 658 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\text{Panas leleh spesifik } (c_s) = 356 \cdot 10^3 \text{ J/kg dan}$$

$$\text{Kapasitas panas spesifik } (c_w) = 908 \text{ J/kg} \cdot \text{K. Sehingga:}$$

$$Vol = \frac{1501,014}{2700} \times \frac{1}{908 \times 658 + 356 \cdot 10^3}$$

$$Vol = 5,83 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$Vol = 0,583 \text{ cm}^3$$

– Bahan Besi

Perhitungan volume pelelehan untuk bahan besi menggunakan persamaan 2-6,

$$Vol = \frac{W}{\gamma} \frac{1}{c_w \theta + c_s}$$

Dengan:

$$\text{Kerapatan massa } (\gamma) = 7700 \text{ kg/m}^3;$$

$$\text{Temperatur leleh } (\theta) = 1350 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\text{Panas leleh spesifik } (c_s) = 272 \cdot 10^3 \text{ J/kg dan}$$

$$\text{Kapasitas panas spesifik } (c_w) = 469 \text{ J/kg} \cdot \text{K, sehingga:}$$

$$Vol = \frac{1501,014}{7700} \times \frac{1}{469 \times 1350 + 272 \cdot 10^3}$$

$$Vol = 2,1536 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$Vol = 0,2154 \text{ cm}^3$$

– Bahan Tembaga

Perhitungan volume pelelehan untuk bahan besi menggunakan persamaan 2-6,

$$Vol = \frac{W}{\gamma} \frac{1}{c_w \theta + c_s}$$

Dengan:

$$\text{Kerapatan massa } (\gamma) = 8920 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Temperatur leleh } (\theta) = 1080 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\text{Panas leleh spesifik } (c_s) = 209 \cdot 10^3 \text{ J/kg dan}$$

$$\text{Kapasitas panas spesifik } (c_w) = 385 \text{ J/kg} \cdot \text{K, sehingga}$$

$$Vol = \frac{1501,014}{8920} \times \frac{1}{385 \times 1080 + 209 \cdot 10^3}$$

$$Vol = 2,6933 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$Vol = 0,2693 \text{ cm}^3$$

Perhitungan di atas, dapat dirangkum dalam Tabel 4.3

Tabel 4.3 Parameter dan Volume Pelelehan dari Material Logam Batang *Finial*

Besaran	Alumunium	Besi	Tembaga
γ (kg/m ³)	2700	7700	8920
θ (°C)	658	1350	1080
c_s (J/kg)	$356 \cdot 10^3$	$272 \cdot 10^3$	$209 \cdot 10^3$
C_w (J/kg·K)	908	469	385
Volume Pelelehan (cm ³)	0,583	0,2154	0,2693

Sumber : Hasil Perhitungan

Menurut PUIPP tinggi minimal dari batang *finial* adalah sebesar 0,3 meter. Dengan mempertimbangkan sisi estetika gedung, maka penggunaan batang *finial* yang disarankan sepanjang 1 meter. Dengan menggunakan batang *finial* minimal sepanjang 1 meter ini, gedung sudah cukup terlindungi dari bahaya sambaran petir. Hampir seluruh bagian gedung tidak tersentuh oleh bola gelinding, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 sebelumnya. Semakin panjang batang *finial* yang dipasang maka gedung semakin terlindungi dari bahaya sambaran petir. Dimensi minimal yang lebih terperinci untuk batang *finial* tidak ditentukan oleh tingkat proteksi yang digunakan, oleh karena itu dimensi minimum ini telah dtentukan IEC 62305-3 yang terdapat pada lampiran 4, Tabel L4.

Sedangkan mengenai pemilihan bahan material penyusun batang *finial*, masing-masing bahan memiliki keunggulan dan kelemahannya tersendiri. Dari Tabel 4.3 terlihat bahwa besi memiliki volume pelelehan paling kecil dan temperatur lebur yang paling tinggi dibandingkan dengan kedua logam material batang *finial* lainnya.

4.4. Perancangan Sistem Penghantar Penyalur

Fungsi utama dari sistem penghantar penyalur adalah untuk menyalurkan arus petir yang ditangkap oleh sistem terminasi udara ke sistem pembumian tanpa menyebabkan kerusakan pada bangunan. Perancangan sistem penghantar peyalur meliputi tata letak dan pemilihan bahan sistem penghantar penyalur.

4.4.1. Tata Letak Penghantar Penyalur (*Down Conductor*)

Tata letak penghantar penyalur ini berdasarkan jumlah penghantar yang akan digunakan. Menurut persyaratan yang ditetapkan oleh Departemen Pekerjaan Umum (DPMB) bahwa setiap bangunan setidaknya harus memiliki dua buah penghantar penyalur. Untuk bangunan dengan lebar lebih dari 12 meter diperlukan 4 buah penghantar penyalur, dan jika panjang bangunan melebihi 20 meter diperlukan lagi tambahan sebuah penghantar setiap 20 meter berikutnya. Sehingga, dengan lebar gedung mencapai 56,72 meter, gedung membutuhkan sebanyak 6 penghantar penyalur.

Menurut IEC 62305-3, jumlah penghantar penyalur bergantung pada keliling sisi luar gedung yang diproteksi. Penyusunan penghantar harus dilakukan sedemikian rupa sehingga arus dapat terdistribusi secara seragam pada tiap salurannya. Berdasarkan Tabel 2.9 maka jarak antar penghantar untuk sistem proteksi tingkat tiga adalah sebesar 15 meter. Oleh karena itu gedung membutuhkan setidaknya 8 penghantar penyalur

Jumlah penghantar penyalur dapat dikurangi secara signifikan dengan mempertimbangkan dimensi gedung yang tidak terlalu luas. Konfigurasi pemasangan sistem penghantar penyalur terdiri dari 3 buah penghantar yang di pasang pada sisi luar gedung sehingga terbentuk susunan simetris berbentuk segitiga . Bentuk yang simetris ini dapat mereduksi pengaruh medan elektromagnetik pada gedung ketika sambaran petir terjadi.

