

**ANALISIS PROTEKSI SAMBARAN
PETIR EKSTERNAL MENGGUNAKAN
METODE *COLLECTION VOLUME*
STUDI KASUS GEDUNG FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA**

SKRIPSI

Oleh

YUDI UGAHARI

04 04 03 08 73



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

**ANALISIS PROTEKSI SAMBARAN
PETIR EKSTERNAL MENGGUNAKAN
METODE *COLLECTION VOLUME*
STUDI KASUS GEDUNG FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA**

SKRIPSI

Oleh

YUDI UGAHARI

04 04 03 08 73



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

**ANALISIS PROTEKSI SAMBARAN PETIR EKSTERNAL
MENGUNAKAN METODE *COLLECTION VOLUME*
STUDI KASUS GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS
INDONESIA**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 10 Juli 2008

YUDI UGAHARI

NPM. 04 04 03 08 73

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

**ANALISIS PROTEKSI SAMBARAN PETIR EKSTERNAL
MENGUNAKAN METODE *COLLECTION VOLUME*
STUDI KASUS GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS
INDONESIA**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 3 Juli 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 10 Juli 2008



Dr. Ir. Iwa Garniwa MK, MT

NIP. 131 845 377

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Tak lupa penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

Dr. Ir. Iwa Garniwa MK, M.Eng

Selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberikan saran, bimbingan, pengarahan, dan kemudahan lain dalam penyelesaian skripsi ini. Terima kasih pula kepada kedua orang tua, teman-teman seperjuangan dan rekan-rekan semua yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Depok, 10 Juli 2008
Penulis

Yudi Ugahari
NPM. 0404030873

Yudi Ugahari
NPM 0404030873
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Iwa Garniwa M.K., M.T.

**ANALISIS PROTEKSI SAMBARAN PETIR EKSTERNAL
MENGUNAKAN METODE *COLLECTION VOLUME*
STUDI KASUS GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS
INDONESIA**

ABSTRAK

Petir merupakan suatu fenomena tegangan dan arus tinggi yang terjadi dalam waktu yang amat singkat (impuls). Petir bermula dari ionisasi hingga loncatan muatan dari awan ke tanah atau sebaliknya. Sifat petir yang selalu melepaskan muatan awan ke benda yang terdekat dengan awan yang menyebabkan benda dengan ketinggian yang cukup besar akan memiliki peluang yang besar untuk tersambar. Peristiwa pelepasan muatan tersebut dinamakan sambaran petir.

Dampak dari fenomena yang terjadi dalam hitungan mikrosekon ini dapat berupa kebakaran, kerusakan isolasi, bahkan kematian, sedangkan dampak tidak langsungnya dapat berupa kerusakan pada piranti elektronik instrumentasi, komunikasi dan kontrol. Maka dari itu dibutuhkan desain metode proteksi petir yang handal dan se-efisien mungkin. Metode *collection volume* merupakan salah satu metode untuk memprediksi lokasi sambaran petir pada suatu tempat atau gedung yang dinilai handal saat ini.

Kota Depok merupakan salah satu kota dengan jumlah sambaran petir pertahunnya cukup besar. Sehingga pada Skripsi ini akan menggunakan gedung bertingkat di fakultas teknik, Universitas Indonesia sebagai tempat penelitian dalam memprediksi distribusi penangkapan sambaran petir agar dapat mendesain dan mengimplementasikan kelak sistem proteksi petir yang lebih optimum.

Kata Kunci : Proteksi Petir, Metode *Collection volume*, Terminal Udara (Finial), Metode Perancangan Proteksi Sambaran Petir (MPPST).

Yudi Ugahari
NPM 0404030873
Electrical Engineering Departement

Counsellor
Dr. Ir. Iwa Garniwa M.K., M.T.

**EXTERNAL LIGHTNING PROTECTION ANALYSIS USING
COLLECTION VOLUME METHOD, CASE STUDY BUILDINGS IN
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA**

ABSTRACT

Lightning is a high current and high voltage phenomenon that occurs in a very short time (impulse). Lightning is initialized by ionization up to the charge spark from cloud to ground or vice versa. Lightning properties are always release clouds charge to the closest mast. This has the highest probability to be stricken. This phenomenon is called lightning strike.

The impacts of this phenomenon that occurs in microseconds varies either in form of fire, isolation damage, or even dead. Meanwhile the indirect impacts can be in form of electronic, communication, and control instrument damage. Hence the importance of having a reliable and efficient lightning protection design method is obvious. *Collection volume* method is one of the most reliable methods to predict lightning strike locations.

As lightning strikes activity in Depok is one of the highest in the world, this mini thesis uses buildings in Faculty of Engineering University of Indonesia to capture the characteristic of lightning strike location to facilitate optimum lightning protection system design and application.

Keywords : Lightning Protection, *Collection Volume* Method, Air Termination, Lightning Protection Design Method (LPDM).

DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR ISTILAH / SIMBOL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 TUJUAN PENULISAN	1
1.3 BATASAN MASALAH	2
1.4 METODOLOGI PENULISAN	2
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN	2
BAB 2 LANDASAN TEORI	3
2.1 UMUM	3
2.2 FENOMENA PETIR	4
2.2.1 Karakteristik dan Bentuk Model Gelombang Petir	9
2.2.2 Sambaran Petir Langsung	11
2.2.3 Sambaran Petir Tak Langsung	12
2.2.4 Dampak Sambaran Petir pada Gedung Bertingkat, Manusia dan Saluran Transmisi Listrik	12
2.2.4.1 Pada manusia dan hewan	12
2.2.4.2. Pada Gedung	14
2.2.4.3. Saluran Transmisi	15

	Halaman
BAB 3 DASAR TEORI METODE <i>COLLECTION VOLUME</i>	17
3.1 UMUM	17
3.2 METODE PERANCANGAN PROTEKSI SAMBARAN PETIR (MPPST)	18
3.3 METODE <i>COLLECTION VOLUME</i>	21
BAB 4 PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA	30
4.1 PENGUMPULAN INFORMASI MENGENAI SITUASI GEDUNG	31
4.2 PERHITUNGAN RESIKO SAMBARAN PETIR	34
4.3 PENGOLAHAN DATA	35
4.4 <i>COLLETION SURFACE METHOD</i>	46
4.5 RANCANG BANGUN, VOLUME PENANGKAPAN DAN SUDUT PERLINDUNGAN	48
BAB 5 KESIMPULAN	61
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Peta IKL Indonesia dari tahun 1991 – 2006 (sumber:Badan meteorologi dan geofisika)	4
Gambar 2.2 Distribusi muatan pada awan	5
Gambar 2.3 Macam-macam pelepasan muatan awan	6
Gambar 2.4 Gambar proses lengkap terjadinya sambaran petir	8
Gambar 2.5 Bentuk fisik sambaran petir	9
Gambar 2.6 Bentuk gelombang arus petir dengan pelepasan durasi singkat (short duration stroke)	10
Gambar 2.7 Bentuk gelombang arus petir dengan pelepasan durasi lama (long duration stroke)	11
Gambar 2.8 Ilustrasi tegangan langkah	13
Gambar 3.1 Sistem proteksi kerucut	19
Gambar 3.2 Metode Sangkar Faraday	20
Gambar 3.3 Metode Bola Berguling	21
Gambar 3.4 Perintis vertikal diatas permukaan tanah	22
Gambar 3.5 Representasi model bangunan dan intensifikasi medan	23
Gambar 3.6 (a) Prediksi model dari jarak sambaran sebagai fungsi dari muatan perintis sambaran; $L_c = 1800m$, $b = 1m$ (b) Model jarak sambaran sebagai fungsi dari ketinggian Bangunan	24
Gambar 3.7 (a) Model jarak sambaran sebagai fungsi dari arus petir (b) Model jarak sambaran sebagai fungsi dari ketinggian Bangunan	25
Gambar 3.8 Sudut <i>collection volume</i> dengan pengaruh bangunan sekitar	26
Gambar 3.9 Metode <i>collection volume</i>	27
Gambar 3.10 Sudut perlindungan	28
Gambar 4.1 Jarak sambaran vs sudut datang petir di gedung elektro, mesin, metalurgi, industri dan teknik kimia	37
Gambar 4.2 Jarak sambaran vs sudut datang petir di gedung dekanat	38

Gambar 4.3	Jarak sambaran vs sudut datang petir di gedung kuliah bersama	38
Gambar 4.4	Jarak sambaran vs sudut datang petir di gedung teknik sipil	39
Gambar 4.5	Jarak sambaran vs sudut datang petir di gedung teknik arsitektur	39
Gambar 4.6	Jarak sambaran vs sudut datang petir di gedung PAF	40
Gambar 4.7	Jarak sambaran vs sudut datang petir di Menara RTC UI	40
Gambar 4.8	<i>Maximum lateral displacement</i> vs arus petir di gedung – gedung fakultas teknik	42
Gambar 4.9	<i>Collection volume</i> vs arus datang petir di gedung – gedung fakultas teknik	44
Gambar 4.10	Sudut datang petir vs sudut datang petir di gedung – gedung fakultas teknik	45
Gambar 4.11	Distribusi dari pengamatan bahaya sambaran petir pada gedung yang beratap rata dengan sudut empat persegi panjang	47
Gambar 4.12	Distribusi dari pengamatan bahaya sambaran petir pada gedung yang beratap miring	48
Gambar 4.13	Letak peletakan terminal udara pada gedung dekanat berdasarkan <i>collection volume</i> , <i>attractive area</i> , sudut perlindungan dan <i>collection surface</i>	49
Gambar 4.14	Letak peletakan terminal udara pada gedung PAF berdasarkan <i>collection volume</i> , <i>attractive area</i> , sudut perlindungan dan <i>collection surface</i>	50
Gambar 4.15	Letak peletakan terminal udara pada gedung kuliah bersama berdasarkan <i>collection volume</i> , <i>attractive area</i> , sudut perlindungan dan <i>collection surface</i>	51
Gambar 4.16	Letak peletakan terminal udara pada gedung departemen teknik elektro, departemen teknik mesin, departemen teknik metalurgi, departemen teknik kimia, dan departemen teknik industri berdasarkan <i>collection volume</i> , <i>attractive area</i> , sudut perlindungan dan <i>collection surface</i>	52
Gambar 4.17	Letak peletakan terminal udara pada gedung teknik Sipil	

berdasarkan <i>collection volume</i> , <i>attractive area</i> , sudut perlindungan dan <i>collection surface</i>	53
Gambar 4.18 Letak peletakan terminal udara pada gedung teknik Arsitektur berdasarkan <i>collection volume</i> , <i>attractive area</i> , sudut perlindungan dan <i>collection surface</i>	54
Gambar 4.19 Letak peletakan terminal udara pada menara RTC UI 107,9 FM berdasarkan <i>collection volume</i> , <i>attractive area</i> , sudut perlindungan dan <i>collection surface</i>	55
Gambar 4.20 Area proteksi gedung-gedung di FTUI	56
Gambar 4.21 Tinggi terminal udara	59
Gambar 4.22 Penyokong terminal udara	60

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1. Data fisik dan Non-fisik gedung Dekanat FTUI	31
Tabel 4.2. Data fisik dan Non-fisik gedung Sekertariat Jurusan dan Laboratorium FTUI	32
Tabel 4.3. Data fisik dan Non-fisik Gedung Pusat Administrasi FTUI	33
Tabel 4.4. Data fisik dan Non-fisik Gedung Kuliah Bersama FTUI	33
Tabel 4.5. Data fisik dan Non-fisik Menara Pemancar RTC UI 107,9 FM	33
Tabel 4.6. Persentasi lokasi kemungkinan terjadinya kerusakan akibat sambaran petir.	47
Tabel 4.7. Jadwal evaluasi sistem proteksi petir	57
Tabel 4.8. Perbandingan kebutuhan terminal udara yang terpasang dengan berdasarkan <i>metode collection volume</i> .	58
Tabel 4.8. Standar minimum material kelas 2	59

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A Perhitungan Resiko Sambaran Petir dengan IEC 1662 : 1995 untuk Pemilihan Level Proteksi Sistem Proteksi Petir (IEC 1024-1-1 : 1993)	A-1
Lampiran B Data IKL dan hari guruh 1991-2006	B-1
Lampiran C Perhitungan Resiko Sambaran Petir dengan IEC 1662 : 1995 Studi Kasus gedung-gedung di Fakultas Teknik Universitas Indonesia	C-1
Lampiran D Data perhitungan jarak sambaran, <i>maximum lateral displacement</i> , collection volume, dan sudut perlindungan pada gedung di FTUI	D-1

DAFTAR SIMBOL

N_d	Jumlah rata-rata frekuensi sambaran petir langsung pertahun
N_g	Kerapatan sumber petir ke tanah
A_e	Luas daerah yang masih memiliki angka sambaran petir sebesar N_d
r_s	Jarak sambaran
Δ_{max}	<i>Maximum lateral displacement</i>
θ_s	Sudut perlindungan



BAB 1

PENDAHULUAN

I.1 LATAR BELAKANG

Petir merupakan suatu fenomena alam berupa gelombang elektromagnetik dengan arus dan tegangan yang sangat tinggi yang bermula dari ionisasi hingga loncatan muatan dari awan ke tanah atau sebaliknya. Akibat dari sifat petir yang selalu melepaskan muatan dari awan ke benda yang terdekat dengan awan, menyebabkan suatu obyek dengan ketinggian yang besar akan memiliki probabilitas yang besar pula disambar oleh petir.

Indonesia merupakan salah satu daerah dengan hari guruh pertahun yakni berkisar antara 180-260 hari guruh pertahun dengan kerapatan sambaran petir ketanah mencapai 30 sambaran per km² per tahun, bahkan *guiness book of record* sempat mencatat di daerah cibinong menjadi daerah dengan hari guruh pertahun mencapai 322 hari guruh pertahun. Sehingga untuk mengurangi resiko yang mungkin terjadi dilakukan pemasangan sistem proteksi petir. Rancangan dan pemasangan sistem proteksi petir ditentukan oleh bentuk dan tinggi bangunan itu sendiri dan karakteristik sambaran petir dilokasi bangunan tersebut.

Karena sifat petir yang destruktif, maka diperlukan usaha-usaha antisipasi yang dilakukan untuk meminimalisasi bahkan meniadakan bahaya sambaran petir langsung maupun tak langsung. Untuk mengurangi resiko kerusakan ini dilakukan pemasangan sistem proteksi petir yang handal dan efisien.

I.2 TUJUAN PENULISAN

Pembahasan dalam skripsi ini bertujuan untuk menerapkan dan menganalisis metode *collection volume* pada proteksi petir eksternal untuk melindungi bangunan atau gedung dari sambaran petir langsung. Melalui analisa metode tersebut, selanjutnya kita dapat mendesain tata letak sistem proteksi petir yang efisien dan handal pada gedung-gedung di wilayah Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

I.3 BATASAN MASALAH

Penulis membatasi masalah hanya pada kemungkinan dalam menentukan letak sistem proteksi petir eksternal menggunakan terminal udara batang melalui penerapan metode *collection volume* di wilayah fakultas teknik universitas Indonesia.

I.4 METODOLOGI PENULISAN

Penulisan diawali dengan uraian tentang konsep metode *collection volume* dan beberapa metode konvensional sebelumnya sebagai perbandingan. Selanjutnya dilanjutkan dengan melihat kemungkinan penerapan metode *collection volume* sebagai proteksi eksternal petir di wilayah fakultas teknik Universitas Indonesia berdasarkan data dan pengamatan langsung. Setelah itu, dilakukan perhitungan untuk menentukan letak sistem proteksi eksternal berdasarkan metode *collection volume* berikut kemungkinan penerapannya.

I.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Untuk mempermudah pembahasan, penulisan skripsi ini dibuat dalam 5 bab. Pada Bab I berisi pendahuluan, berisi latar belakang, tujuan, batasan masalah, metodologi penulisan dan sistematika penulisan. Bab II membahas tentang fenomena petir, macam-macam sambaran petir berikut dampak-dampaknya terhadap gedung bertingkat, saluran transmisi listrik dan manusia.

Bab III Membahas mengenai beberapa metode konvensional sebelumnya, metode *collection volume*, dan perhitungan *attractive area*. Selanjutnya pada BAB IV memberikan penjelasan mengenai penentuan nilai resiko bangunan bertingkat di kawasan fakultas teknik Universitas Indonesia melalui metode IEC secara lengkap, dan selanjutnya menghitung penentuan letak sistem proteksi eksternal petir berdasarkan metode *collection volume* sebagai metode dalam mendesain proposal untuk kemungkinan penerapannya. Dan terakhir Bab V Merupakan kesimpulan dari seluruh uraian dalam skripsi ini.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 UMUM

Petir merupakan gejala alam dengan aliran impuls yang sangat tinggi yang terjadi akibat adanya aliran muatan listrik dari awan ke tanah karena adanya kuat medan listrik antara muatan di awan dengan muatan induksi pada obyek-obyek di permukaan tanah. Peristiwa mengalirnya muatan tersebut dinamakan sambaran petir. Pelepasan muatan ini dapat terjadi antara pusat kelompok muatan (awan ke awan atau dalam awan sendiri) atau antara awan bermuatan dengan bumi (lebih sering dianggap manusia sebagai petir). Proses pelepasan muatan dari awan bermuatan itu bergantung pada struktur awan bermuatan dan keadaan atmosfer bawah diantara awan dan bumi, serta tergantung pula pada profil permukaan bumi dan konduktivitas tanahnya, dimana hal-hal tersebut bergantung kembali pada letak wilayahnya.