Pada Gambar 4.8 ditunjukkan letak penghantar penyalur pada gambar gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya tampak depan. Semakin sedikit sedikit penghantar yang digunakan maka akan semakin mengurangi biaya dari pemasangan sistem penghantar penyalur.

Tabel 4.4 Jumlah Penghantar Penyalur

Teori / Standar	Jumlah
Menurut DPMB	6
Menurut IEC 62305-3	8
Hasil Analisis	3

Sumber : Hasil Analisis

Jumlah penghantar penyalur yang digunakan juga mempengaruhi berapa jumlah arus yang disalurkan pada masing-masing konduktor. Sesuai dengan persamaan arus terusan pada gelombang berjalan persamaan (2-18)

$$i_t = 2 \left(1 - \frac{1}{n} \right) \cdot i_i$$

Dengan n merupakan jumlah penghantar penyalur dan i_i merupakan arus petir yang diterima maka,

- 3 penghantar penyalur

$$i_t = 2 \left(1 - \frac{1}{3} \right) \cdot 100$$

$$i_t = 133 \text{ kA} \approx 44,33 \text{ kA (tiap penghantar)}$$

Sehingga untuk ketiga buah penghantar mengalir arus sebesar 44,33 kA.

- 6 penghantar penyalur

$$i_t = 2 \left(1 - \frac{1}{6} \right) \cdot 100$$

$$i_t = 166 \text{ kA} \approx 27,67 \text{ kA (tiap penghantar)}$$

- 8 penghantar penyalur

$$i_t = 2 \left(1 - \frac{1}{8} \right) \cdot 100$$

$$i_t = 175 \text{ kA} \approx 21,88 \text{ kA (tiap penghantar)}$$

4.4.2. Pemilihan Bahan Penghantar Penyalur (*Down Conductor*)

Bahan yang dapat digunakan sebagai penghantar adalah aluminium, besi, dan tembaga. Dari ketiga jenis penghantar tersebut, kemudian akan dilakukan perhitungan luas penampang minimum dengan kenaikan temperatur maksimal 100 K, perhitungan kenaikan temperatur dan perhitungan kenaikan tegangan pada penghantar. Dari ketiga perhitungan tersebut, bahan dengan nilai perhitungan terkecil merupakan bahan terbaik untuk pemilihan bahan penghantar penyalur.

Harga $\int i^2 dt$ sangat mempengaruhi pemanasan pada penghantar yang dilalui arus listrik. Besarnya harga $\int i^2 dt$ ditentukan melalui perhitungan berikut:

$$\int_0^{\infty} i^2 dt = \int_0^{\infty} (A_I \cdot I_m (e^{-at} - e^{-bt}) \cdot 10^{-6})^2 dt$$

$$\int_0^{\infty} i^2 dt = \int_0^{\infty} (A_I^2 \cdot I_m^2 (e^{-at} - e^{-bt})^2 (10^{-6})^2 dt$$

$$\int_0^{\infty} i^2 dt = \int_0^{\infty} (A_I^2 \cdot I_m^2 (e^{-2at} - 2e^{-(a+b)t} + e^{-2bt}) (10^{-6})^2 dt$$

$$\int_0^{\infty} i^2 dt = A_I^2 \cdot I_m^2 (10^{-6})^2 \left[\frac{1}{-2a} e^{-2at} - \frac{2}{-(a+b)} e^{-(a+b)t} + \frac{1}{-2b} e^{-2bt} \right]_0^{\infty}$$

Dengan nilai $A_I = 1,0244$; $I_m = 100 \text{ kA}$; $a = 0,00204$; dan $b = 0,5632$, maka

$$\int_0^{\infty} i^2 dt = 1,0244^2 \cdot (100 \cdot 10^3)^2 (10^{-6})^2$$

$$\cdot \left[\frac{1}{-2 \cdot 0,00204} e^{-2 \cdot 0,00204t} - \frac{2}{-(0,00204 + 0,5632)} e^{-(0,00204 + 0,5632)t} + \frac{1}{-2 \cdot 0,5632} e^{-2 \cdot 0,5632t} \right]_0^{\infty}$$

$$\int_0^{\infty} i^2 dt = 1,0244^2$$

$$\cdot (100 \cdot 10^3)^2 (10^{-6})^2 \left[- \left(\frac{1}{-0,00408} e^0 + \frac{2}{0,56524} e^0 - \frac{1}{1,1264} e^0 \right) \right]$$

$$\int_0^{\infty} i^2 dt = 2,4165 \cdot 10^{-6} \text{ A}^2\text{s}$$

Hasil dari perhitungan di atas sesuai dengan Tabel 2.3 untuk tingkat proteksi normal. Jika digunakan arus puncak petir (I_m) sesuai dengan besarnya arus yang diterima setiap penghantar pada sistem penghantar penyalur dengan 3 penghantar, maka didapatkan perhitungan sebagai berikut:

$$\int_0^{\infty} i^2 dt = 1,0244^2 \cdot (44,33 \cdot 10^3)^2 (10^{-6})^2 \cdot \left[\frac{1}{-2 \cdot 0,00204} e^{-2 \cdot 0,00204t} - \frac{2}{-(0,00204 + 0,5632)} e^{-(0,00204 + 0,5632)t} + \frac{1}{-2 \cdot 0,5632} e^{-2 \cdot 0,5632t} \right]_0^{\infty}$$

$$\int_0^{\infty} i^2 dt = 1,0244^2 \cdot (44,33 \cdot 10^3)^2 (10^{-6})^2 \left[-\left(\frac{1}{-0,00408} e^0 + \frac{2}{0,56524} e^0 - \frac{1}{1,1264} e^0 \right) \right]$$

$$\int_0^{\infty} i^2 dt = 0,9603 \cdot 10^{-6} \text{ A}^2\text{s}$$

Pemilihan bahan penyusun sistem penghantar penyalur dapat dilakukan berdasarkan perhitungan luas penampang, kenaikan temperatur dan perhitungan kenaikan tegangan sebagai berikut:

(a) Perhitungan Luas Penampang Penghantar

Luas penampang penghantar dapat dihitung melalui penurunan persamaan 2-19 dengan batas kenaikan temperatur yang diijinkan (θ) sebesar 100 K.

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\exp(\int i^2 dt \alpha \rho)}{q^2 \gamma c_w} - 1 \right]$$

$$q = \sqrt{\left[\frac{\int i^2 dt \alpha \rho}{\gamma c_w} \cdot \frac{1}{\ln(\theta \alpha + 1)} \right]}$$

Besarnya luas penampang untuk masing-masing bahan penghantar, didapatkan melalui perhitungan berikut:

- Bahan Alumunium

Koefisien temperatur dari tahanan (α) = $4 \cdot 10^{-3}$ 1/K;

Resistivitas spesifik (ρ) = $2,9 \cdot 10^{-8}$ Ωm ;

Kerapatan massa (γ) = 2700 kg/m^3 , dan

Energi panas spesifik (c_w) = $908 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, sehingga

$$q = \sqrt{\left[\frac{2,4165 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{2700 \cdot 908} \cdot \frac{1}{\ln(100 \cdot 4 \cdot 10^{-3} + 1)} \right]}$$

$$q = 1,8434 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$q = 18,4340 \text{ mm}^2$$

Luas penampang minimum alumunium dengan batas kenaikan temperatur sebesar 100 K adalah $18,4340 \text{ mm}^2$. Semakin besar luas penampangnya,

maka akan semakin kecil kenaikan temperatur yang terjadi pada penghantar tersebut.

– Bahan Besi

$$\text{Koefisien temperatur dari tahanan } (\alpha) = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K;}$$

$$\text{Resistivitas spesifik } (\rho) = 12 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m;}$$

$$\text{Kerapatan massa } (\gamma) = 7700 \text{ kg/m}^3, \text{ dan}$$

$$\text{Energi panas spesifik } (c_w) = 469 \text{ J/kg}\cdot\text{K, sehingga}$$

$$q = \sqrt{\left[\frac{2,4165 \cdot 10^6 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3}}{7700 \cdot 469} \cdot \frac{1}{\ln(100 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} + 1)} \right]}$$

$$q = 3,2284 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$q = 32,2840 \text{ mm}^2$$

Luas penampang minimum besi dengan batas kenaikan temperatur sebesar 100 K adalah 32,2840 mm². Semakin besar luas penampangnya, maka akan semakin kecil kenaikan temperatur yang terjadi pada penghantar tersebut.

– Bahan Tembaga

$$\text{Koefisien temperatur dari tahanan } (\alpha) = 3,92 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K;}$$

$$\text{Resistivitas spesifik } (\rho) = 1,78 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m;}$$

$$\text{Kerapatan massa } (\gamma) = 8920 \text{ kg/m}^3, \text{ dan}$$

$$\text{Energi panas spesifik } (c_w) = 385 \text{ J/kg}\cdot\text{K, sehingga}$$

$$q = \sqrt{\left[\frac{2,4165 \cdot 10^6 \cdot 3,92 \cdot 10^{-3}}{8920 \cdot 385} \cdot \frac{1}{\ln(100 \cdot 3,92 \cdot 10^{-3} + 1)} \right]}$$

$$q = 1,2184 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$q = 12,1840 \text{ mm}^2$$

Luas penampang minimum tembaga dengan batas kenaikan temperatur sebesar 100 K adalah 12,1840 mm². Semakin besar luas penampangnya, maka akan semakin kecil kenaikan temperatur yang terjadi pada penghantar tersebut.

(b) Perhitungan Kenaikan Temperatur

Kenaikan temperatur dapat dihitung melalui persamaan 2-19 dengan luas penampang sesuai dengan SNI, yaitu 50 mm². Dengan arus puncak petir (I_m) 100 kA, sehingga

- Bahan Aluminium

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\int i^2 dt \alpha \rho}{q^2 \gamma c_w} - 1 \right]$$

Dengan:

Koefisien temperatur dari tahanan (α) = $4 \cdot 10^{-3}$ 1/K;

Resistivitas spesifik (ρ) = $2,9 \cdot 10^{-8}$ Ω m;

Kerapatan massa (γ) = 2700 kg/m³, dan

Energi panas spesifik (c_w) = 908 J/kg·K, sehingga:

$$\theta_{Al} = \frac{1}{4 \cdot 10^{-3}} \left[\exp \left(\frac{2,4165 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 2,9 \cdot 10^{-8}}{(50 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2700 \cdot 908} \right) - 1 \right]$$

$$\theta_{Al} = 11,6994 \text{ K}$$

- Bahan Besi

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\int i^2 dt \alpha \rho}{q^2 \gamma c_w} - 1 \right]$$

Dengan:

Koefisien temperatur dari tahanan (α) = $6,5 \cdot 10^{-3}$ 1/K;

Resistivitas spesifik (ρ) = $12 \cdot 10^{-8}$ Ω m;

Kerapatan massa (γ) = 7700 kg/m³, dan

Energi panas spesifik (c_w) = 469 J/kg·K, sehingga

$$\theta = \frac{1}{6,5 \cdot 10^{-3}} \left[\exp \left(\frac{2,4165 \cdot 10^6 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^{-8}}{(50 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 7700 \cdot 469} \right) - 1 \right]$$

$$\theta = 35,7181 \text{ K}$$

- Bahan Tembaga

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\int i^2 dt \alpha \rho}{q^2 \gamma c_w} - 1 \right]$$

Dengan:

- Koefisien temperatur dari tahanan (α) = $3,92 \cdot 10^{-3}$ 1/K;
- Resistivitas spesifik (ρ) = $1,78 \cdot 10^{-8}$ Ω m;
- Kerapatan massa (γ) = 8920 kg/m³, dan
- Energi panas spesifik (c_w) = 385 J/kg·K, sehingga

$$\theta = \frac{1}{3,92 \cdot 10^{-3}} \left[\exp \left(\frac{2,4165 \cdot 10^6 \cdot 3,92 \cdot 10^{-3} \cdot 1,78 \cdot 10^{-8}}{(50 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 8920 \cdot 385} \right) - 1 \right]$$

$$\theta = 5,0596 \text{ K}$$

Jika dilakukan perhitungan lanjutan dengan menggunakan nilai $\int i^2 dt$ setelah dilakukan analisis gelombang berjalan pada tiap penghantar, maka kenaikan temperatur akan berkurang, seperti yang ditunjukkan pada perhitungan berikut:

- Bahan Aluminium

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\int i^2 dt \alpha \rho}{q^2 \gamma c_w} - 1 \right]$$

Dengan:

- Koefisien temperatur dari tahanan (α) = $4 \cdot 10^{-3}$ 1/K;
- Resistivitas spesifik (ρ) = $2,9 \cdot 10^{-8}$ Ω m;
- Kerapatan massa (γ) = 2700 kg/m³, dan
- Energi panas spesifik (c_w) = 908 J/kg·K, sehingga:

$$\theta_{Al} = \frac{1}{4 \cdot 10^{-3}} \left[\exp \left(\frac{0,9603 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 2,9 \cdot 10^{-8}}{(50 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2700 \cdot 908} \right) - 1 \right]$$

$$\theta_{Al} = 4,5853 \text{ K}$$

- Bahan Besi

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\int i^2 dt \alpha \rho}{q^2 \gamma c_w} - 1 \right]$$

Dengan:

- Koefisien temperatur dari tahanan (α) = $6,5 \cdot 10^{-3}$ 1/K;
- Resistivitas spesifik (ρ) = $12 \cdot 10^{-8}$ Ω m;
- Kerapatan massa (γ) = 7700 kg/m³, dan
- Energi panas spesifik (c_w) = 469 J/kg·K, sehingga

$$\theta = \frac{1}{6,5 \cdot 10^{-3}} \left[\exp \left(\frac{0,9603 \cdot 10^6 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^{-8}}{(50 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 7700 \cdot 469} \right) - 1 \right]$$

$$\theta = 13,3084 \text{ K}$$

– Bahan Tembaga

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\int i^2 dt \alpha \rho}{q^2 \gamma c_w} - 1 \right]$$

Dengan:

$$\text{Koefisien temperatur dari tahanan } (\alpha) = 3,92 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K;}$$

$$\text{Resistivitas spesifik } (\rho) = 1,78 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m;}$$

$$\text{Kerapatan massa } (\gamma) = 8920 \text{ kg/m}^3, \text{ dan}$$

$$\text{Energi panas spesifik } (c_w) = 385 \text{ J/kg}\cdot\text{K, sehingga}$$

$$\theta = \frac{1}{3,92 \cdot 10^{-3}} \left[\exp \left(\frac{0,9603 \cdot 10^6 \cdot 3,92 \cdot 10^{-3} \cdot 1,78 \cdot 10^{-8}}{(50 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 8920 \cdot 385} \right) - 1 \right]$$

$$\theta = 1,9987 \text{ K}$$

Dari hasil di atas, terbukti bahwa dengan menghitung arus yang mengalir pada setiap penghantar menggunakan analisis gelombang berjalan, maka kenaikan temperatur yang terjadi lebih kecil, dibandingkan dengan asumsi bahwa arus petir sepenuhnya tersalurkan dalam 1 penghantar. Kenaikan temperatur yang didapatkan dari hasil perhitungan tidak melampaui nilai batas yang diizinkan pada Tabel 2.11, sehingga system penghantar penyalur pada gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis dapat dipasang langsung pada struktur.

(c) Perhitungan Kenaikan Tegangan

Pertimbangan lain mengenai pemilihan bahan untuk penghantar penyalur adalah nilai kenaikan tegangan. Nilai kenaikan tegangan tergantung dari nilai resistivitas masing-masing bahan dan panjang dari penghantar yang digunakan. Untuk gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis, panjang penghantar terpanjang mencapai 61,6 meter dan yang terpendek 51,6 meter. Sehingga didapatkan perhitungan sebagai berikut:

– Bahan Alumunium

Penentuan kenaikan tegangan pada penghantar penyalur dinyatakan pada persamaan (2-4):

$$U_m = I_m \cdot R$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Dengan:

$$\text{Luas penampang (A)} = 50 \text{ mm}^2;$$

$$\text{Panjang penghantar (l)} = 61,6 \text{ m};$$

$$\text{Resistivitas} = 2,65 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m, maka}$$

$$R_{Al} = 2,65 \cdot 10^{-8} \frac{61,6}{50 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_{Al} = 0,0326 \text{ } \Omega$$

$$U_{mAl} = 100 \cdot 10^3 \cdot 0,0326$$

$$U_{mAl} = 3,2600 \cdot 10^3 \text{ V}$$

$$U_{mAl} = 3,2600 \text{ kV}$$

Sedangkan jika arus yang mengalir pada penghantar merupakan arus terusan (i_t) gelombang berjalan, maka kenaikan tegangan yang terjadi:

$$U_{mAl} = 44,33 \cdot 10^3 \cdot 0,0326$$

$$U_{mAl} = 1,4452 \cdot 10^3 \text{ V}$$

$$U_{mAl} = 1,4452 \text{ kV}$$

– Bahan Besi

Penentuan kenaikan tegangan pada penghantar penyalur dinyatakan pada persamaan (2-4):

$$U_m = I_m \cdot R$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Dengan:

$$\text{Luas penampang (A)} = 50 \text{ mm}^2;$$

$$\text{Panjang penghantar (l)} = 61,6 \text{ m};$$

$$\text{Resistivitas} = 9,71 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m, maka}$$

$$R_{Fe} = 9,71 \cdot 10^{-8} \frac{61,6}{50 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_{Fe} = 0,1196 \text{ } \Omega$$

$$U_{mFe} = 100 \cdot 10^3 \cdot 0,1196$$

$$U_{mFe} = 11,9600 \cdot 10^3 \text{ V}$$

$$U_{mFe} = 11,9600 \text{ kV}$$

Sedangkan jika arus yang mengalir pada penghantar merupakan arus terusan (i_t) gelombang berjalan, maka kenaikan tegangan yang terjadi:

$$U_{mFe} = 44,33 \cdot 10^3 \cdot 0,0326$$

$$U_{mFe} = 1,4452 \cdot 10^3 \text{ V}$$

$$U_{mFe} = 1,4452 \text{ kV}$$

– Bahan Tembaga

Penentuan kenaikan tegangan pada penghantar penyalur dinyatakan pada persamaan (2-4):