Wilayah Indonesia pada umumnya memiliki curah hujan yang cukup tinggi dan jumlah yang besar, menurut Iso kraunik level (IKL) besarnya yaitu 30 sampai dengan 120. Hal ini disebabkan karena letak geografis yang berpengaruh pada cuaca, musim, gerakan massa udara di atmosfer, kondisi udara dan kondisi permukaan tanah/bumi berikut analisa Data IKL dan Data Hari Guruh untuk wilayah DKI Jakarta dan sekitarnya. (sumber :Badan meteorologi dan geofisika)

1. Analisa Data Hari Guruh :

Rata – rata Hari Guruh tahun 1991 – 2006 sebesar 157 Hari Guruh / tahun

Tertinggi : Tangerang (Budiarto – Curug) sebesar 227 Hari Guruh / tahun

Terendah : Cengkareng sebesar 95 Hari Guruh / tahun

2. Analisa Data IKL :

Rata – rata IKL tahun 1991 – 2006 dengan IKL 43%

Kerapatan / kepadatan Petir 9 sambaran/km²/tahun

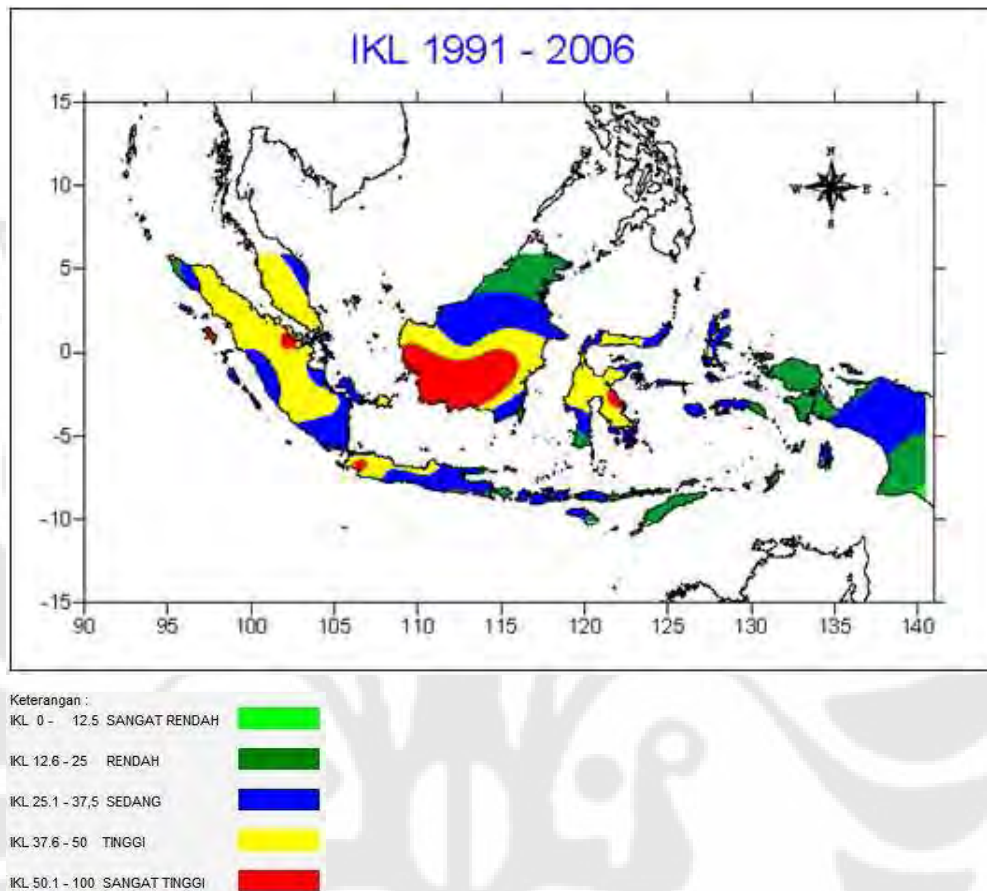
Tertinggi : Tangerang (Budiarto – Curug) dengan IKL 62%

Kerapatan / Kepadatan Petir 13 sambaran/km²/tahun

Terendah : Cengkareng dengan IKL 26%

Kerapatan / Kepadatan Petir 5 sambaran/km²/tahun.

Berikut pemetaan IKL di negara Indonesia dalam kurun waktu tahun 1991 hingga 2006:



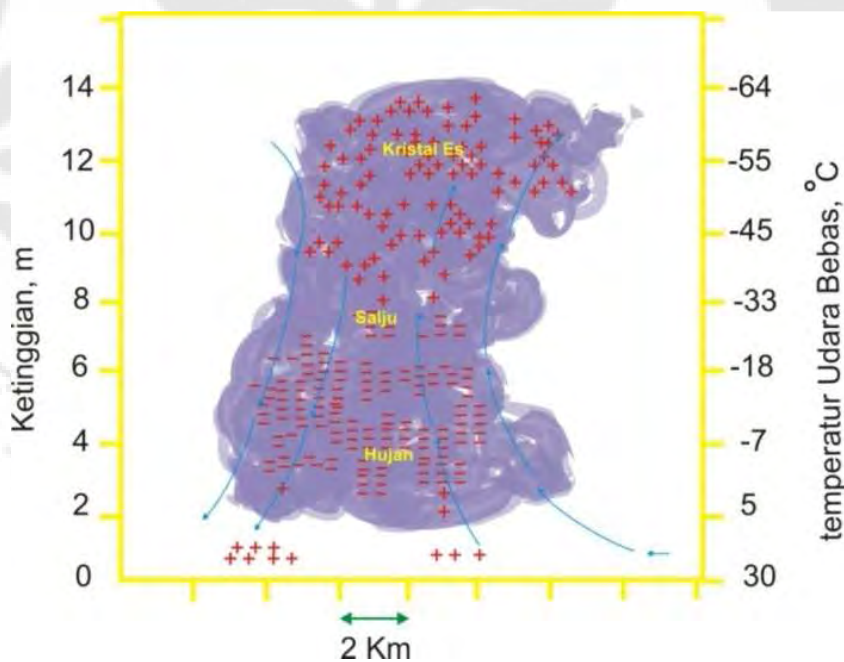
Gambar 2.1. Peta IKL Indonesia dari tahun 1991 – 2006
(sumber:Badan meteorologi dan geofisika)

Karena terjadinya petir didukung secara relatif oleh temperatur tinggi dan kelembapan udara, maka distribusi petir paling banyak terjadi pada daerah tropis.

2.2 FENOMENA PETIR

Mekanisme terjadinya petir akibat muatan di dalam awan masih menjadi perdebatan, namun teori yang banyak diyakini mengatakan bahwa energi yang menghasilkan petir diperoleh dari uap udara yang naik ke atas lalu memasuki lapisan atmosfer yang sangat dingin. Ketika ketinggian uap air sudah cukup mencapai penurunan suhu hingga -40°C , lalu uap air tadi sebagian menjadi kristal-kristal es dan ada yang terkondensasi yang selanjutnya membentuk awan.

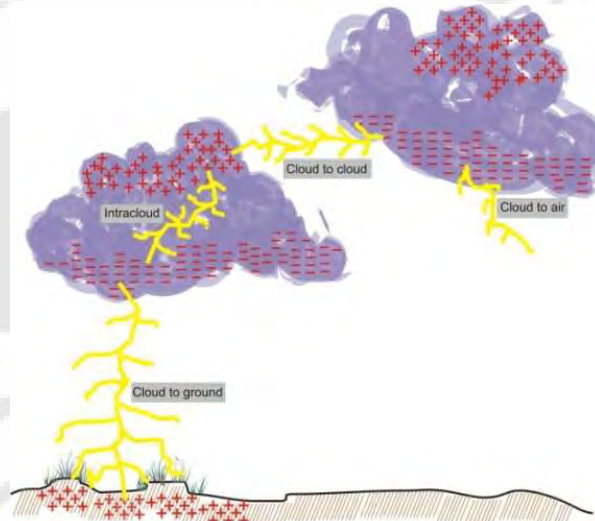
Ketika lapisan tempat berkumpulnya kristal-kristal es dan hujan batu jenuh, maka akan timbul perbedaan tekanan yang menimbulkan gerakan angin dari lapisan yang lebih atas ke lapisan yang lebih bawah. Ketika itulah kristal-kristal es bergabung ke dalam hujan batu. Hujan batu yang jatuh melalui awan membawa muatan positif menjauhi hujan batu yang bermuatan negatif. Selain itu juga terdapat partikel-partikel bebas yang sangat mudah didapat dari air laut dan industri pabrik. Lalu adanya gerak acak yang terjadi pada awan (turbulensi) juga menyebabkan pemisahan muatan positif dan negatif. Menurut teori mason, muatan yang timbul akibat pembentukan dan pemecahan butir-butir es yang lunak, menyebabkan adanya pancaran-pancaran es yang membentuk muatan negatif. Sedangkan muatan positif terbentuk akibat pembekuan yang diikuti pancaran pecahan es yang kecil. Setelah muatan-muatan tercipta dan terdistribusi secara acak didalam awan, partikel-partikel kecil bermuatan positif ditiup keatas dan partikel besar bermuatan negatif pun tertiu keatas namun dengan kecepatan yang relatif lebih kecil, sehingga partikel bermuatan negatif lebih cenderung diam bahkan jatuh ke bawah. Karena itulah muatan distribusi muatan positif lebih banyak di atas dan distribusi muatan negatif lebih banyak dibawah awan. Berikut ilustrasi distribusi muatan didalam awan yang pertama kali diperkenalkan oleh Malan (1952,1963):



Gambar 2.2. Distribusi muatan pada awan

Pada umumnya tipe pelepasan muatan terbagi atas:

- Pelepasan di dalam awan (*intraclouds*)
- Antara awan dengan awan (*cloud to cloud*)
- Antara awan dengan udara (*cloud to air*)
- Antara awan dan bumi (*cloud to ground*)



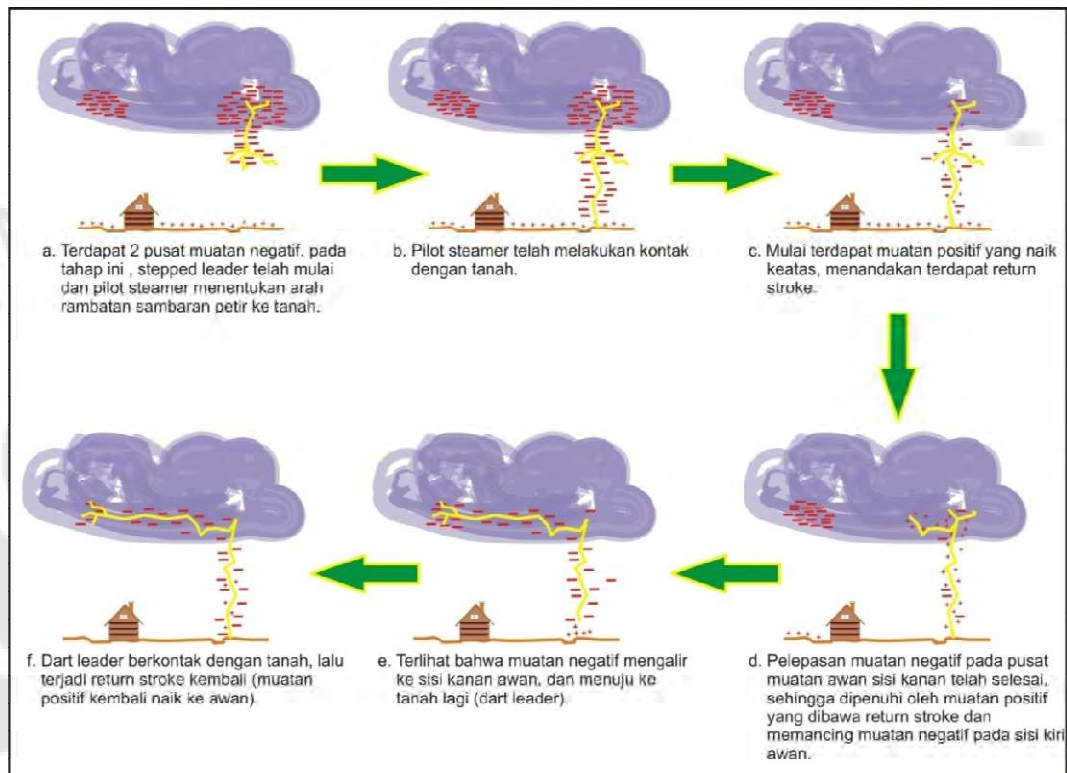
Gambar 2.3. Macam-macam pelepasan muatan awan

Menurut teori Kuffel & Zaeng [6] yang menyatakan bahwa pada awan petir yang aktif, partikel terbesar adalah negatif dan partikel positif hanya sebagian kecil. Awan yang bergerak dari lapisan atmosfer lebih atas ke bawah menyebabkan muatan negatif lebih cenderung berada dibawah muatan positif (massa proton = $1,6726 \times 10^{-27}$ kg dan massa elektron = $9,1091 \times 10^{-31}$ kg). Arus angin vertikal dalam membawa serpihan es ke atas awan sehingga mendorong hujan ke bawah (*down draft*) sampai berada ditemperatur yang lebih hangat dan menyebabkan hujan batu tadi mencair. Dengan demikian bagian atas awan pun semakin positif sedangkan bagian tengah atau bawahnya semakin negatif (kisaran berjarak 300m-2.000m). Distribusi muatan awan ini secara tidak langsung menyebabkan perubahan medan listrik permukaan tanah.

Jenis awan yang dalam pembentukannya terjadi pemisahan muatan listrik yaitu *cumulus*, *congensus* dan *comulonimbus*, dimana volume awan yang ikut dalam proses terjadinya petir tidak pasti. Muatan yang terkandung diperkirakan 1 sampai 100 coloumb lalu awan tersebut memiliki potensial sebesar 10^7 sampai 10^8

Volt [6]. Mekanisme sambaran petir bermula dari pusat muatan negatif dimana kuat medan di daerah tersebut mendekati kuat medan proses ionisasi, yaitu sebesar 30 KV/cm. Tingkatan pertama pelepasan muatan dinamakan dengan *stepped leader* yang bergerak secara cepat (sekitar 5×10^5 m/detik) dan menurun (down leader) dengan jarak 50m-100m lalu berhenti pada tiap langkahnya selama beberapa puluh mikrosekon. Ujung dari *stepped leader* dinamakan *pilot steamer* yang menentukan arah sambaran petir, memiliki cahaya yang rendah dan arus yang hanya beberapa *Ampere* dan menyebar di udara dengan kecepatan sekitar 1×10^5 m/detik. *Pilot steamer* tercipta ketika gradien listrik di awan melebihi harga tembus udara terionisasi. Naidu & Kamaraju menyatakan bahwa total waktu yang dibutuhkan sebuah *stepped leader* untuk mencapai tanah sebesar 20 milidetik. Ketika sambaran petir tadi telah menyambar objek di bumi, beda potensial mempengaruhi muatan listrik di bumi.

Arus sambaran balik (*return stroke*) bernilai hingga 250 KA paling menyebabkan efek-efek perusakan yang umum berhubungan dengan petir. *Return stroke* diikuti oleh beberapa sambaran pada interval 10-300ms. *Leader* kedua dikenal sebagai *dart leader* dengan penampakannya yang sangat cepat dan tiba-tiba. *Dart leader* biasanya tidak bercabang dan disertai dengan cahaya terang.



Gambar Proses lengkap terjadinya sambaran petir

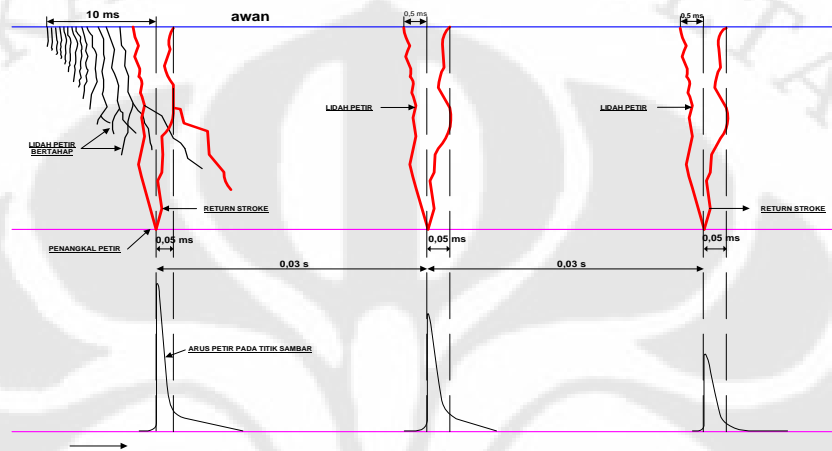
Gambar 2.4. Gambar proses lengkap terjadinya sambaran petir

Berikut lama waktu yang dibutuhkan dari proses lengkap *lightning protection* :

- a. *Stepped leader stroke* (Total durasi) = 0.01 detik
- b. *Stepped leader stroke* = 50 μ detik
- c. interval antara awal *dart leader* dan akhir dari *return stroke* = 10 mdetik
- d. interval antara sambaran yang berturut-turut = 0.05 detik
- e. tinggi awan petir = 1.5m

Pada umumnya, suatu petir/kilat terdiri atas beberapa sambaran (3 atau 4). Mata manusia tidak dapat menangkap cepatnya pergerakan dari sambaran petir, sehingga yang terlihat hanya seperti kedipan. Ketika mata dapat melihat beberapa sambaran yang berulang, dinamakan *multiple stroke* atau petir berulang. Berlawanan dengan pendapat umumnya, bahwa sebenarnya setiap sambaran di

dalam petir tidak menyambar satu tempat saja, tetapi bisa berbeda sampai 3 Km dengan waktu sampai 180 milisekon, dan bahkan dapat bisa berbeda dalam jarak 10 Km dengan waktu sampai 500 milisekon [14]. Berikut gambar sambaran petir negatif ke tanah, yang merupakan tipe sambaran paling umum terjadi dan dengan sambaran yang berulang:



Gambar 2.5. Bentuk fisik sambaran petir

Pada kenyataannya, jumlah sambaran petir ke tanah hanya 10% dari seluruh pelepasan petir, dimana selama badai petir, sambaran yang mayoritas terjadi adalah sambaran cloud to cloud. Pelepasan muatan yang terjadi didalam awan (*intracloud*) biasanya memberikan efek cahaya menyeluruh yang dikenal sebagai *Sheath Lightning*.