Tembaga memiliki nilai resistivitas sebesar $1,68 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$

$$U_m = I_m \cdot R$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Dengan:

$$\text{Luas penampang (A)} = 50 \text{ mm}^2;$$

$$\text{Panjang penghantar (l)} = 61,6 \text{ m};$$

$$\text{Resistivitas} = 1,68 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m, maka}$$

$$R_{Cu} = 1,68 \cdot 10^{-8} \frac{61,6}{50 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_{Cu} = 0,0207 \Omega$$

$$U_{mCu} = 100 \cdot 10^3 \cdot 0,0207$$

$$U_{mCu} = 2,0700 \cdot 10^3 \text{ V}$$

$$U_{mCu} = 2,0700 \text{ kV}$$

Sedangkan jika arus yang mengalir pada penghantar merupakan arus terusan (i_t) gelombang berjalan, maka kenaikan tegangan yang terjadi:

$$U_{mCu} = 44,33 \cdot 10^3 \cdot 0,0207$$

$$U_{mCu} = 0,9176 \cdot 10^3 \text{ V}$$

$$U_{mCu} = 0,9176 \text{ kV}$$

Berdasarkan hasil perbandingan di atas, dibandingkan dengan kedua bahan lainnya tembaga memiliki kenaikan suhu dan kenaikan tegangan yang paling rendah. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Kenaikan Temperatur dan Tegangan

Arus Petir pada penghantar	Besaran	Material Logam		
		Alumunium	Besi	Tembaga
100 kA	Kenaikan Temperatur (K)	11,6994	35,7181	5,0596
	Kenaikan Tegangan (kV)	3,2600	14,7600	2,0700
44,33 kA	Kenaikan Temperatur (K)	4,5853	13,3084	1,9987
	Kenaikan Tegangan (kV)	1,4452	5,3019	0,9176

Sumber : Hasil Perhitungan

4.5. Penentuan Kebutuhan Sistem Pembumian

Sistem pembumian merupakan salah satu komponen penting dalam suatu sistem proteksi eksternal yang berfungsi untuk mengalirkan arus petir ke tanah. Dalam perancangan sistem pembumian yang dapat digunakan pada gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis, maka dibutuhkan pengukuran nilai resistansi pembumian pada lokasi pembangunan.

Sistem pembumian merupakan kelanjutan dari sistem terminasi dan penghantar penyalur untuk menyalurkan arus petir ke tanah. Sangat perlu diingat bahwa sistem pembumian merupakan sistem yang memiliki banyak konfigurasi dalam pengaplikasiannya. Sistem Pembumian harus dihubungkan dengan batang *main equipotential bonding*.

4.5.1. Data Hasil Pengukuran

Pengukuran dilakukan sebanyak dua kali, dengan menggunakan satu batang elektroda dan dua batang elektroda pembumian yang dihubung paralel. Pengukuran resistansi pembumian ini, dilakukan dengan memberikan variasi kedalam penanaman batang elektroda. Tabel 4.6 menunjukkan hasil pengukuran nilai resistansi pembumian pada lokasi gedung akan dibangun.

Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Resistansi Pembumian

Kedalaman (cm)	Resistansi Pembumian (Ω)	
	1 Elektroda	2 Elektroda
10	180	66
20	110	42
30	82	26
40	77	22,5
50	44	18
60	34	14
70	32	12
80	32	10
90	25	8
100	21	7,3

Sumber : Hasil Pengukuran

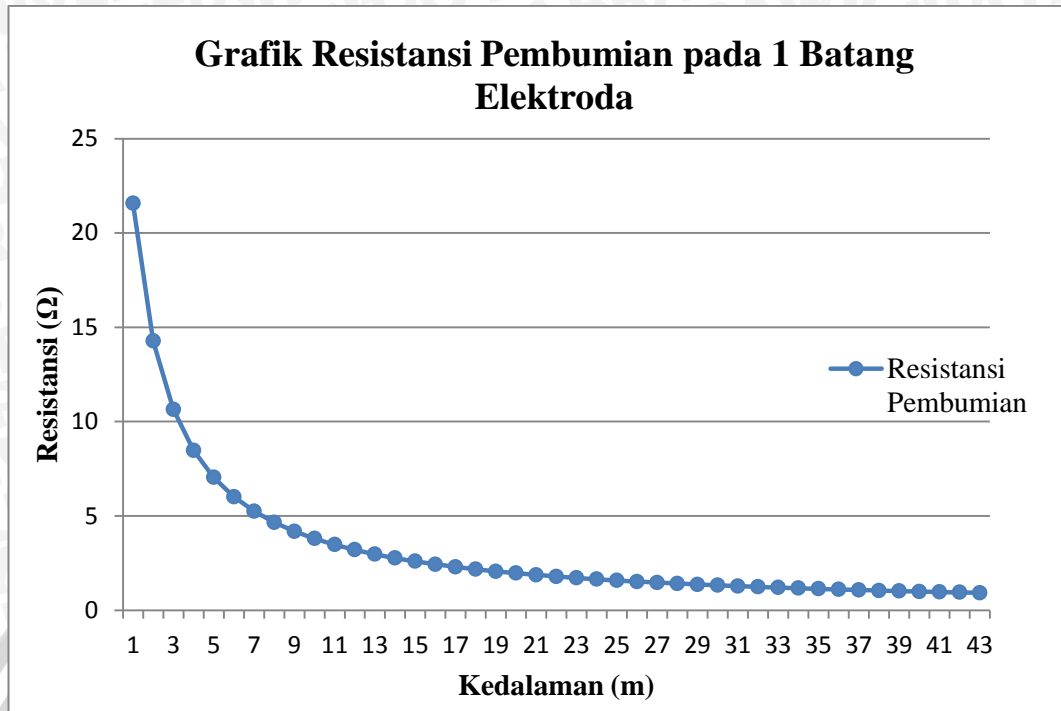
4.5.2. Analisis Data Hasil Pengukuran

Pada Tabel 4.6 diketahui bahwa semakin dalam penanaman batang elektroda, maka nilai resistansi pembumiannya akan semakin kecil. Dengan menggunakan dua batang elektroda yang dihubungkan secara paralel, semakin kecil pula nilai resistansinya. Nilai resistansi pembumian sangat dipengaruhi oleh kedalaman penanaman elektroda tersebut serta jumlah elektroda yang digunakan.

Dari hasil pengukuran di atas, maka akan didapat sebuah tren data yang ditunjukkan dalam sebuah grafik pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9. Pada Gambar 4.10 dengan menggunakan satu batang elektroda, dapat diperoleh nilai tahanan pembumian kurang dari 1 Ω pada kedalaman 20,5 meter. Pada Gambar 4.11 dengan menggunakan dua batang elektroda dapat diperoleh nilai tahanan pembumian kurang dari 1 Ω pada kedalaman 9 meter.

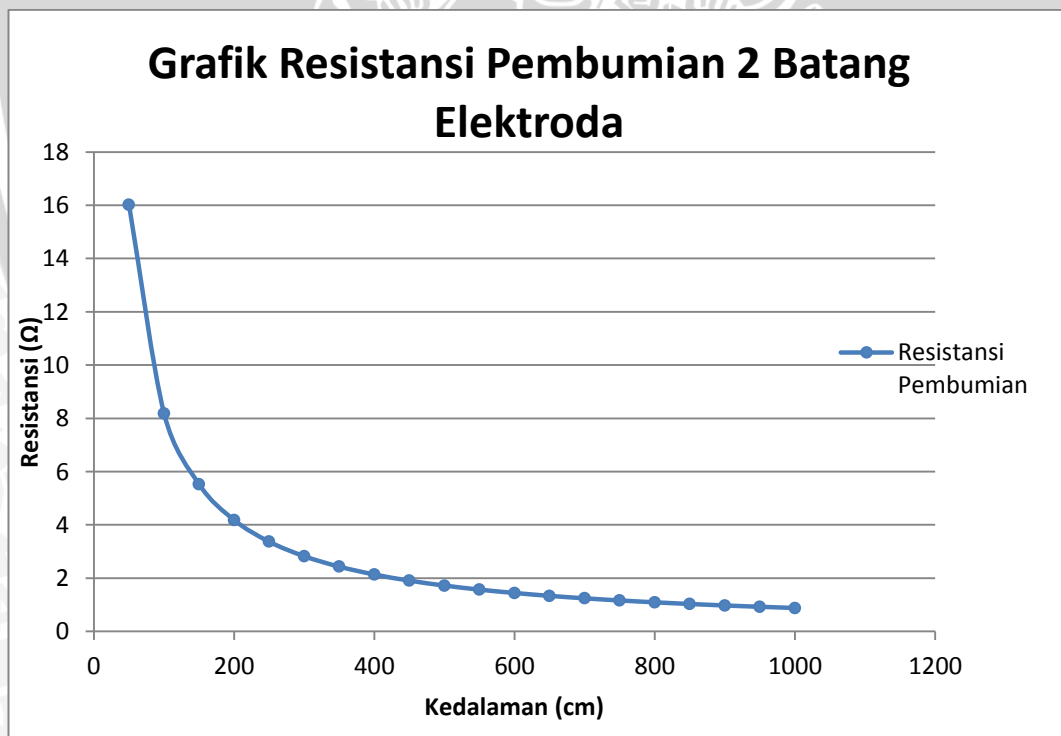
Dari hasil pengukuran juga dapat diketahui nilai resistivitas tanah untuk mengetahui jenis tanah yang terdapat pada lokasi pembangunan. Dengan menggunakan persamaan (2-21) maka:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$$



Gambar 4.8 Grafik Resistansi Pembumian Satu Batang Elektroda

Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 4.9 Grafik Resistansi Pembumian Satu Batang Elektroda