2.2.1 Karakteristik dan Bentuk Model Gelombang Petir

Gelombang petir berbentuk gelombang impuls yang merupakan bentuk kenaikan secara tiba-tiba dalam waktu yang singkat pada muka gelombangnya lalu mengalami penurunan secara bertahap menuju kesetimbangan awal pada ekor gelombang. Menurut *Society of Automotive Engineers (SAE)*, pembagian arus petir terbagi atas:

a. *Initial Stroke*

Initial stroke merupakan bagian ketika *stepped leader* bertemu dengan pelopor yang naik berasal dari tanah. Besar arus *initial stroke* mencapai $200 \text{ kA} \pm 10\%$ dalam waktu ≤ 500 mikrosekond.

b. *Intermediate current*

Setelah *initial stroke*, maka akan terjadi penurunan arus namun tak securam sambaran awal. Bagian ini dinamakan *intermediate current*. *Intermediate current* memiliki arus sebesar $2KA \pm 10\%$ dalam waktu $\leq 0,5$ sekon.

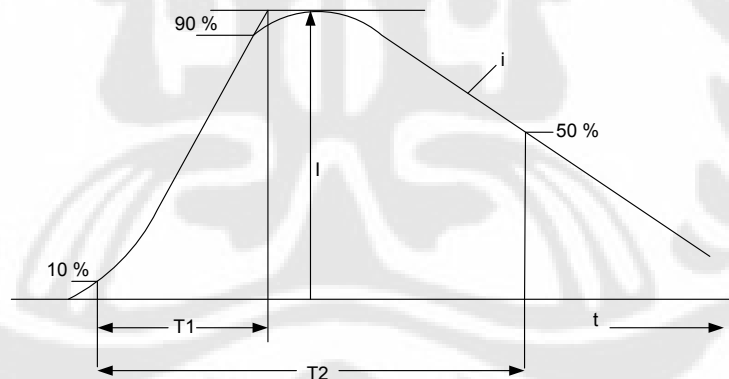
c. *Continuing current*

Bagian ini merupakan arus lanjutan dari bagian *intermediate*. Pada bagian ini mencapai 200-800 A dengan selang waktu antara 0,25 sekon hingga 1 sekon.

d. Restrike

Bagian ini merupakan sambaran susulan (*dart leader*). Model gelombang petir ini hampir sama dengan model gelombang *initial strike*, namun memiliki besar arus puncak yang lebih kecil dari pada *initial strike*. Arus puncak bagian *restrike* mencapai $100 KA \pm 10\%$ dalam waktu ≤ 500 mikro sekon.

Lalu pembagian karakteristik petir berdasarkan durasi pelepasan muatan, petir terbagi menjadi 2 (dua) jenis pelepasan muatan yaitu pelepasan berdurasi singkat dan pelepasan berdurasi lama. Pelepasan berdurasi singkat jika dibuat karakteristik umum gelombang arus simpuls atau arus transien dapat ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.6. Bentuk gelombang arus petir dengan pelepasan durasi singkat (*short duration stroke*)

Keterangan :

i = Gelombang arus petir

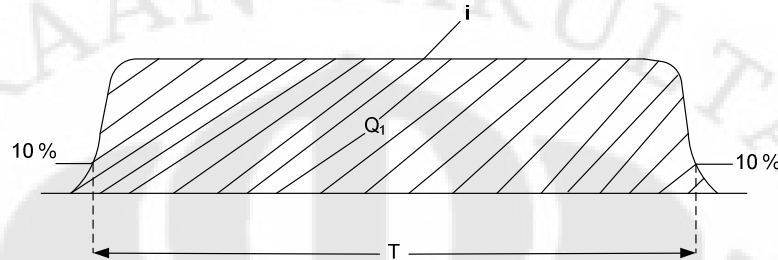
I = Arus puncak

T_1 = Waktu muka gelombang pada saat arus naik dari 10% hingga 90% dari nilai maksimumnya.

T_2 = Waktu ekor gelombang yang merupakan penjumlahan dari T_1 ditambah

turunnya arus hingga 50% dari nilai maksimumnya.

Pelepasan berdurasi lama jika dibuat karakteristik umum gelombang arus simpuls atau arus transien dapat ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.7 Bentuk gelombang arus petir dengan pelepasan durasi lama (*long duration stroke*)

Keterangan gambar :

i = Gelombang arus petir

T = Waktu dari 10 % nilai pada muka gelombang hingga 10 % nilai dari ekor gelombang.

2.2.2 Sambaran Petir Langsung

Jumlah rata-rata frekuensi sambaran petir langsung pertahun (N_d) dapat dihitung melalui perkalian antara kepadatan kilat ke bumi pertahunnya (N_g) dan luas daerah perlindungan efektif pada suatu gedung (A_e)

$$N_d = N_g \cdot A_e \quad [2.1]$$

Kerapatan sambaran petir ke tanah dipengaruhi oleh hari guruh rata-rata per tahun di daerah tersebut. Hal ini dapat ditunjukkan dengan:

$$N_g = 4 \cdot 10^{-2} \cdot T^{1.26} \quad [2.2]$$

Lalu, besar A_e yang merupakan luas daerah perlindungan efektif pada suatu gedung didapat melalui:

$$A_e = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \quad [2.3]$$

Lalu dengan mensubtitusikan persamaan (2.2) dan (2.3) ke persamaan (2.1), maka nilai N_d dapat dicari dengan persamaan:

$$N_d = 4 \cdot 10^{-2} \cdot T^{1.26} (ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2) \quad [2.4]$$

Dimana:

a = Panjang atap bangunan (m)

b = Lebar atap bangunan (m)

h = Tinggi atap bangunan (m)

T = Hari guruh pertahun

N_g = Kerapatan sumber petir ke tanah (sambaran/ Km^2 /tahun)

A_e = Luas daerah yang masih memiliki angka sambaran petir sebesar N_d (Km^2)

2.2.3 Sambaran Petir Tak Langsung

Sistem proteksi petir merupakan suatu kesatuan instalasi yang berguna untuk melindungi objek dari bahaya sambaran langsung ataupun tak langsung petir. Sistem proteksi meliputi sistem proteksi internal dan eksternal. Sistem proteksi eksternal berfungsi untuk menerima sambaran petir secara langsung dan mengalirkan arus petir melalui penghantar arus petir ke sistem pembumian, sistem proteksi petir eksternal terdiri dari finial/terminal udara yang berguna untuk menerima sambaran petir, penghantar penyalur arus petir yang berguna untuk mengalirkan arus petir ketanah dan sistem pentanahannya yang berguna untuk membuang arus petir kedalam tanah.

2.2.4 Dampak Sambaran Petir pada Gedung Bertingkat, Manusia dan Saluran Transmisi Listrik.

2.2.4.1 Pada manusia dan hewan

Data korban jiwa akibat sambaran petir di Indonesia masih sangat terbatas, berbeda dengan di Amerika, pada tiap tahunnya korban jiwa akibat sambaran petir berkisar antara 100 hingga 600 orang [8]. sedangkan korban yang mengalami luka berat berkisar antara 1.000 hingga 1.500 orang setiap tahunnya. Dari data tersebut, maka jumlah manusia yang meninggal dunia akibat sambaran petir di Amerika Serikat sekitar 25% hingga 32%, dan 74% korban yang bertahan hidup mengalami cacat tubuh.

Fenomena petir yang merupakan fenomena tegangan dan arus tinggi yang jelas memberikan dampak baik fisik maupun mental manusia. Jika fenomena ini tidak terproteksi dengan sistem proteksi yang baik, maka dapat memberikan dampak buruk bagi fisik manusia. Menurut Golde, seseorang yang terkena

sambaran petir dapat dikelompokkan atas situasi dan kondisi pada saat insiden ini terjadi, yaitu:

- Sambaran Samping = Ketika petir menyambar suatu benda di bumi sedemikian sehingga ada sebagian arus yang melompat dari benda tersebut ke manusia yang berada di dekat benda tersebut.
- Tegangan Langkah = Ketika kondisi tanah di daerah tersebut memiliki nilai resistansi yang seragam atau merata, sehingga arus petir yang menyambar akan menimbulkan beda potensial di tanah. Sehingga orang atau hewan yang berada di daerah tersebut menimbulkan beda potensial antara dua kaki manusia/ hewan.

Besar tegangan langkah dapat dihitung dengan :

$$U = i \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{s}{d(d+s)} \quad [2.5]$$

Dimana:

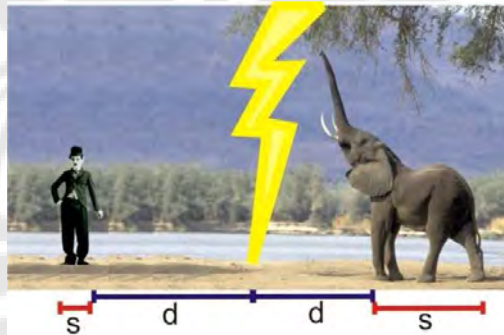
U = Tegangan Langkah (V)

i = Amplitudo Arus Petir (A)

ρ = Resistivitas Tanah ($\Omega - m$)

s = Jarak kedua kaki yang terjauh (m)

d = Jarak kaki terdekat dengan titik aliran arus petir di bumi (m)



gambar 2.8. Ilustrasi tegangan langkah

- Tegangan Sentuh = Ketika seseorang bersandar pada obyek yang disambar oleh petir, misalkan : pohon. Besar dari tegangan sentuh dapat dihitung melalui persamaan :

$$U = i(R + R_e) + L \frac{di}{dt} + U_s \quad [2.6]$$

Dimana:

U = Beda potensial sepanjang tubuh

i = Arus yang mengalir pada obyek yang disandari

R = Resistansi antara titik yang tersentuh dengan tanah

R_e = Resistansi efektif pohon

L = Induktansi antara titik sentuh dan bumi

d. Sambaran Langsung = Apabila petir menyambar langsung melalui kepala manusia, atau bisa juga melalui ujung payung yang digunakannya.

Efek-efek fisik akibat sambaran petir terhadap manusia adalah:

- a. Tubuh terbakar hingga suhu 300K, sehingga tubuh manusia menjadi hangus. Bagian terparah dari efek ini terletak pada ujung masuknya dan keluaranya sambaran petir.
- b. Lumpuhnya pusat saraf pernafasan atau otot-otot pernafasan menjadi kejang, sehingga pernafasan dapat berhenti.
- c. Lumpuhnya pusat saraf denyut jantung, sehingga jantung berhenti berdenyut.
- d. Luka bakar.
- e. Keadaan saraf yang kaget pada bagian yang terkena arus listrik.
- f. Meninggal.

2.2.4.2. Pada Gedung

Petir pada umumnya menyambar benda yang tertinggi. Pada kota-kota, benda yang tinggi biasanya adalah gedung-gedung bertingkat. Terlepas dari perbandingan ketinggian terhadap benda lain, gedung-bertingkat memerlukan instalasi proteksi petir walaupun gedung tersebut berada di daerah terpencil dan jauh dari gedung-gedung lainnya. Karena akibat yang ditimbulkan oleh sambaran petir pada gedung adalah:

- a. Kerusakan/kehancuran beberapa bagian gedung atau sarana pendukung gedung tersebut.
- b. Terhambatnya aktivitas manusia pada gedung dan sarana pendukungnya.
- c. Waktu dan biaya untuk mengembalikan bagian gedung yang rusak akibat sambaran petir.
- d. Resiko tegangan sentuh terhadap manusia di dalam gedung tersebut.

Kemudian bangunan yang memerlukan instalasi proteksi petir antara lain:

- a. Bangunan fasilitas umum : Universitas, Rumah Sakit, Tempat Ibadah, Sekolah, hotel dan lain-lain.
- b. Bangunan-bangunan untuk industri : Pembangkit listrik, Pabrik Minyak dan Gas, pabrik-pabrik dikawasan industri, dan lain-lain.
- c. Bangunan-bangunan penyimpanan : museum, monumen, perpustakaan dan lain-lain.

Sehingga secara tidak langsung, pemasangan instalasi proteksi petir, tak lain adalah untuk menghindari bahaya sambaran terhadap keselamatan dan kesehatan manusia yang berada dalam gedung itu sendiri.

2.2.4.3. Saluran Transmisi

Transmisi Tenaga listrik pada umumnya lebih sering menggunakan saluran udara karena pertimbangan ekonomis dan kemudahan pemeliharanya, kecuali transmisi yang melintasi kota, biasanya menggunakan saluran terowongan bawah tanah. Sudah jelas, bahwa saluran transmisi di udara merupakan salah satu bagian yang sering disambar oleh petir. Terlebih lagi saluran transmisi yang melewati dataran tinggi atau perbukitan, sehingga peluang tersambar petir pun akan semakin besar. Gangguan petir dikategorikan sebagai gangguan yang berasal dari luar sistem (eksternal). Gangguan tipe ini dapat menimbulkan efek:

- Membangkitkan gelombang tegangan impuls yang melewati komponen sistem tenaga , sehingga menjadi semakin besar dan menimbulkan hubung singkat dari sistem dan bahkan menembus isolasi peralatan. Tegangan transien pada sambaran petir dapat menyebabkan kerusakan permanen pada peralatan.
- Energi sambaran petir dapat melewati batas kemampuan sistem tenaga, sehingga menyebabkan kerusakan pada peralatan seperti pelepasan dan keretakan.

Petir paling sering menyambar pada kawat fasa di sistem transmisi. Sambaran ini menimbulkan gelombang tegangan berjalan sepanjang jalur transmisi. Gelombang tegangan berjalan ini bergerak menuju terminal suatu peralatan tegangan tinggi dan isolator antar kawat. Ketika petir menyambar tiang atau menara transmisi, maka gelombang tegangan berjalan bergerak menuju

bagian bawah tiang, lalu memantul balik ke bagian atas tiang atau menara lalu menghantam isolator. Lalu jika petir menyambar permukaan tanah yang dekat dengan sistem transmisi, medan listrik dan medan magnetnya membentuk tegangan tinggi di jalur sistem distribusi tegangan rendah. Sedangkan pada transmisi jaringan telepon dan fiber optik yang biasanya menumpang pada saluran transmisi tenaga listrik akan memberikan efek distorsi frekuensi radio bahkan merusak salurannya (jaringan terputus).



BAB 3

DASAR TEORI METODE *COLLECTION VOLUME*

3.1 UMUM

Timbulnya kerusakan akibat sambaran petir, maka munculah berbagai usaha untuk mengatasi bahaya yang diakibatkan sambaran petir. Sistem proteksi yang harus dilakukan bertujuan untuk melindungi bangunan dari sambaran langsung maupun sambaran tidak langsung. Maka dengan konsep perlindungan di atas sistem proteksi petir secara umum dibagi menjadi 2 yaitu antara lain :

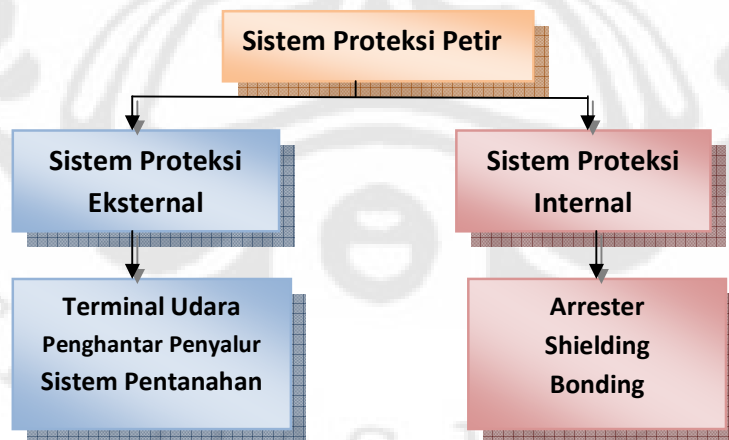
a. Sistem Proteksi Eksternal

Sistem ini berfungsi untuk melindungi bangunan beserta isinya dari sambaran langsung petir yaitu menyalihkan kemudian menangkap sambaran petir tersebut ke daerah yang lebih aman dan menyalurkan arus petir ke tanah.

b. Sistem Proteksi Internal

Sistem ini berfungsi untuk melindungi bangunan dari sambaran tidak langsung petir yaitu induksi medan magnetik yang ditimbulkan arus petir yang akan di tanahkan.

Atau konsep sistem proteksi petir dapat digambarkan melalui diagram dibawah ini:



Teknik penangkal petir pertama kali ditemukan oleh Benyamin Franklin dengan menggunakan interseptor (terminal udara) yang dihubungkan dengan

konduktor metal ke tanah. Terminal udara merupakan suatu alat pengakhir sambaran yang merupakan reseptor sambaran petir dan menghubungkannya dengan sistem proteksi petir [13]. Teknik ini selanjutnya terus dikembangkan untuk mendapatkan hasil yang efektif.

3.2 METODE PERANCANGAN PROTEKSI SAMBARAN PETIR (MPPST)

Salah satu kunci dari sistem proteksi terhadap bahaya sambaran petir adalah letak peletakan terminal udara pada suatu bangunan atau struktur. Tujuan utama dari terminal udara adalah menangkap sambaran petir di titik-titik yang akan tersambar, sehingga impuls petir dapat dialirkan melalui penghantar penyalur ke tanah. Pemasangan terminal udara namun tidak pada tempat kemungkinan sambaran petir merupakan hal yang sia-sia/pemborosan uang. Dua hal yang menjadi aspek penting yang sebaiknya dipertimbangkan adalah:

- (i) . Cakupan area proteksi dari terminal udara.
- (ii). Letak pemasangan terminal udara pada bangunan/struktur.

Kedua aspek diatas harus diperhitungkan pada MPPST yang digunakan.

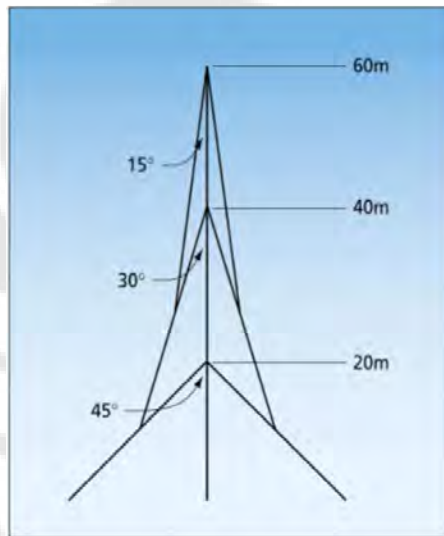
Tidak hanya perangkat sistem proteksi petir yang penting diperhatikan dalam melindungi bangunan dari sambaran petir, MPPST merupakan hal yang fundamental. MPPST sangat menentukan optimisasi peletakan letak terminal udara sehingga menciptakan sistem proteksi yang paling efisien pada sebuah bangunan atau wilayah. Beberapa kriteria penting dari MPPST adalah:

- a. Mengalami peningkatan yang signifikan dari metode sebelumnya.
- b. Memiliki landasan yang ilmiah.
- c. Telah di praktekkan dan teruji lebih dari satu dekade.
- d. Mempertahankan kesederhanaan sehingga dapat dilakukan penggunaanya secara umum .

Ada beberapa macam metode perancangan sistem proteksi petir eksternal yang biasa digunakan hingga dewasa ini antara lain yaitu:

- a. Metode Sudut Lindung perlindungan merupakan metode pertama kali yang diperkenalkan . Setelah Benjamin Franklin menemukan *Franklin rod*, yaitu alat proteksi petir berupa kerucut tembaga dengan daerah perlindungan

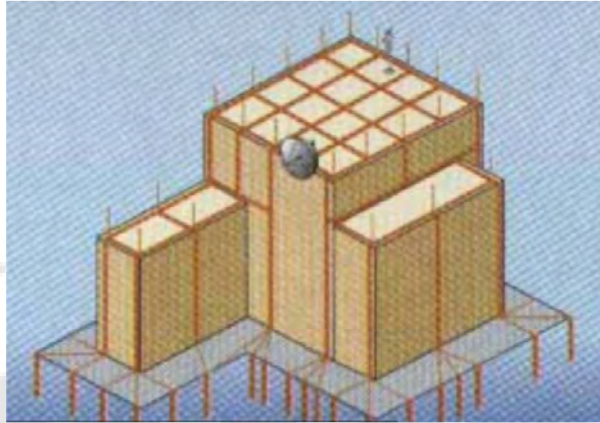
berupa kerucut imajiner. Pada umumnya *Franklin rod* dipasang pada pipa besi (dengan tinggi 1-3 meter) agar memperbesar area perlindungannya. Semakin jauh suatu bangunan atau struktur dari *Franklin rod* maka semakin lemah perlindungan di dalam daerah perlindungan tersebut. *Franklin rod* dapat dilihat berupa tiang-tiang di bubungan atap bangunan. Besar sudut dari *Franklin rod* dapat dilihat melalui gambar dibawah ini :



Gambar 3.1 Sistem proteksi kerucut

Namun kini metode sudut perlindungan masih dinilai metode yang tidak tepat untuk diterapkan. Performa metode ini banyak tidak sesuai dengan harapan, petir masih dapat menyambar bangunan/struktur walaupun telah terproteksi oleh *Franklin rod* (Sakurano et al 1995). Metode sudut perlindungan memberikan hasil yang buruk terhadap perlindungan petir dan tidak cukup ilmiah (Moore et al 1981).

- b. Sangkar Faraday (Faraday Cage) merupakan kombinasi antara finial dengan penghantar penyalur atau struktur metal pada bangunan yang membentuk suatu kesatuan sehingga membentuk sangkar. Metode sangkar Faraday hadir untuk mengatasi kelemahan Franklin Rod karena adanya daerah yang tidak terlindungi dan daerah perlindungan melemah bila jarak makin jauh dari Franklin Rod-nya. Sangkar Faraday mempunyai sistem dan sifat seperti Franklin Rod, tapi pemasangannya di seluruh permukaan atap dengan tinggi tiang yang lebih rendah.



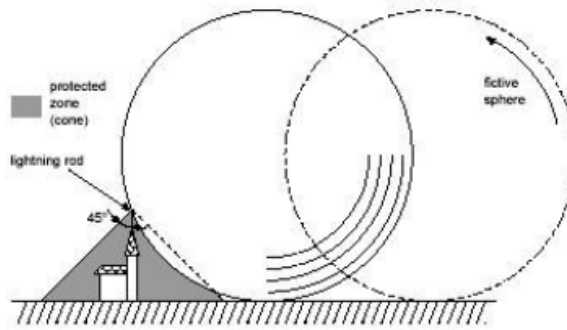
Gambar 3.2 Metode Sangkar Faraday

Sama halnya dengan metode sudut perlindungan, metode sangkar faraday tidak memiliki jaminan bahwa bidang metal disekujur gedung pada metode ini akan tersambar oleh petir. Bahkan kekuatan dielektrik material konstruksinya mungkin dapat *flash over* ke elemen terdekatnya. Selain itu juga metode ini tergolong memakan biaya konstruksi yang tinggi karena material yang dibutuhkan lebih banyak.

- c. Aplikasi MPPST yang paling sering digunakan saat ini adalah metode bola berguling. Untuk mengaplikasikan metode ini, menggunakan bola khayal yang memiliki radius 45m (150 ft), lalu digulingkan melalui permukaan bangunan yang hendak diproteksi. Keuntungan dari metode ini adalah metode ini cukup mudah untuk bisa diterapkan, namun cukup sulit untuk dapat dilakukan dengan tangan karena gambar rancangannya dalam bentuk tiga dimensi. Sehingga membutuhkan perangkat lunak model numerik 3D yang canggih. Permasalahan metode ini adalah mengasumsikan besar dari kemungkinan sambaran pertama sama di semua *contact point* pada bangunan. Sehingga untuk kemungkinan besar arus sambaran petir memiliki harga jarak sambaran yang konstan untuk berbagai ketinggian bangunan atau struktur. Sehingga ketika suatu titik pada bangunan dengan intensifikasi medan listrik yang signifikan diluar area dianggap area proteksinya. Besar jari-jari dari bola yang akan digulingkan dapat dicari melalui persamaan :

$$r = 6,7I^{0,85} (m, KA) \quad [3.1]$$

Karena itu metode proteksi petir selalu dikaji dan berkembang untuk mendapatkan MPPST yang handal dan efisien.



Gambar 3.3 Metode Bola Berguling

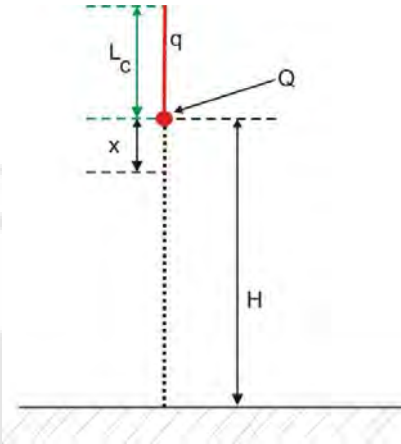
3.3 METODE *COLLECTION VOLUME*

Pada saat ini muncul suatu metode yang memiliki pendekatan fisika dibandingkan dasar Electrogeometric Model (EGM) dengan menggunakan fakta bahwa jarak sambaran (striking distance), r_s , bergantung pada kedua puncak arus sambaran petir (downleader charge) dan tingkat peningkatan medan listrik. Jarak sambaran adalah jarak antara ujung lidah petir yang bergerak kebawah (*downward leader*) bertemu dengan penghubung yang bergerak ke atas (*connecting leader*). Dan dasar dari metode ini adalah suatu bangunan tertentu hanya akan menangkap sambaran petir (dalam hal ini *downward leader*) yang memasuki atau berada dalam perkiraan *collection volume*-nya. Munculnya metode ini secara teknis terdengar kompleks, namun cenderung mudah untuk diimplementasikannya.

Batasan-batasan metode *collection volume* dapat ditentukan melalui:

- Downward leader* atau kemungkinan puncak arus sambaran petir, dimana berkaitan erat dengan tinggi bangunan (lebih khusus lagi, faktor intensitas medan), yang menentukan jarak sambaran permukaan.
- Perbandingan atau rasio antara kecepatan *downward leader* terhadap kecepatan *upward leader*.
- Keadaan atmosfer.

Metode *collection volume* merupakan kandidat terkuat saat ini sebagai metode yang paling akurat dalam menentukan area proteksi dan penangkapan dari proteksi eksternal sambaran petir. Perkembangan perintis sambaran petir dan arah rambatan sambaran dipengaruhi oleh medan listrik dan distribusi potensial antara awan petir dan permukaan tanah. (gambar 3.4)



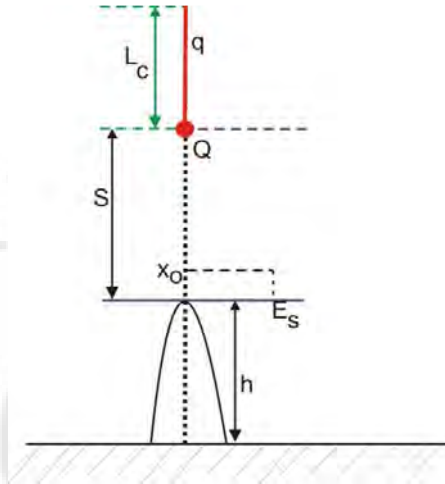
Gambar 3.4 Perintis vertikal diatas permukaan tanah

Dari gambar diatas didapat persamaan:

$$E_1(x, H, L_c) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(2H-x)^2} \right] + \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{x} - \frac{1}{x+L_c} + \frac{1}{2H-x} - \frac{1}{2H-x+L_c} \right] \quad [3.2]$$

Dimana kanal perintis direpresentasikan melalui L_c , muatan sebesar Q terdapat pada ujung perintis dan muatan sebesar q per satuan panjang terdapat pada kanal perintis. Jarak sambaran ditentukan antara panjang zona perintis pada saat fase lompatan muatan terakhir dan jangkauan intensifikasi medan listrik oleh bangunan atau struktur yang dikebumikan dimana muatan *upward* berkembang.

Untuk menghitung besar jarak sambaran, r_s , diperhitungkan pula kondisi ketika terjadi deviasi sambaran terhadap bangunan atau struktur. Pada saat kanal petir bergerak mendekati bangunan, intensitas medan magnet dan jangkauan intensifikasi menjadi meningkat. Pita korona pada ujung bangunan (terminal udara) mengumpul dan sebanding dengan jarak dimana medan listrik melampaui gradien minimum E_s . oleh karena itu dapat didefinisikan besar jarak x_0 sebagai jarak dari titik paling tinggi bangunan (titik yang diuji) dimana besar medan listrik sama dengan medan listrik E_s . Diasumsikan bahwa besar medan listrik E_s sebesar 5 KV cm^{-1} untuk perintis dengan polaritas positif dan 10 KV cm^{-1} untuk polaritas negatif. Gambaran ini bisa dilihat pada gambar (3.5) dimana panjang kanal petir direpresentasikan secara vertikal terhadap bangunan sebesar L_c , muatan persatuan panjang q dan muatan pada ujung perintis Q , bangunan dengan ketinggian h , dan jarak antara kanal petir dengan bangunan sebesar S dimana intensifikasi medan listrik belum memungkinkan muatan petir menyambar bangunan.



Gambar 3.5 Representasi model bangunan dan intensifikasi medan

Jarak S dikatakan sebagai jarak sambaran ketika besarnya sama dengan L_s . L_s merupakan jarak yang memungkinkan terjadinya spark over dari sambaran perintis, sementara besar L_s pun harus sama dengan besar L_u , yaitu radius dari daerah terjadinya korona. Besar medan yang dihasilkan akibat produksi muatan-muatan pada daerah terjadinya korona adalah:

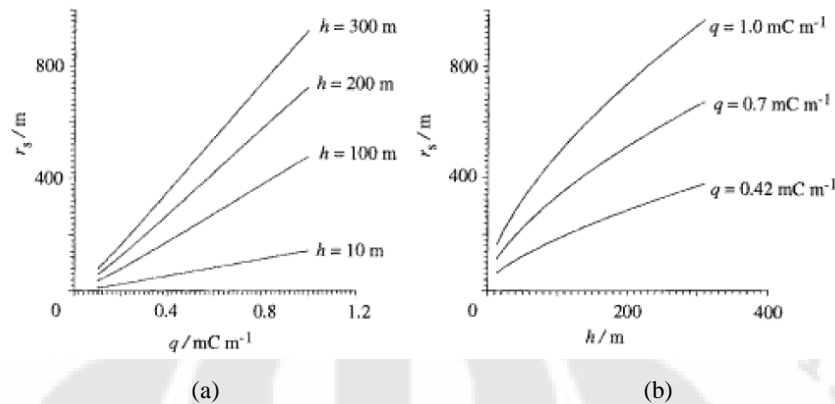
$$E_u = \frac{q_u L_u}{2\pi \epsilon_0 L_u^2} \quad [3.2]$$

Namun sesuai dengan yang dinyatakan sebelumnya bahwa $L_u = L_s$, sehingga muatan kritis-nya $(q_u)_{cr}$ adalah:

$$L_s = \frac{(q_u)_{cr}}{2\pi \epsilon_0 E_s} \quad [3.3]$$

Menurut penelitian yang dilakukan oleh N.I Petrov dan R.T Waters, besar minimum muatan untuk perintis berpolaritas positif adalah $20 \mu\text{Cm}^{-1}$, sehingga bisa diketahui besar L_s . Muatan Q pada ujung dari sambaran perintis sama dengan $q_u L_u$, sehingga jika kita perkirakan besar radius akibat perintis sama dengan panjang zona pita L_s , dapat ditulis menjadi:

$$Q = 2\pi \epsilon_0 L_u^2 E_s \quad [3.4]$$



Gambar 3.6 (a) Prediksi model dari jarak sambaran sebagai fungsi dari muatan perintis sambaran;

$$L_c = 1800\text{m}, b = 1\text{m}$$

(b) Model jarak sambaran sebagai fungsi dari ketinggian bangunan [12]

Pada bentuk yang sama pada persamaan [3.2] untuk sambaran upward:

$$q = 2\pi\epsilon_0 L_s E_s \quad [3.5]$$

Dengan menggunakan persamaan [3.4] dan [3.5] maka didapatkan hubungan antara Q dan q sebagai berikut:

$$Q = \frac{q^2}{2\pi\epsilon_0 E_s} \quad [3.6]$$

Pada gambar (3.6.a), jarak sambaran bergantung pada muatan q dari *downward leader* pada ketinggian bangunan yang berbeda-beda. Terlihat bahwa jarak sambaran bertambah secara linier seiring dengan pertambahan muatan per satuan panjang pada perintis petir. Gambar (3.6) dapat diperkirakan memiliki persamaan:

$$r_s \approx 18,8q(h + 15)^{2/3} \quad [3.7]$$

3.3.1 Jarak Sambaran Sebagai Fungsi dari Arus Petir

Seperti pada gambar (3.6) bahwa jarak sambaran sebagai fungsi dari muatan per satuan panjang masih memiliki keterbatasan, karena nilai q tidak dapat secara langsung diukur pada suatu sambaran petir. Perbandingan antara muatan per satuan panjang dengan arus dimungkinkan dengan mempertimbangkan ionisasi pada ujung sambaran perintis dengan temperatur yang tinggi. Dengan radius sebesar r_o , kerapatan muatan ρ dengan arus i , maka:

$$i = \pi r_o^2 \rho v \quad [3.8]$$

Dimana v merupakan kecepatan sambaran perintis. Dan seperti kita ketahui:

$$i = qv \quad [3.9]$$

Kecepatan sambaran v bergantung pada proses ionisasi pada permukaan r_0 , dan kecepatan sambaran diperkirakan besarnya:

$$v \approx v_i r_0 \quad [3.10]$$

Dimana v_i adalah koefisien rata-rata ionisasi. Persamaan (3.8), (3.9), dan (3.10) merupakan dasar dari hubungan antara arus perintis (i), kecepatan (v), dan muatan per meter (q):

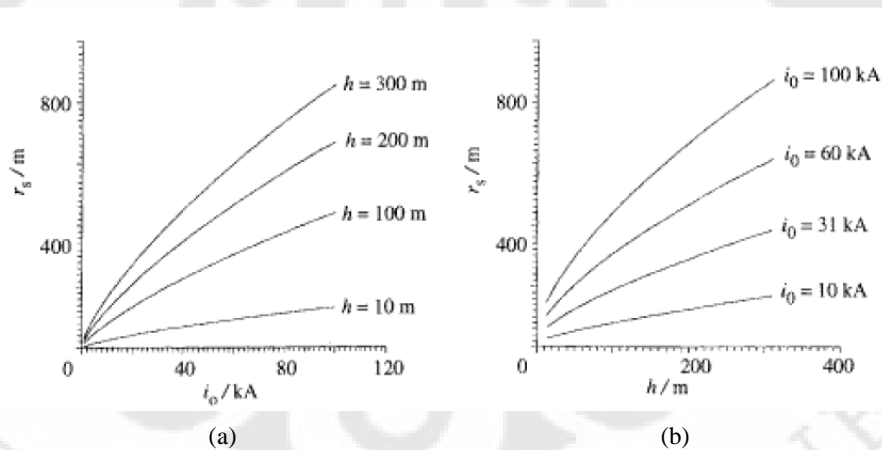
$$i = \frac{\pi \rho_c}{v_i^2} v^3 \quad [3.10]$$

dan,

$$q = \left\{ \frac{\pi \rho_c}{v_i^2} \right\}^{1/3} i^{2/3} \quad [3.11]$$

Dimana $\rho = \rho_c$ merupakan kerapatan muatan pada ujung sambaran perintis, dan besar ρ_c diperkirakan konstan. Pada pengukuran dilaboratorium oleh N.I Petrov, didapat nilai standar untuk besar frekuensi ionisasi $v_i \approx 5,6 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, dan kerapatan muatan pada ujung sambaran perintis adalah $\rho_c \approx 1 \text{ Cm}^{-3}$. Sehingga dari nilai-nilai tersebut menghasilkan:

$$q \approx 46 \times 10^{-6} i^{2/3}$$



Gambar 3.7 (a) Model jarak sambaran sebagai fungsi dari arus petir

(b) Model jarak sambaran sebagai fungsi dari ketinggian bangunan [12]