Sumber : Hasil Perhitungan

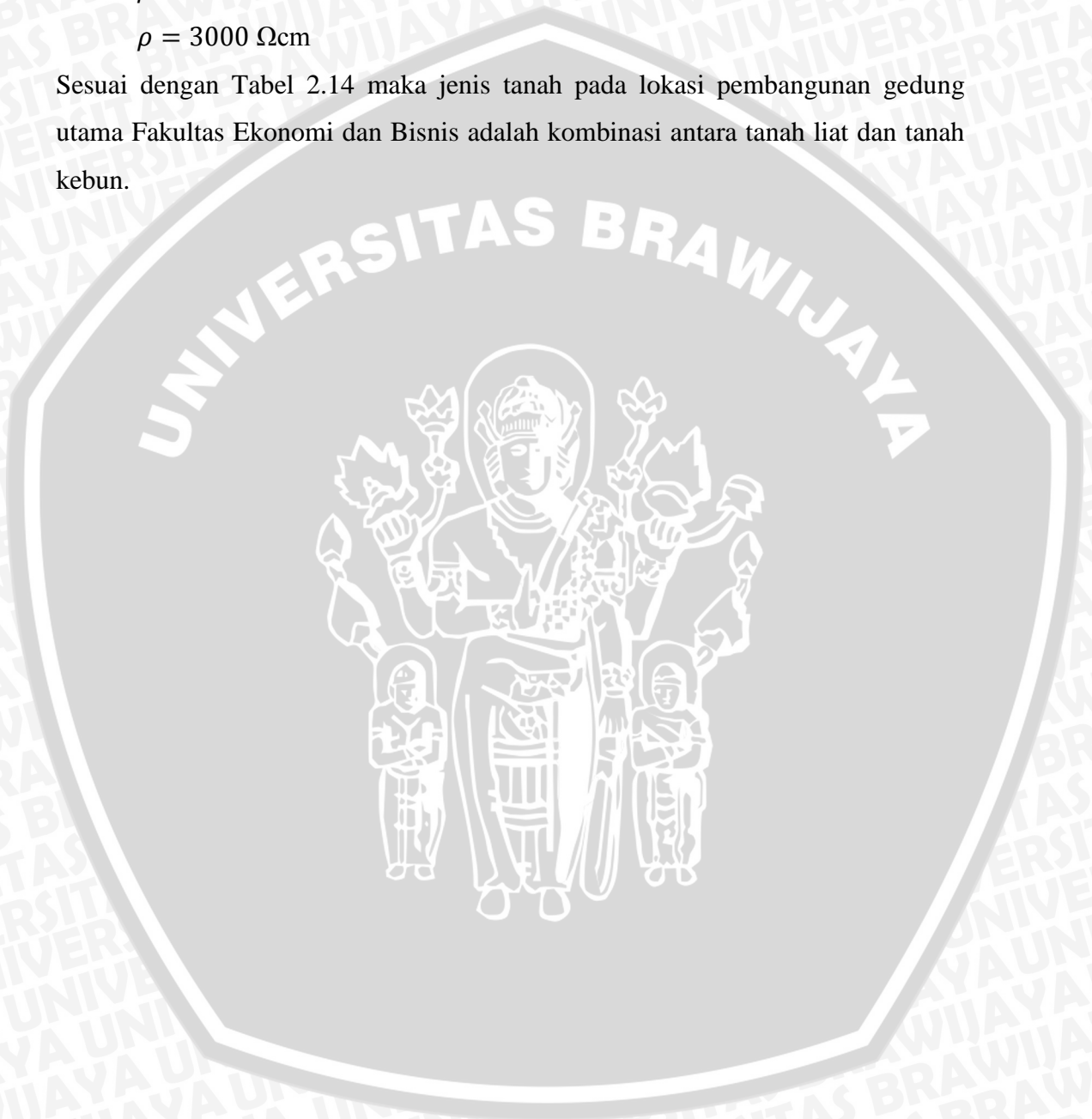
Pada kedalaman 50 cm dengan 1 batang elektroda didapatkan tahanan pembumian sebesar 44Ω , sehingga

$$44 = \frac{\rho}{2\pi \cdot 0,5} \left(\ln \frac{4 \cdot 0,5}{8 \cdot 10^{-3}} - 1 \right)$$

$$\rho = 30 \Omega\text{m}$$

$$\rho = 3000 \Omega\text{cm}$$

Sesuai dengan Tabel 2.14 maka jenis tanah pada lokasi pembangunan gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis adalah kombinasi antara tanah liat dan tanah kebun.



BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

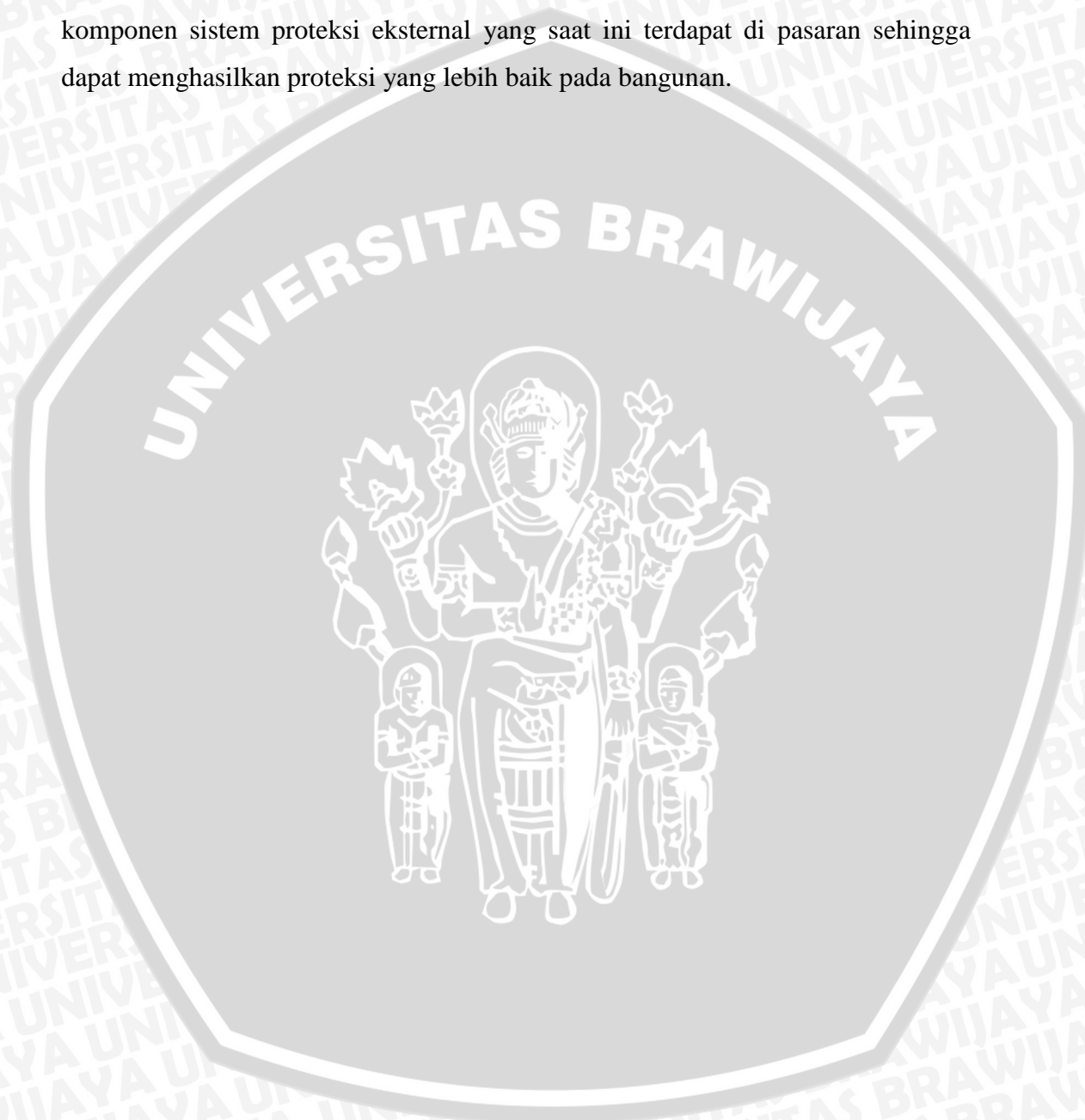
Dari seluruh analisis perancangan sistem proteksi eksternal pada gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya dapat ditarik beberapa kesimpulan. Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah :

1. Tingkat proteksi yang sesuai untuk gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis adalah tingkat proteksi ketiga dengan efisiensi sistem proteksi sebesar 91%.
2. Sistem proteksi ekstenal yang sesuai dengan tingkat proteksi 91% untuk gedung utama Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Brawijaya terdiri dari:
 - Sistem terminasi udara menggunakan 6 buah batang penangkap petir (*finial*) yang diletakkan pada titik-titik tempat terjadinya sambaran. Batang *finial* yang dibutuhkan setinggi 1 meter. Sesuai dengan analisis yang telah dilakukan mengenai material logam sebagai bahan batang *finial*, volume pelelehan paling kecil terjadi pada bahan besi sebesar $0,2154 \text{ cm}^3$.
 - Sistem penghantar penyalur menggunakan 3 buah penghantar. Sesuai dengan analisis, luas penampang terkecil untuk batas kenaikan temperatur 100 K dimiliki oleh tembaga sebesar 12 mm^2 sedangkan sesuai dengan SNI maka luas penampang yang digunakan sebesar 50 mm^2 . Kenaikan temperatur dan tegangan terkecil dimiliki oleh tembaga sebesar 5,3297 K dan 2,07 kV, pada petir sambaran pertama. Sedangkan kenaikan temperatur dan tegangan tembaga sebesar 1,9987 K dan 0,9176 kV, pada arus terusan.
 - Sistem pembumian yang digunakan untuk mendapatkan resistansi pembumian dibawah 1 ohm sesuai dengan jenis tanah pada lokasi pembangunan gedung adalah sistem pembumian dengan 3 batang

elektroda berbahan tembaga dengan diameter 16 mm sedalam 10 meter.

5.2. Saran

Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai berbagai jenis dari komponen-komponen sistem proteksi eksternal yang saat ini terdapat di pasaran sehingga dapat menghasilkan proteksi yang lebih baik pada bangunan.



DAFTAR PUSTAKA

- Anonim 1. 1983. "Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP) untuk Bangunan di Indonesia". Jakarta: Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan.
- Anonim 2. 2004. "Standarisasi Nasional Indonesia Proteksi Bangunan terhadap Petir". Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Anonim 3. 2006. "Parameter Petir". <http://www.telkomrdc-media.com/index.php?ch=8&lang=&n=346>. 26 Juli 2010. Diakses tanggal 20 Februari 2012.
- Anonim 4. 2006. "Gaya dan Medan Magnet". <http://www.phys.itb.ac.id/~khbasar/arsip/FI1201/GayadanMedanMagnet.pdf>. Diakses tanggal 04 Agustus 2012.
- Dehn+Söhne. 2007. "*Lightning Protection Guide*". Germany: Dehn+Söhne.
- Edminister, Joseph A. 1993. "Teori dan Soal-soal Elektromagnetika". Erlangga: Jakarta.
- Golde, R.H. 1981. "*Lightning Volume 2*". London: Academic Press Inc.
- Hadiyanto, Irwan. 2010. "Mengenal Petir 1". <http://information-humanstudy.blogspot.com/2010/10/mengenal-petir-1.html>. 26 Oktober 2010. Diakses tanggal 20 Februari 2012.
- Haidariz. 2011. "Penangkal Petir". <http://ngelmuelektro.wordpress.com/>. 11 April 2011. Diakses tanggal 6 Mei 2012.
- Hasby, Dicky. 2010. "Medan Magnet". <http://pyrotigero.wordpress.com/2010/10/06/medan-magnet/>. 06 Oktober 2010. Diakses tanggal 04 Agustus 2012.
- Hasse,Peter. 1998. "*Overvoltage Protection of Low Voltage System*". United Kingdom: Lightning Source UK Ltd.
- Hosea, E., Iskanto, E., dan Luden, H.M. 2004. "Penerapan Metode jala, Sudut Proteksi dan Bola Bergulir pada Sistem Proteksi Petir Eksternal yang Diaplikasikan pada Gedung W Universitas Kristen Petra". Surabaya.
- Hutauruk, T.S. 1988. "Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja". Jakarta: Erlangga.

- IEC. 1993. “*IEC 1024-1-1: Protection of Structures Against Lightning*”. International Electrotechnical Commission, Switzerland
- IEC. 2006. “*IEC 62305-1: General Principles*”. Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- IEC. 2006. “*IEC 62305-3: Physical Damage to Structure and Life Hazard*”. Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- Syakur, Abdul dan Yuningtyastuti, 2006, “Sistem Proteksi Penangkal Petir pada Gedung Widya Puraya”. Surabaya.
- Tagg, G.F. 1964. “*Earth Resistance*”. London: The Whitefriars Press Ltd.
- Vernon Cooray, 2010. “*Lightning Protection*”. United Kingdom: Athenaeum Press Ltd.
- Zoro, Reynaldo. 2011. “Potensi Petir Sebagai Sumber Energi Baru”. Presentasi disajikan di Universitas Gunadarma tanggal 12 Januari 2011.