Pada gambar (3.7), besar jarak sambaran bergantung pada tinggi bangunan yang dihubungkan dengan besar arus yang berbeda-beda. Jika kita kombinasikan ketinggian bangunan dengan arus puncak, maka didapat persamaan ketika sambaran perintis berada dalam posisi vertikal terhadap bangunan:

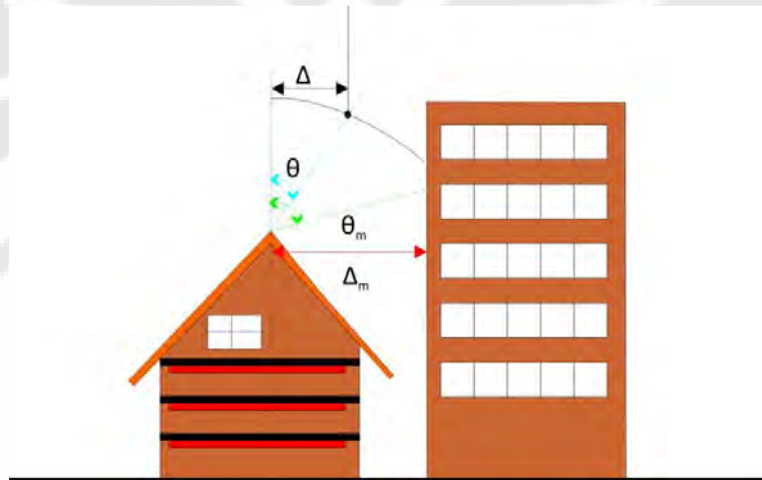
$$r_s \approx 0,8[(h + 15)i_o]^{2/3} \quad [3.12]$$

Jika sambaran perintis tidak tepat vertikal diatas bangunan. Jarak sambaran dihitung dengan parameter antara sudut datang petir yang berbeda-beda θ , besar arus sambaran yang berbeda dan ketinggian bangunan. Maka persamaan umum dari jarak sambaran diperkirakan menjadi:

$$r_s(i_o, h, \theta) = 0,8[(h + 15)i_o]^{2/3} \cos\theta + 2.4i_o^{2/3} \sin\theta \quad [3.13]$$

3.3.2 Attractive Area, Collection volume dan Sudut Perlindungan

Menurut teori *collection volume*, terdapat sudut sebesar θ_m yaitu sudut maksimum dimana probabilitas sambaran petir adalah nol jika melewati sudut θ_m . pada gambar (3.8) besar sudut θ_m dipengaruhi oleh bangunan disekitarnya:



Gambar 3.8 Sudut *collection volume* dengan pengaruh bangunan sekitar

Δ_{max} adalah nilai *maksimum lateral displacement*. Nilai ini digunakan sebagai *attractive radius*, yang berguna untuk mengetahui luas wilayah penangkapan dari terminal udara yang terpasang. Pada kondisi bangunan terpencil, besar *attractive radius* dapat dicari melalui persamaan (3.13):

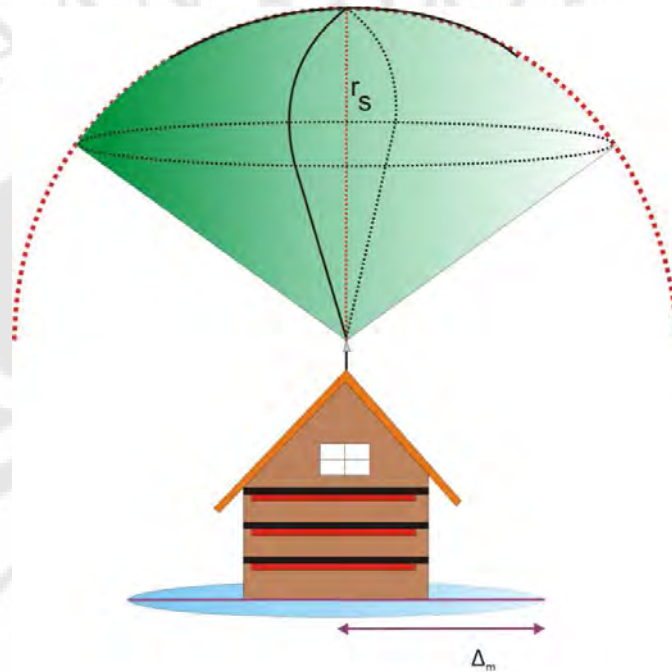
$$\Delta_{max} = 0,59 r_s \quad [3.14]$$

Nilai Δ_{max} akan bernilai maksimum pada saat sudut sambaran terhadap ujung ketinggian suatu bangunan adalah 0° . sehingga dengan mensubstitusikan persamaan (3.11) ke persamaan (3.13) akan didapat :

$$\Delta_{max} = 0,47[(h + 15)i_o]^{2/3} \quad [3.15]$$

Dengan mengetahui besar *attractive radius*-nya, maka kita dapat mencari luas permukaan dari area penangkapan sambaran petir atau luas dari collection areanya:

$$S_c = \pi \Delta_{max}^2 \cong 0,22\pi[(h + 15)i_o]^{4/3} \quad [3.16]$$



Gambar 3.9 Metode *collection volume*

Hal menarik terjadi jika dilihat dari tabel (3.1), ternyata besar sudut *collection volume* tidak dipengaruhi oleh ketinggian bangunan dan arus petir dan besarnya sebesar 52° .

i_o , kA	h , m	r_s ($\theta=0$), m	θ_{max} , °	Δ_{max} , m
31	30	90,7	52	53,5
	60	131	52	76,6
	90	165	51,5	96,3
60	30	146	52	86
	60	211	52	123
	90	263,7	52	154
100	30	208,5	52	122,7
	60	299	52	175
	90	372	52	218

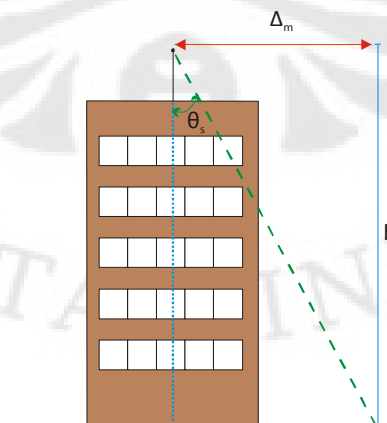
Tabel 3.1 jarak sambaran, *maximum lateral displacement*, dan maksimum sudut *collection volume* untuk ketinggian dan arus petir yang berbeda-beda [5]

Sehingga besar *collection volume* pada gambar (3.9) memiliki sudut yang konstan. Konsep ini didukung oleh penelitian di lapangan yang memberikan keakuratan data sebesar 95%, seperti yang telah diuji oleh N.I Petrov dan Waters di menara televisi moskow yang memiliki ketinggian 540m. Maka selanjutnya dapat ditentukan besar volume penangkapan dari sambaran petir melalui persamaan:

$$V_{col} = \frac{2\pi}{3} (0,21 A^3 + 0,085 B^3 + 0,38 A^2 B + 0,29 AB^2) \quad [3.17]$$

dimana; $A = 0,8[(h + 15)i_o]^{\frac{2}{3}}$ dan $B = 2,4 i_o^{\frac{2}{3}}$

Nilai Δ_{max} juga menentukan besar sudut perlindungan dari terminal udara pada suatu ketinggian tertentu:



Gambar 3.10 Sudut perlindungan

Mencari nilai sudut perlindungan dari finialnya melalui persamaan :

$$\theta_s = \arctan \left\{ \frac{0,47 [(h+15)i_0]^{2/3}}{h} \right\} \quad [3.18]$$



BAB IV

PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA

Fakultas Teknik Universitas Indonesia terletak di bagian selatan Jakarta, kotamadya Depok. Seperti yang telah diketahui bahwa kota Depok merupakan kota dengan hari guruh pertahun yang tergolong tertinggi di dunia. Menurut Jaringan Data Petir Nasional (JADPEN) yang sempat beroperasi pada tahun 1995-2002, Kota Depok memiliki intensitas sambaran petir yang tinggi. Data petir historik yang terekam oleh JADPEN dengan waktu pengamatan Juni 1995 hingga Oktober 2002, bahwa untuk wilayah Depok dan Bogor tercatat sebanyak 916.217 sambaran petir. Dari banyaknya sambaran tersebut, terdiri atas 798.857 (87,19%) sambaran petir ke tanah (*cloud to ground*) dan 117.360 (12,81%) sambaran petir awan ke awan (*cloud to cloud*). Dari data historik petir di daerah Depok dan Bogor yang tinggi, maka pemasangan pengamanan petir pada bangunan yang tinggi bisa dikatakan menjadi suatu kewajiban.

Dalam menentukan besarnya kebutuhan instalasi sistem penangkal petir pada suatu gedung ditentukan oleh besarnya resiko bahaya dan kerugian yang mungkin timbul pada saat terjadi sambaran petir. Sampai saat ini telah ada 4 metode dalam menentukan besarnya resiko akibat sambaran petir, yaitu:

- a. versi PUIPP (Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir) 1983
- b. Versi British Standard
- c. Versi NFPA
- d. Versi IEC

Dalam penentuan jenis proteksi yang cocok pada bangunan-bangunan di fakultas teknik Universitas Indonesia, penulis kali ini menggunakan metode versi IEC. Metode IEC adalah metode yang secara detail memperhitungkan resultan faktor-faktor yang memperbesar resiko bahaya dan yang memperkecil resiko bahaya sehingga dapat dibandingkan hasil akhir dengan standar-standar yang telah ditetapkan. Sehingga dari data tersebutlah dapat ditentukan seberapa jauh tindakan proteksi petir yang bisa dilakukan. Metode ini pada dasarnya terdiri dari beberapa tahapan yang harus dilakukan, yaitu mengumpulkan data aktual lapangan, mengolah data sampai mendapat nilai resiko kemudian melakukan rekomendasi.

Menurut BMG Indonesia, besar IKL untuk wilayah Depok didapat dari 2 buah stasiun yang terletak di Darmaga dan Citeko. Kedua stasiun tersebut memberikan nilai IKL rata-rata sebesar 52,45. IKL didefinisikan sebagai hari guruh satu tahun yang dibagi dengan 365 dan dikalikan dengan 100%. Sehingga dari besar IKL tersebut dapat ditentukan besarnya kerapatan sambaran petir per area 1Km² melalui persamaan:

$$D = IKL \times 0,21$$

Sehingga didapat besarnya kerapatan sambaran petir untuk wilayah Depok adalah sekitar 11 sambaran/Km²/tahun. Besar nilai kerapatan sambaran petir untuk wilayah Depok dan sekitarnya tergolong sangat tinggi.

4.1 PENGUMPULAN INFORMASI MENGENAI SITUASI GEDUNG

Pada tahap pertama, penulis mengumpulkan informasi yang lengkap terhadap situasi gedung lalu memasukkannya kedalam parameter-parameter perhitungan. Berikut informasi mengenai gedung-gedung yang berada di dalam kawasan fakultas Teknik Universitas Indonesia:

Tabel 4.1. Data fisik dan Non-fisik gedung Dekanat FTUI.

Karakteristik	Ukuran
Tinggi Gedung	21,18 m
Panjang Gedung	32,33 m
Lebar Gedung	29,33 m
Resistansi Tanah	5,87 Ω
Jumlah Orang	± 100 orang
Waktu Hadir	45 jam/minggu
IKL	52,45
Jumlah Finial Terpasang	1
Karakteristik Material	Beton

Tabel 4.2. Data fisik dan Non-fisik gedung Sekertariat Jurusan dan Laboratorium FTUI .

Karakteristik	Ukuran
Tinggi Gedung	22,95 m
Panjang Gedung	47,33 m
Lebar Gedung	22,15 m
Resistansi Tanah	Sipil = 0,98 Ω Mesin = 1,07 Ω Elektro = 3,89 Ω Arsitektur = 0,71 Ω Metalurgi = 4,07 Ω T. Kimia = 3,59 Ω Industri = 5,18 Ω
Jumlah Orang	Sipil = ± 600 Mesin = ± 600 Elektro = ± 650 Arsitektur = ± 500 Metalurgi = ± 500 T. Kimia = ± 450 Industri = ± 450
Waktu Hadir	45 jam/minggu
IKL	52,45
Jumlah Finial Terpasang	Sipil = 7 Mesin = 9 Elektro = 5 Arsitektur = 9 Metalurgi = 9 T. Kimia = 5 (rusak 1) Industri = 4
Karakteristik Material	Beton

Tabel 4.3. Data fisik dan Non-fisik Gedung Pusat Administrasi FTUI .

Karakteristik	Ukuran
Tinggi Gedung	22,343 m
Panjang Gedung	46,150 m
Lebar Gedung	24,200 m
Resistansi Tanah	3,72 Ω
Jumlah Orang	± 150
Waktu Hadir	45 jam/minggu
IKL	52,45
Jumlah Finial Terpasang	5
Karakteristik Material	Beton

Tabel 4.4. Data fisik dan Non-fisik Gedung Kuliah Bersama FTUI .

Karakteristik	Ukuran
Tinggi Gedung	26,33 m
Panjang Gedung	48,20 m
Lebar Gedung	48,20 m
Resistansi Tanah	3,6 Ω
Jumlah Orang	± 4000 orang
Waktu Hadir	45 jam/minggu
IKL	52,45
Jumlah Finial Terpasang	1
Karakteristik Material	Beton

Tabel 4.5. Data fisik dan Non-fisik Menara Pemancar RTC UI 107,9 FM .

Karakteristik	Ukuran
Tinggi Menara	70 m
Panjang Menara	0,3 m
Lebar Menara	0,3 m
Resistansi Tanah	3,08 Ω

IKL	52,45
Jumlah Finial Terpasang	1
Karakteristik Material	Metal

Pengaruh topografi tanah terhadap ketinggian gedung cukup berpengaruh pada penentuan besar nilai resiko, besar jarak sambaran dan besar dari *collection volume*. Di fakultas teknik, kontur tanah menurut hemat penulis dapat diklasifikasikan menjadi 4 macam ketinggian menurut kontur tanahnya :

- Titik 0 dianggap sebagai ketinggian 50 m diatas permukaan air laut; Gedung teknik elektro, gedung dekanat, gedung teknik mesin, gedung teknik metalurgi, gedung teknik industri, gedung administrasi fakultas, gedung teknik kimia.
- Titik -2.0 dianggap sebagai ketinggian 48 m diatas permukaan air laut; Gedung kuliah bersama.
- Titik -3.0 dianggap sebagai ketinggian 47 m diatas permukaan air laut; Gedung teknik arsitektur.
- Titik -4.0 dianggap sebagai ketinggian 46 m diatas permukaan air laut; Gedung teknik sipil.

4.2 PERHITUNGAN RESIKO SAMBARAN PETIR

Berdasarkan perhitungan resiko bahaya petir menurut IEC 1662:1995, maka diperoleh data-data sebagai berikut:

- Jumlah sambaran ke gedung-gedung dan struktur di FTUI :
 - a. Gedung Dekanat = 1 sambaran/tahun
 - b. Gedung Elektro = 1 sambaran/tahun
 - c. Gedung PAF = 1 sambaran/tahun
 - d. Gedung Sipil = 1 sambaran/tahun
 - e. Gedung Mesin = 1 sambaran/tahun
 - f. Gedung Metalurgi = 1 sambaran/tahun
 - g. Gedung Kuliah Bersama = 1 sambaran/tahun
 - h. Gedung Arsitektur = 1 sambaran/tahun
 - i. Gedung Teknik Kimia = 1 sambaran/tahun

j. Gedung Industri = 1 sambaran/tahun

k. Menara RTC UI = 2 sambaran/tahun

- Jumlah sambaran ke tanah = 1 sambaran/tahun
- Jumlah sambaran ke sistem yang masuk gedung = 1 sambaran/tahun
- Estimasi frekuensi kerusakan sebesar $F_f = 0,4214$
- Estimasi frekuensi kerusakan karena tegangan lebih (over voltage) $F_o = 5,01$
- Maka estimasi frekuensi kerusakan total adalah sebesar $F = 5,4324$, sedangkan frekuensi kerusakan maksimum yang diinginkan dengan asumsi sebesar $F_a = 0,11524$, yang artinya maksimum mengalami kerusakan satu kali dalam satu tahun.
- Gedung-gedung di wilayah FTUI menggunakan level proteksi III dengan efisiensi sistem proteksi eksternal 0,90 ,kecuali pada menara RTC menggunakan level proteksi I dengan efisiensi sistem proteksi eksternal 0,98.
- Sehingga berdasarkan perhitungan resiko sambaran petir dengan menggunakan metode IEC 1662:1995 dengan pemilihan level proteksi sistem proteksi petir IEC 1024-1-1:1993, Gedung dan struktur di FTUI **membutuhkan** sistem proteksi terhadap sambaran petir baik **eksternal** dan **internal**.

4.3 PENGOLAHAN DATA

Pada pengolahan data, penulis menggunakan beberapa parameter dalam penentuan letak pemasangan finial menurut metode *collection volume*. Hal ini bertujuan untuk memudahkan perhitungan pemasangannya, dan menjadikannya suatu kajian atas segala kemungkinan bentuk sambaran petir yang bisa saja terjadi. Berikut parameter-parameter yang digunakan :

- a. Sudut Datang petir : sudut datang petir terhadap finial berkisar antara 0° - 60° , hal ini didasarkan bahwa besar sudut volume penangkapan maksimum terminal udara pada dasar teori adalah sebesar 52° .
- b. Besar Arus petir : Menurut JADPEN [15], arus puncak petir pada daerah depok dan bogor terdistribusi normal dengan maksimum sambaran

berkisar antara 34 KA -60 KA untuk sambaran jenis negatif dengan rata-rata arus puncak petir sebesar 51,31 KA dan 14 KA-28 KA untuk jenis sambaran positif dengan rata-rata arus puncak petir sebesar 37,63 KA. Sehingga menurut data diatas penulis menggunakan arus petir berkisar antara 10 KA hingga 70 KA.

c. tinggi finial yang digunakan sebesar 1 m.

Setelah melakukan perhitungan melalui tahapan-tahapan penentuan letak terminal udara dengan menggunakan metode *collection volume*, maka didapatkan data-data jarak sambaran, *maximum lateral displacement*, *collection volume* dan sudut perlindungan yang akan dijadikan acuan dalam menentukan letak terminal udara pada gedung-gedung yang ada di Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Perhitungan jarak sambaran, *maximum lateral displacement*, *collection volume* dan sudut perlindungan pada wilayah FTUI diklasifikasikan atas 7 macam tipe ketinggian bangunan.

TIPE 1 : Gedung Departemen Teknik Elektro, Mesin, Metalurgi, Industri dan Kimia.

TIPE 2 : Gedung Dekanat.

TIPE 3 : Gedung Kuliah Bersama.

TIPE 4 : Gedung Teknik Sipil.

TIPE 5 : Gedung Teknik Arsitektur.

TIPE 6 : Gedung PAF.

TIPE 7 : Menara RTC.

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan, jarak sambaran dari titik tertinggi gedung-gedung di Fakultas Teknik Universitas Indonesia terhadap kemungkinan sambaran petir pada tipe 1 adalah sebagai berikut :

- Tinggi bangunan = 22,95 m
- Panjang bangunan = 47,33 m
- Lebar bangunan = 22,15 m
- Tinggi finial = 1 m

$$r_s(i_o, h, \theta) = 0,8[(h + 15)i_o]^{2/3} \cos\theta + 2.4i_o^{2/3}\sin\theta$$

Sudut $0^\circ =$

$$r_s(i_o, h, \theta) = 0,8 [(23,95+1+15) 10]^{2/3} \cos 0^\circ = 42,67 \text{ m}$$

$$r_s(i_o, h, \theta) = 0,8 [(23,95+1+15) 20]^{2/3} \cos 0^\circ = 67,73 \text{ m}$$

$$r_s(i_o, h, \theta) = 0,8 [(23,95+1+15) 30]^{2/3} \cos 0^\circ = 88,75 \text{ m}$$

$$r_s(i_o, h, \theta) = 0,8 [(23,95+1+15) 40]^{2/3} \cos 0^\circ = 107,51 \text{ m}$$

$$r_s(i_o, h, \theta) = 0,8 [(23,95+1+15) 50]^{2/3} \cos 0^\circ = 124,75 \text{ m}$$

$$r_s(i_o, h, \theta) = 0,8 [(23,95+1+15) 60]^{2/3} \cos 0^\circ = 140,88 \text{ m}$$

$$r_s(i_o, h, \theta) = 0,8 [(23,95+1+15) 70]^{2/3} \cos 0^\circ = 156,13 \text{ m}$$

selanjutnya perhitungan jarak sambaran untuk variasi arus hingga 70 KA dan variasi sudut datang petir hingga 60° selengkapnya terdapat pada lampiran D. Begitupun selanjutnya untuk tipe bangunan 2-7 terdapat pada lampiran D.



Gambar 4.1 jarak sambaran vs sudut datang petir di gedung elektro, mesin, metalurgi, industri dan teknik kimia.



Gambar 4.2 jarak sambaran vs sudut datang petir di gedung dekanat



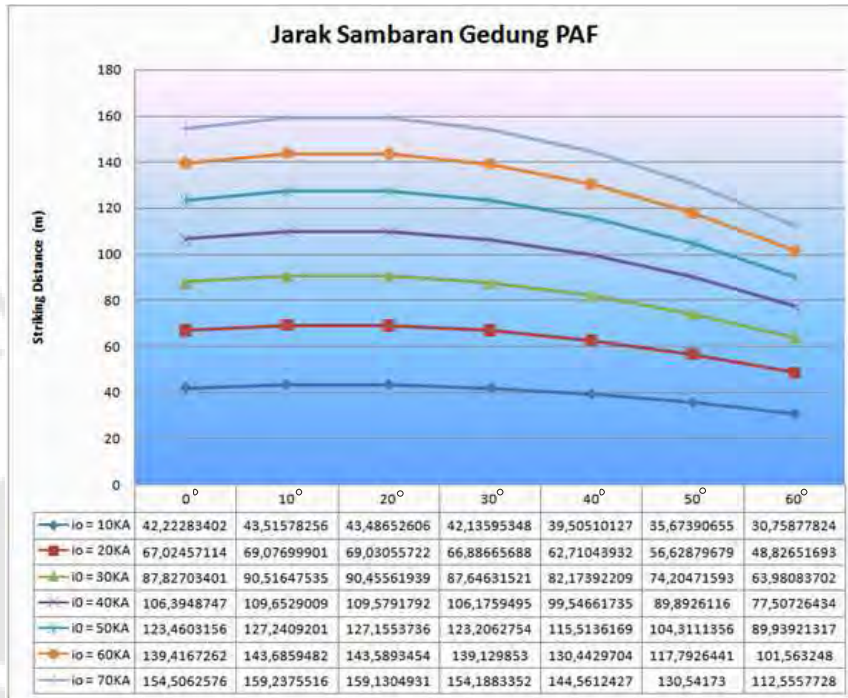
Gambar 4.3 jarak sambaran vs sudut datang petir di gedung kuliah bersama



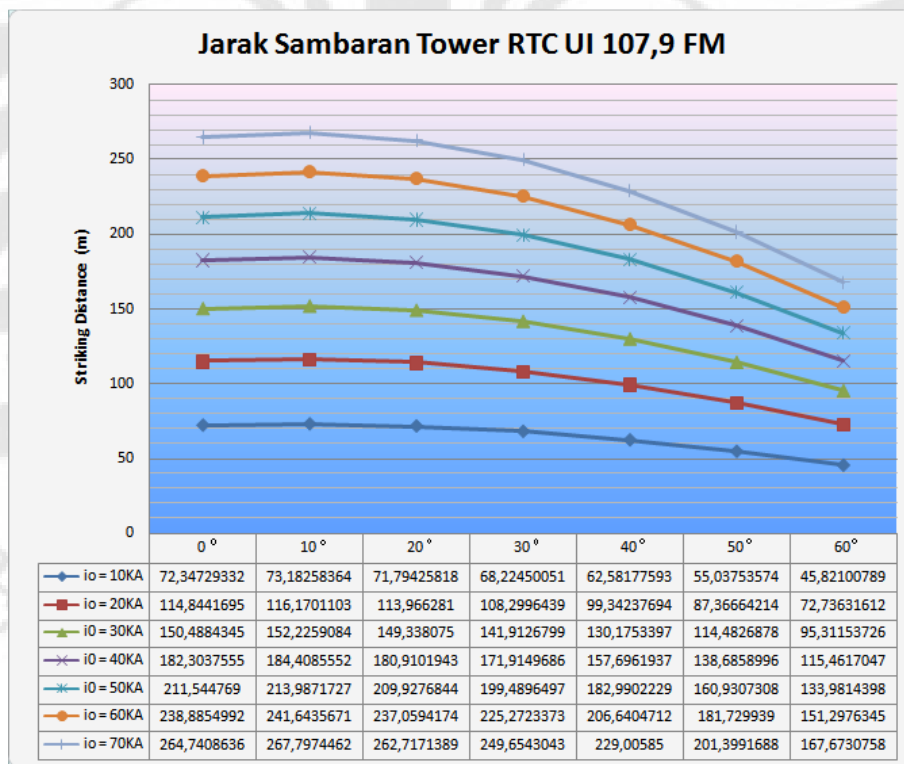
Gambar 4.4 jarak sambaran vs sudut datang petir di gedung teknik sipil



Gambar 4.5 jarak sambaran vs sudut datang petir di gedung teknik arsitektur



Gambar 4.6 jarak sambaran vs sudut datang petir di gedung PAF



Gambar 4.7 jarak sambaran vs sudut datang petir di Menara RTC UI

Dari gambar grafik (4.1) hingga (4.7), terlihat bahwa rentangan jarak terjauh dari kemungkinan sambaran petir berkisar antara sudut 0° hingga 20° dari garis normal titik tertinggi bangunan. Dan kemudian besar jarak sambaran akan menurun seiring dengan pertambahan sudut datang petir (sesuai dengan metode *collection volume*, sudut datang maksimum petir adalah 52°). Seperti yang telah dijelaskan pada bab 3, bahwa jarak sambaran merupakan jarak antara ujung lidah petir yang bergerak kebawah (*downward leader*) bertemu dengan penghubung yang bergerak ke atas (*connecting leader*). Hal ini menunjukkan bahwa stepped leader atau pilot steamer yang berada pada jarak sambarannya akan cenderung memasuki area penangkapan pada jarak tertentu dan masuk ke dalam suatu *collection volume* untuk diteruskan ke sistem proteksi eksternal yang terpasang pada suatu bangunan, dalam hal ini sangat bergantung pada penentuan letak titik terminal udara. Dari perhitungan menunjukkan bahwa jarak sambaran cenderung seiring dengan pertambahan sudut dan meningkat seiring pertambahan besar arus petir.

Arus petir dapat mencapai 200 KA, sehingga melalui perhitungan dengan menggunakan sampel gedung tipe 1 akan didapat jarak sambaran sebesar 314,38 m ketika sudut datang petir 0° . Arus petir yang semakin besar akan memiliki muatan yang semakin besar juga sesuai persamaan [4.1]. Karena muatan yang besar maka distribusi medan listrik akan semakin besar, sehingga medan intensifikasi petir akan memiliki jarak yang sesuai dengan ambang *upward streamer* dengan jarak yang lebih jauh. Dan jika ditinjau dari ketinggian bangunan, maka menara RTC memiliki jarak sambaran terbesar karena merupakan bangunan tertinggi di wilayah FTUI.

Selanjutnya perhitungan dan grafik terhadap *maximum lateral displacement* gedung-gedung di Fakultas Teknik Universitas Indonesia . Berikut contoh perhitungan *maximum lateral displacement* untuk bangunan tipe 1:

$$\Delta_{max} = 0,59 r_s$$

Yaitu pada saat sudut $\theta = 0^\circ$

Arus 10 KA =

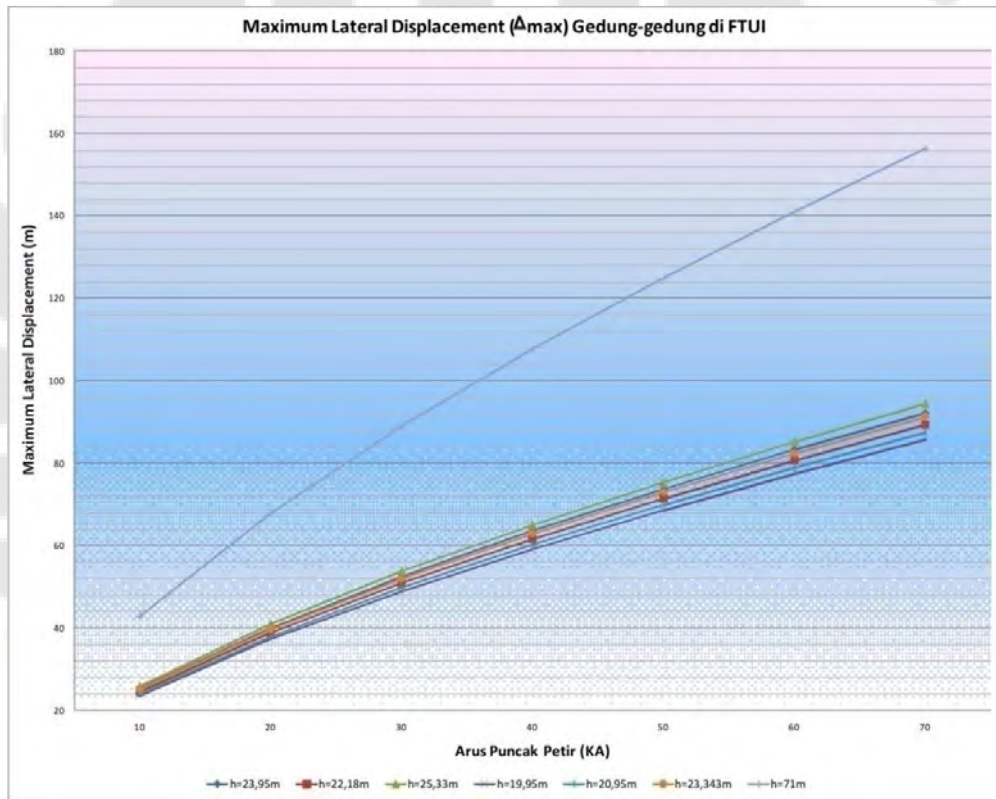
$$\Delta_{max} = 0,59.r_s = 0,47 [(h+15)i_o]^{2/3} = 0,47 [(22,95+1+15)10]^{2/3} = 25,17 \text{ m}$$

Arus 20 KA =

$$\Delta_{max} = 0,59.r_s = 0,47 [(h+15)i_o]^{2/3} = 0,47 [(22,95+1+15)20]^{2/3} = 39,96 \text{ m}$$

Arus 30 KA =

$\Delta_{\max} = 0,59.r_s = 0,47 [(h+15)i_o]^{2/3} = 0,47 [(22,95+1+15)30]^{2/3} = 52,36 \text{ m}$
 Arus 40 KA =
 $\Delta_{\max} = 0,59.r_s = 0,47 [(h+15)i_o]^{2/3} = 0,47 [(22,95+1+15)40]^{2/3} = 63,43 \text{ m}$
 Arus 50 KA =
 $\Delta_{\max} = 0,59.r_s = 0,47 [(h+15)i_o]^{2/3} = 0,47 [(22,95+1+15)50]^{2/3} = 73,61 \text{ m}$
 Arus 60 KA =
 $\Delta_{\max} = 0,59.r_s = 0,47 [(h+15)i_o]^{2/3} = 0,47 [(22,95+1+15)60]^{2/3} = 83,12 \text{ m}$
 Arus 70 KA =
 $\Delta_{\max} = 0,59.r_s = 0,47 [(h+15)i_o]^{2/3} = 0,47 [(22,95+1+15)70]^{2/3} = 92,12 \text{ m}$
 Selanjutnya perhitungan *maximum lateral displacement* untuk gedung tipe 2-7 dengan variasi arus secara lengkap terdapat pada lampiran D.



Gambar 4.8 *maximum lateral displacement* vs arus petir di gedung-gedung fakultas teknik

Maximum lateral displacement merupakan jarak terjauh bentangan mendatar dari jarak sambaran petir ke gedung. *Maximum lateral displacement* didapatkan ketika sudut jarak sambarannya sebesar 0° . *Maximum lateral displacement* juga merupakan *attractive radius* dari suatu bangunan, yang bergantung dari besar jarak sambarannya. Dari besarnya radius tersebut maka akan dapat ditentukan besar *attractive area* terhadap sambaran petir, dan selanjutnya dapat ditentukan pula besar sudut perlindungannya. Besar *attractive*

radius akan bertambah besar sesuai dengan pertambahan besar jarak sambaran pada sudut 0° .

Selanjutnya perhitungan dan grafik terhadap *collection volume* gedung-gedung di Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Berikut contoh perhitungan *collection volume* untuk bangunan tipe 1:

$$V_{col} = \frac{2\pi}{3} (0,21 A^3 + 0,085 B^3 + 0,38 A^2 B + 0,29 AB^2)$$

Arus 10 KA =

$$\begin{aligned} V_{col} &= 2\pi/3 (0,21 [0,8[(22,95+1+15)10]^{2/3}]^3 + 0,085 [2,4 \cdot 10]^{2/3}]^3 + \\ &\quad 0,38 [(22,95+1+15)10]^{2/3}]^2 \cdot [2,4 \cdot 10]^{2/3}] + 0,29 [0,8[(22,95+1+15)10]^{2/3} \cdot \\ &\quad [2,4 \cdot 10]^{2/3}]^2 \\ &= 53.765,94 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Arus 20 KA =

$$\begin{aligned} V_{col} &= 2\pi/3 (0,21 [0,8[(22,95+1+15)20]^{2/3}]^3 + 0,085 [2,4 \cdot 20]^{2/3}]^3 + \\ &\quad 0,38 [(22,95+1+15)20]^{2/3}]^2 \cdot [2,4 \cdot 20]^{2/3}] + 0,29 [0,8[(22,95+1+15)20]^{2/3} \cdot \\ &\quad [2,4 \cdot 20]^{2/3}]^2 \\ &= 215.063,8 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Arus 30 KA =

$$\begin{aligned} V_{col} &= 2\pi/3 (0,21 [0,8[(22,95+1+15)30]^{2/3}]^3 + 0,085 [2,4 \cdot 30]^{2/3}]^3 + \\ &\quad 0,38 [(22,95+1+15)30]^{2/3}]^2 \cdot [2,4 \cdot 30]^{2/3}] + 0,29 [0,8[(22,95+1+15)30]^{2/3} \cdot \\ &\quad [2,4 \cdot 30]^{2/3}]^2 \\ &= 483.893,4 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Arus 40 KA =

$$\begin{aligned} V_{col} &= 2\pi/3 (0,21 [0,8[(22,95+1+15)40]^{2/3}]^3 + 0,085 [2,4 \cdot 40]^{2/3}]^3 + \\ &\quad 0,38 [(22,95+1+15)40]^{2/3}]^2 \cdot [2,4 \cdot 40]^{2/3}] + 0,29 [0,8[(22,95+1+15)40]^{2/3} \cdot \\ &\quad [2,4 \cdot 40]^{2/3}]^2 \\ &= 860.255 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Arus 50 KA =

$$\begin{aligned} V_{col} &= 2\pi/3 (0,21 [0,8[(22,95+1+15)50]^{2/3}]^3 + 0,085 [2,4 \cdot 50]^{2/3}]^3 + \\ &\quad 0,38 [(22,95+1+15)50]^{2/3}]^2 \cdot [2,4 \cdot 50]^{2/3}] + 0,29 [0,8[(22,95+1+15)50]^{2/3} \cdot \\ &\quad [2,4 \cdot 50]^{2/3}]^2 \\ &= 1.344.148 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

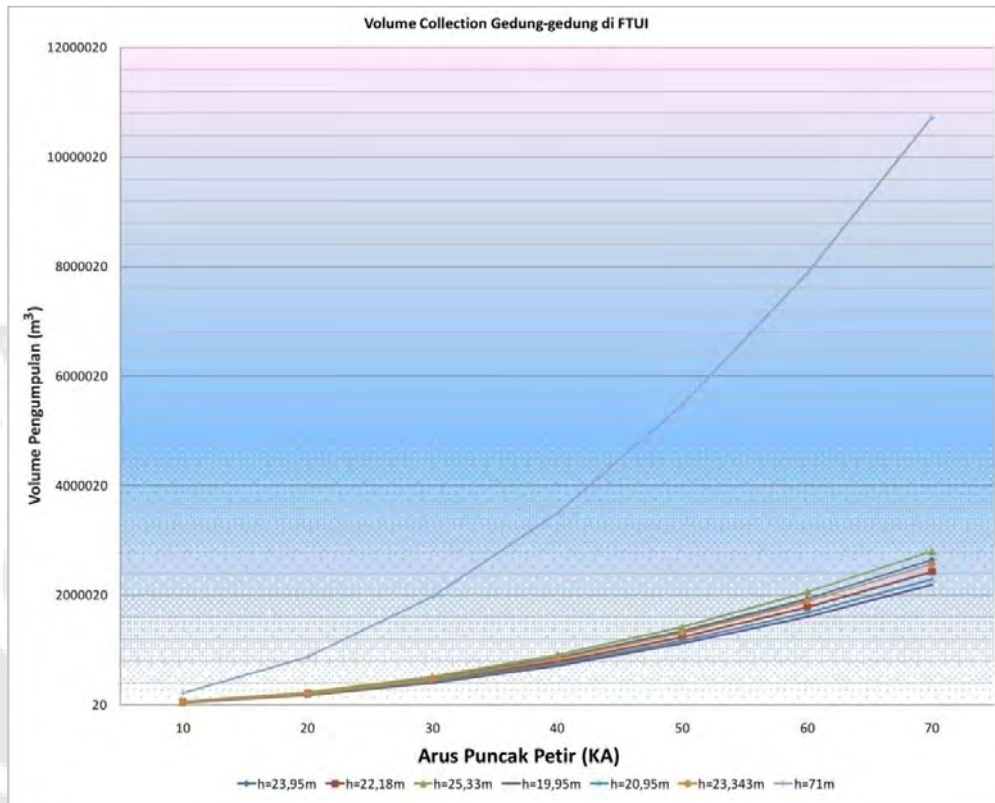
Arus 60 KA =

$$\begin{aligned} V_{col} &= 2\pi/3 (0,21 [0,8[(22,95+1+15)60]^{2/3}]^3 + 0,085 [2,4 \cdot 60]^{2/3}]^3 + \\ &\quad 0,38 [(22,95+1+15)60]^{2/3}]^2 \cdot [2,4 \cdot 60]^{2/3}] + 0,29 [0,8[(22,95+1+15)60]^{2/3} \cdot \\ &\quad [2,4 \cdot 60]^{2/3}]^2 \\ &= 1.935.574 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Arus 70 KA =

$$\begin{aligned} V_{col} &= 2\pi/3 (0,21 [0,8[(22,95+1+15)70]^{2/3}]^3 + 0,085 [2,4 \cdot 70]^{2/3}]^3 + \\ &\quad 0,38 [(22,95+1+15)70]^{2/3}]^2 \cdot [2,4 \cdot 70]^{2/3}] + 0,29 [0,8[(22,95+1+15)70]^{2/3} \cdot \\ &\quad [2,4 \cdot 70]^{2/3}]^2 \\ &= 2.634.531 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Selanjutnya perhitungan *collection volume* untuk gedung tipe 2-7 dengan variasi arus secara lengkap terdapat pada lampiran D.



Gambar 4.9 *Collection volume* vs arus datang petir di gedung-gedung fakultas teknik

Besar volume pada gambar (4.9) bergantung pada besar arus petir, jarak sambaran dan ketinggian bangunan. Semakin tinggi bangunan, maka *collection volume* akan semakin besar. Oleh karena itu petir akan lebih cenderung menyambar bangunan yang lebih tinggi akibat *collection volume* yang semakin besar pula. Sehingga dari proses-proses penaksiran resiko diatas, penentuan letak proteksi eksternal pada suatu bangunan yang tinggi sangat mempengaruhi besar jarak sambaran yang bertujuan untuk menentukan *attractive area*, yaitu luas area yang memiliki kemungkinan tersambar oleh petir. Lalu besar *collection volume* merupakan ruangan yang akan mengantarkan petir menuju proteksi eksternal petir pada suatu bangunan jika petir telah memasuki *collection volume*-nya. Dan selanjutnya besar sudut perlindungan yang bergantung pada *attractive radius* dan ketinggian bangunan memberikan suatu batasan perlindungan dari sambaran petir pada benda, manusia atau bangunan disekitarnya. Besar variasi sudut perlindungan berdasarkan perhitungan terlihat pada grafik dibawah ini. Berikut contoh perhitungan sudut perlindungan untuk bangunan tipe 1:

$$\theta_s = \arctan \left\{ \frac{0,47 [(h + 15)i_0]^{2/3}}{h} \right\}$$

Arus 10 KA =

$$\theta_s = \arctan \left\{ \frac{0,47 [(22,95+1+15)10]^{2/3}}{22,95+1} \right\} = 46,31^\circ$$

Arus 20 KA =

$$\theta_s = \arctan \left\{ \frac{0,47 [(22,95+1+15)20]^{2/3}}{22,95+1} \right\} = 58,97^\circ$$

Arus 30 KA =

$$\theta_s = \arctan \left\{ \frac{0,47 [(22,95+1+15)30]^{2/3}}{22,95+1} \right\} = 65,33^\circ$$

Arus 40 KA =

$$\theta_s = \arctan \left\{ \frac{0,47 [(22,95+1+15)40]^{2/3}}{22,95+1} \right\} = 69,23^\circ$$

Arus 50 KA =

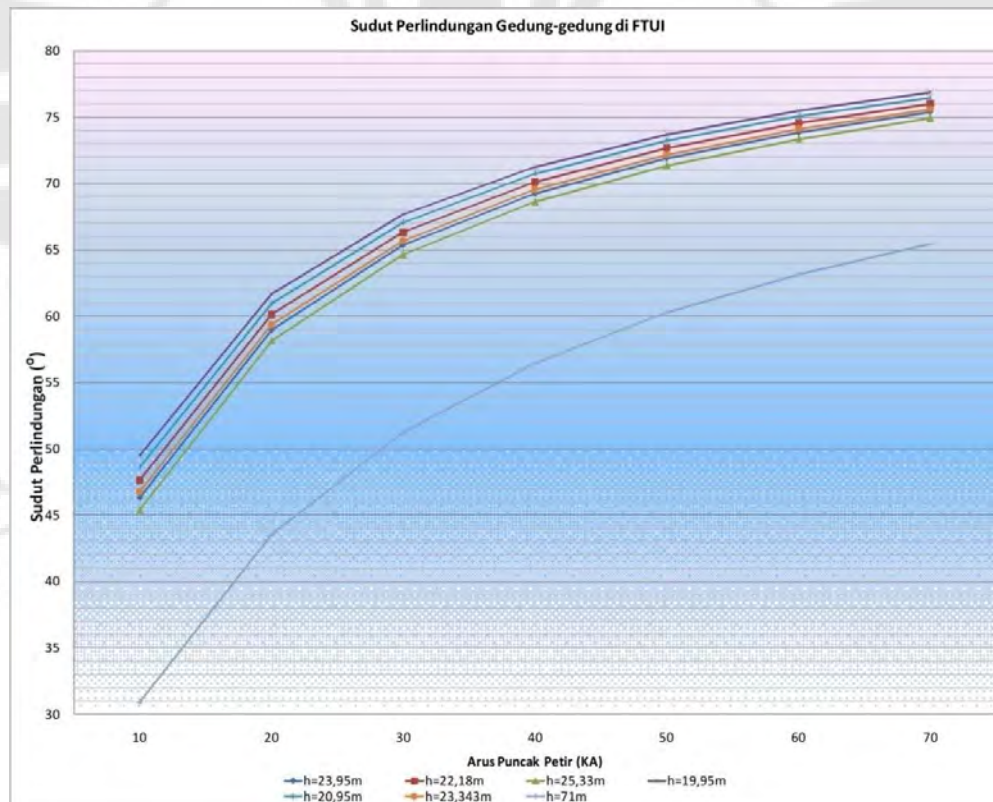
$$\theta_s = \arctan \left\{ \frac{0,47 [(22,95+1+15)50]^{2/3}}{22,95+1} \right\} = 71,90^\circ$$

Arus 60 KA =

$$\theta_s = \arctan \left\{ \frac{0,47 [(22,95+1+15)60]^{2/3}}{22,95+1} \right\} = 73,86^\circ$$

Arus 70 KA =

$$\theta_s = \arctan \left\{ \frac{0,47 [(22,95+1+15)70]^{2/3}}{22,95+1} \right\} = 75,37^\circ$$



Gambar 4.10 Sudut perlindungan vs sudut datang petir di gedung-gedung fakultas teknik

Perhitungan sudut perlindungan (gambar 4.10) untuk gedung tipe 2-7 dengan variasi arus secara lengkap terdapat pada lampiran D. Besar sudut perlindungan merupakan representasi dari area yang dilindungi terminal udara dari sambaran petir langsung. Sehingga manusia atau objek yang berada di dalam wilayah sudut perlindungan, tidak akan tersambar petir. Sudut perlindungan pada metode *collection volume* memiliki besar yang tidak seragam, bergantung pada besar arus dan ketinggian bangunan atau struktur yang memiliki sistem proteksi eksternal. Semakin besar arus petir, maka sudut perlindungan terhadap manusia atau objek yang berada di daerah perlindungannya akan semakin besar. Dan semakin tinggi bangunan, akan memiliki sudut perlindungan yang semakin kecil. Karena besar sudut perlindungan pada metode *collection volume* bergantung pada *maximum lateral displacement*-nya dan ketinggian bangunan. Dari gambar (4.10) terlihat bahwa sudut perlindungan terbesar terdapat pada gedung teknik sipil sebesar $49,45^\circ$ dan sudut perlindungan terkecil adalah menara RTC sebesar $30,90^\circ$.

Sudut perlindungan yang berbeda-beda berdasarkan karakteristik arus petir dan ketinggian benda memberikan perhatian lebih pada struktur bangunan. Berbeda dengan metode konvensional yang selama ini cenderung mengaplikasikan besar sudut perlindungan sama pada semua struktur bangunan. Begitupun pada metode bola berguling yang memberikan area perlindungan yang besarnya sama dengan hasil pergulingan bola dengan jari-jari yang tetap.

4.4 METODE *COLLECTION SURFACE*

Dalam penentuan letak finial, penulis tidak hanya mempertimbangkan hanya dari satu metode saja, dengan mengkolaborasikan dua metode yaitu *collection volume* dan *collection surface*, akan didapat suatu bentuk keputusan yang lebih meyakinkan. Pada karya tulis ini lebih banyak ditekankan pada metode *collection volume*, selanjutnya akan dijelaskan secara singkat mengenai metode *collection surface*.

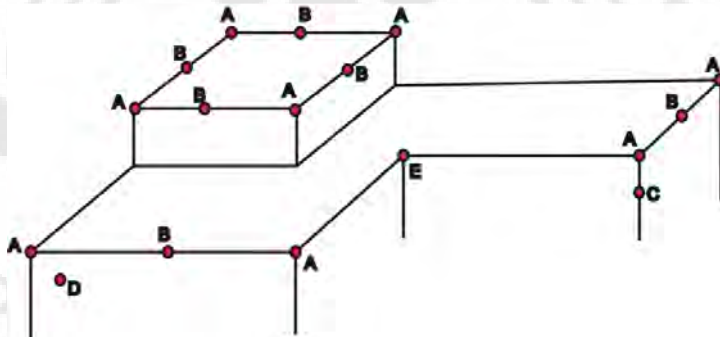
Metode *collection surface* merupakan salah satu metode pembaruan dari metode-metode yang telah ada sebelumnya seperti metode konvensional, metode sangkar faraday, dan lain-lain. Munculnya metode ini lebih disebabkan karena

tingkat efektivitas metode-metode terdahulu sangat meragukan. Karena beberapa gedung yang telah dipasang suatu sistem proteksi, masih didapati gedung yang tersambar oleh sambaran langsung. Salah satu cara untuk mengembangkan keefektivitasan suatu disain proteksi petir adalah dengan mempelajari pola bahaya sambaran pada suatu bangunan dan struktur yang nyata.

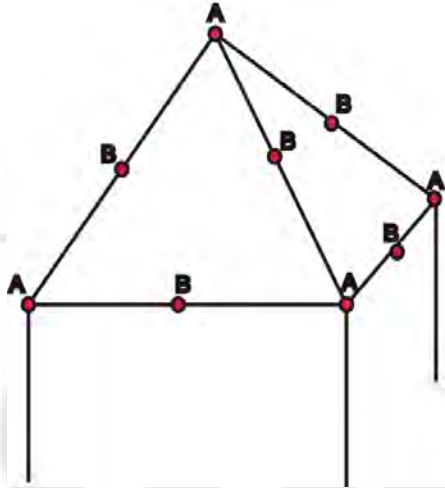
Untuk menilai keefektivitasan metode *collection surface*, metode ini telah didemonstrasikan pada lokasi-lokasi dengan nilai resiko sambaran petir yang tinggi. Setelah mempelajari sekitar selusin bangunan yang tersambar secara berulang-ulang pada jangka waktu tertentu, diapat satu output yang signifikan, yaitu bahwa tidak ada titik pasti yang dapat dipastikan tersambar petir, namun probablilitas terbesar terletak pada ujung runcing bangunan (sudut) dan sekitarnya [3]. Berikut ini tabel dan gambar yang menggambarkan tingkat keseringan terjadinya sambaran petir yang direpresentasikan dalam bentuk persentase.

Lokasi Kerusakan Akibat Sambaran Petir	Persentasi Kemungkinan Terjadi
(A) Titik Tajam/ Sudut yang menonjol	> 90
(B) Horizontal/ permukaan yang miring	< 5
(C) Permukaan vertikal (bawah A)	< 2
(D) Permukaan rata (dekat A)	< 1
(E) Sudut yang menjorok ke dalam,dll	0

Tabel 4.6 . Persentasi lokasi kemungkinan terjadinya kerusakan akibat sambaran petir.



Gambar 4.11 Distribusi dari pengamatan bahaya sambaran petir pada gedung yang beratap rata dengan sudut empat persegi panjang.



Gambar 4.12 Distribusi dari pengamatan bahaya sambaran petir pada gedung yang beratap miring.

Dari data dan gambar pada metode *collection surface*, dapat memberikan suatu tambahan pertimbangan pemasangan atau peletakan terminal udara lebih akurat dan lebih meyakinkan. Keuntungan paling utama dari metode ini adalah metode ini yang memungkinkan untuk diterapkan pada bangunan dan struktur yang berada pada sekitar bangunan utama yang akan diproteksi.

4.5 RANCANG BANGUN TERMINAL UDARA, VOLUME PENANGKAPAN DAN SUDUT PERLINDUNGAN

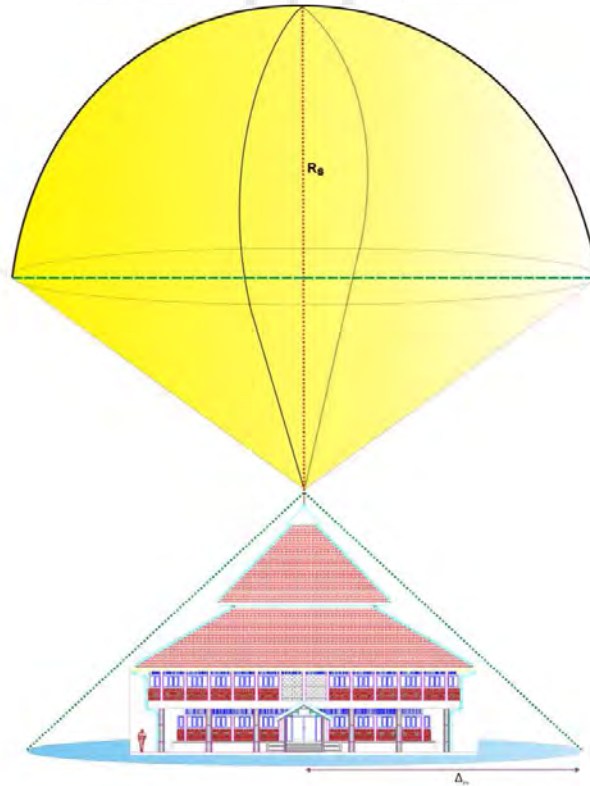
Langkah-langkah yang diperlukan dalam proses penentuan letak titik terminal udara dengan menggunakan metode *collection volume* adalah :

1. Mencari besarnya *maximum lateral displacement* sebagai *attractive area*-nya. (Besarnya sudut datang = 0° , arus petir = 10 KA, dan muatan = 0,9 C)

$$I_p = 10,6Q^{0,7} \quad [4.1]$$

2. Bentuk permukaan dari proteksinya adalah lingkaran, sehingga menjadikan *maximum lateral displacement* sebagai jari-jarinya dan selanjutnya mencari luas permukaan yang dapat diproteksi oleh terminal udara.
3. Menggambar *collection volume*-nya.
4. Menentukan letak pemasangan terminal udara berdasarkan bentuk *collection volume*, *attractive area*, sudut perlindungan dan *collection surface*.

Setelah melakukan perhitungan mengenai desain proteksi eksternal sambaran petir (finial), desain letak terminal udara yang memungkinkan pada gedung-gedung di Fakultas Teknik Universitas Indonesia yaitu:



Gambar 4.13 Letak peletakan terminal udara pada gedung dekanat berdasarkan *collection volume*, *attractive area*, sudut perlindungan dan *collection surface*.

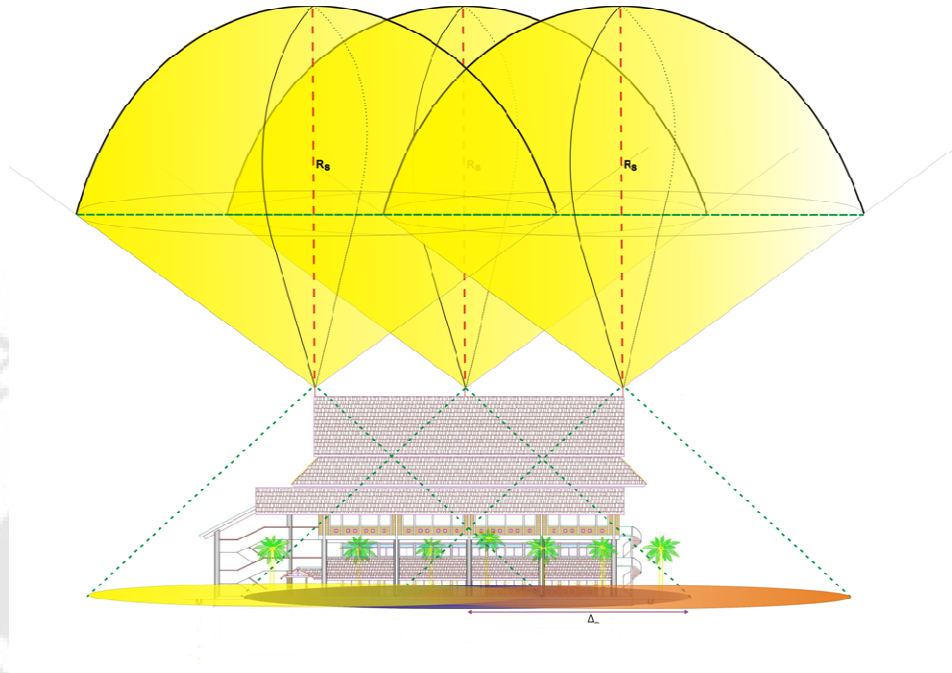
Keterangan gambar 4.13:

Jarak sambaran = 41,36 m

Attractive radius = 24,41 m

Sudut perlindungan = 47,61 °

Collection volume = 49.662,86 m³



Gambar 4.14 Letak peletakan terminal udara pada gedung PAF berdasarkan *collection volume*, *attractive area*, sudut perlindungan dan *collection surface*.

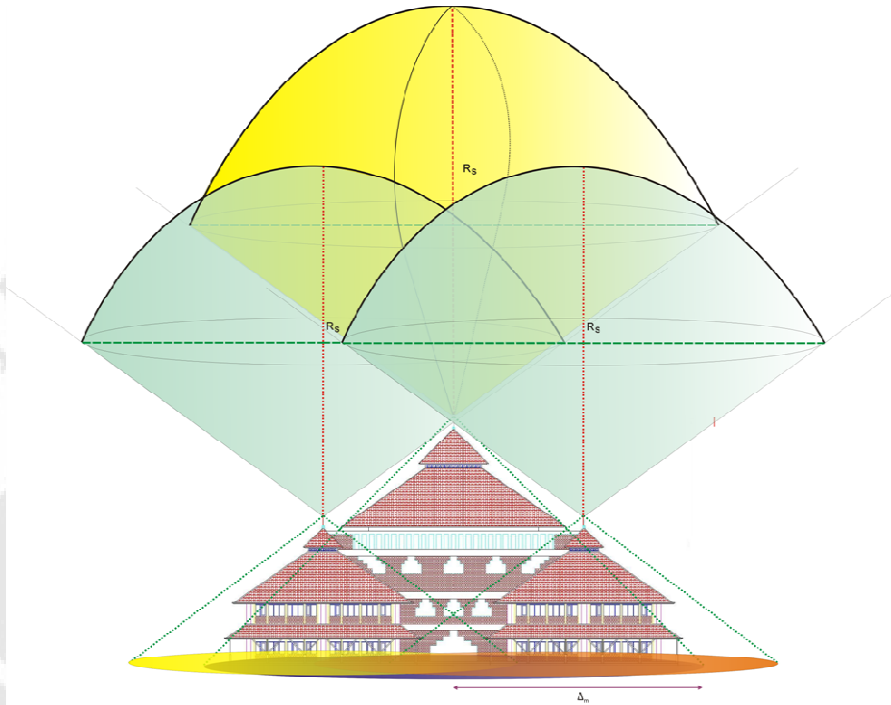
Keterangan gambar 4.14:

Jarak sambaran = 42,22 m

Attractive radius = 24,91 m

Sudut perlindungan = 46,74°

Collection volume = 52.341,42 m³



Gambar 4.15 Letak peletakan terminal udara pada gedung kuliah bersama berdasarkan *collection volume*, *attractive area*, sudut perlindungan dan *collection surface*.

Keterangan gambar 4.15:

a. Ketinggian 24,33 m diatas permukaan tanah :

Jarak sambaran = 43,38 m

Attractive radius = 25,76 m

Sudut perlindungan = 45,37°

Collection volume = 57.072,11 m³

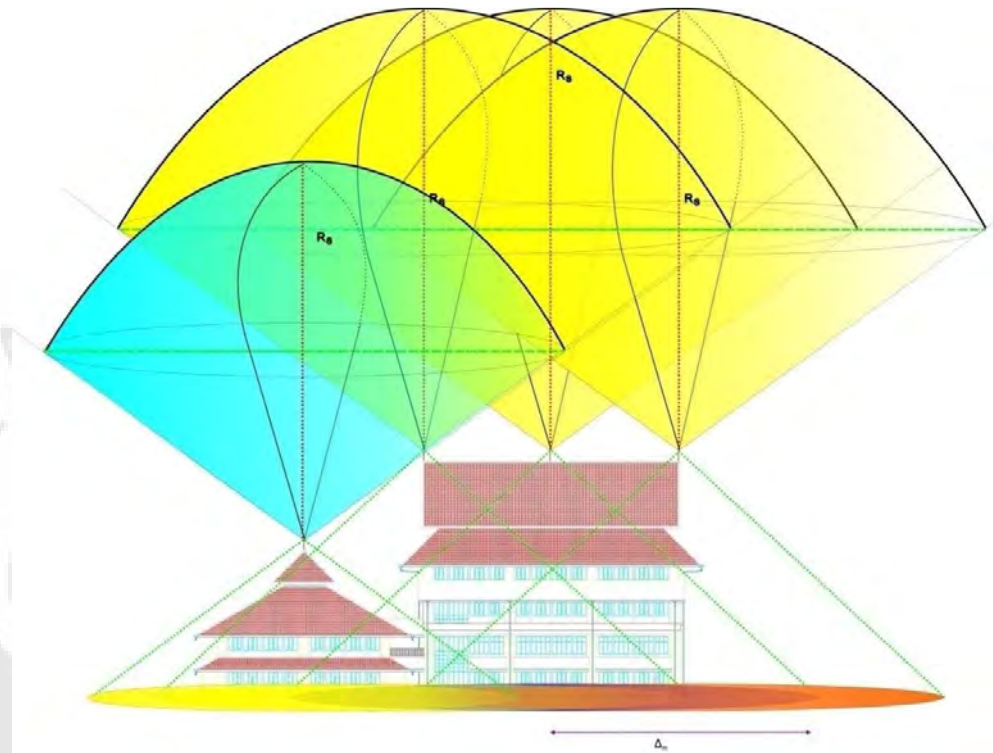
b. Ketinggian 15,73 m diatas permukaan tanah :

Jarak sambaran = 36,44 m

Attractive radius = 21,49 m

Sudut perlindungan = 53,68°

Collection volume = 36.023,90 m³



Gambar 4.16 Letak peletakan terminal udara pada gedung departemen teknik Elektro, departemen teknik Mesin, departemen teknik Metalurgi, departemen teknik Kimia, dan departemen teknik Industri berdasarkan *collection volume*, *attractive area*, sudut perlindungan dan *collection surface*.

Keterangan gambar 4.16:

a. Ketinggian 22,95m di atas permukaan tanah:

Jarak sambaran = 42,67 m

Attractive radius = 25,17 m

Sudut perlindungan = 46,31°

Collection volume = 53.765,94 m³

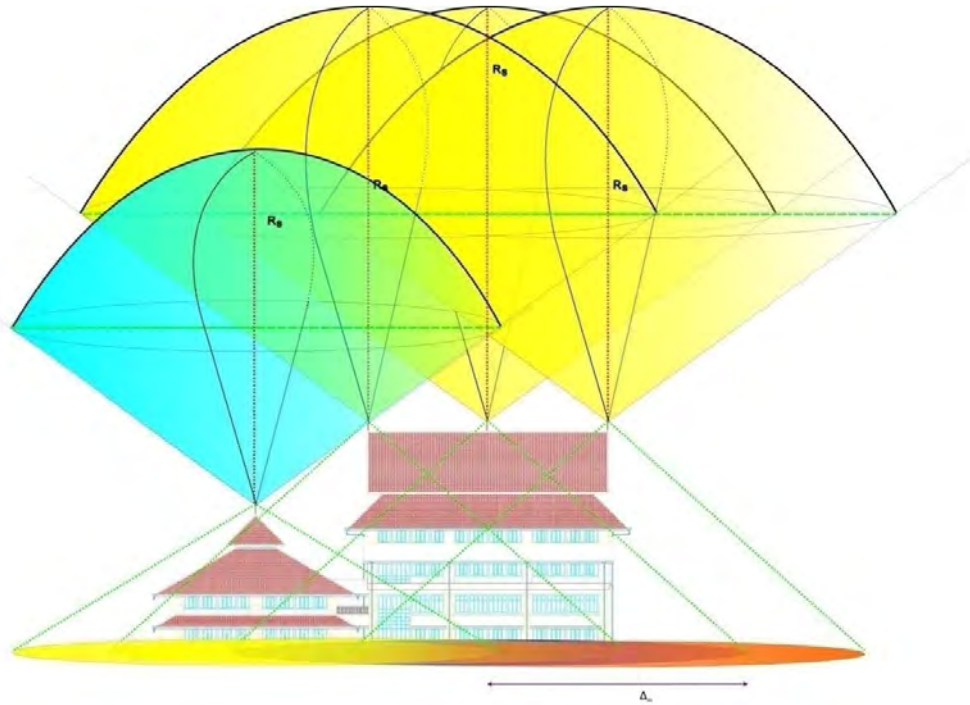
b. Ketinggian 15,11 diatas permukaan tanah:

Jarak sambaran = 36,73 m

Attractive radius = 21,67 m

Sudut perlindungan = 53,25°

Collection volume = 36770,07m³



Gambar 4.17 Letak peletakan terminal udara pada gedung teknik Sipil berdasarkan *collection volume*, *attractive area*, sudut perlindungan dan *collection surface*.

Keterangan gambar 4.17:

a. Ketinggian 18,95m di atas permukaan tanah:

Jarak sambaran = 39,69 m

Attractive radius = 23,42 m

Sudut perlindungan = 49,45°

Collection volume = 44.713,88 m³

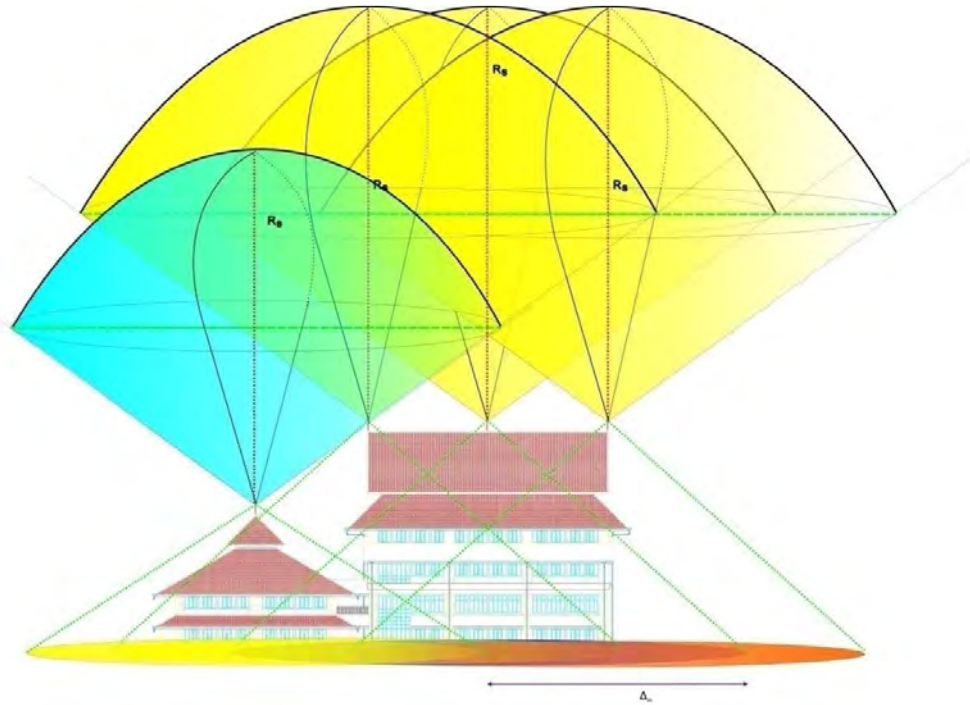
b. Ketinggian 11,11 di atas permukaan tanah:

Jarak sambaran = 33,51 m

Attractive radius = 19,77 m

Sudut perlindungan = 58,4°

Collection volume = 29277,9 m³



Gambar 4.18 Letak peletakan terminal udara pada gedung teknik Arsitektur berdasarkan *collection volume*, *attractive area*, sudut perlindungan dan *collection surface*.

Keterangan gambar 4.18:

a. Ketinggian 19,95m di atas permukaan tanah:

Jarak sambaran = 40,45 m

Attractive radius = 23,86 m

Sudut perlindungan = 48,6°

Collection volume = 46,90 m³

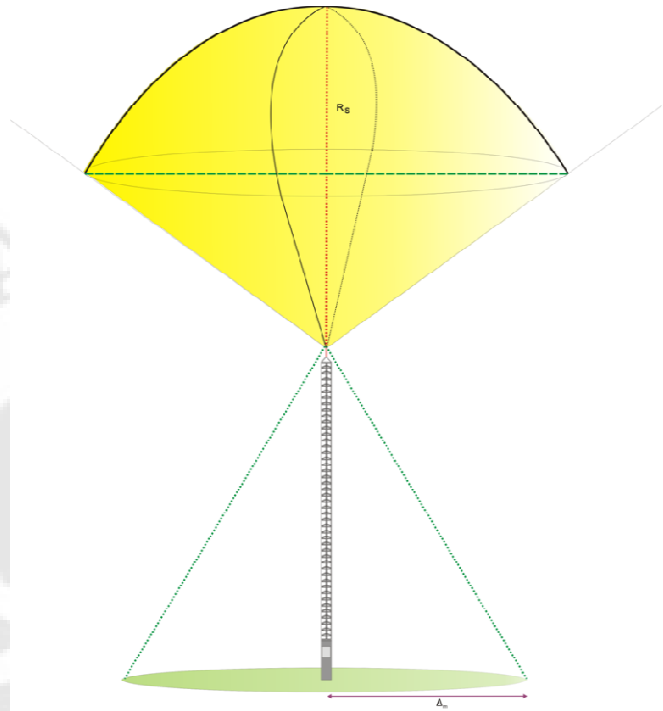
b. Ketinggian 12,11 di atas permukaan tanah:

Jarak sambaran = 34,33m

Attractive radius = 20,25m

Sudut perlindungan = 56,97°

Collection volume = 31075,76m³



Gambar 4.19 Letak peletakan terminal udara pada menara RTC UI 107,9 FM berdasarkan *collection volume*, *attractive area*, sudut perlindungan dan *collection surface*.

Keterangan gambar 4.19:

Jarak sambaran = 72,35 m

Attractive radius = 42,68 m

Sudut perlindungan = 30,91°

Collection volume = 218.654,6 m³



Gambar 4.20 Area proteksi gedung-gedung di FTUI

Keterangan :

- = Area proteksi final menurut metode *collection volume* pada gedung-gedung FT UI.
- = Area proteksi final menurut metode *collection volume* pada menara RTC UI 107,9 FM.
- = Letak pemasangan terminal udara.

Dari desain peletakan terminal udara pada gambar (4.13) hingga (4.19) ternyata gedung-gedung di FTUI memiliki kebutuhan proteksi eksternal yang berbeda-beda. Jarak sambaran yang digunakan dalam menentukan besar *collection volume* ketika arus petir 10kA, karena volume yang paling efisien adalah ketika memenuhi standar minimum level proteksi dan keamanan orang disekitar dengan biaya seminimum mungkin.

Dari analisa yang telah dipaparkan diatas dalam menerapkan metode *collection volume*, terlihat bahwa sistem proteksi eksternal yang hingga saat ini terpasang pada gedung-gedung di fakultas teknik dinilai tidak efisien. Peletakan terminal udara yang berlebihan merupakan hal yang sia-sia. Terdapat juga terminal udara yang rusak atau patah pada gedung departemen teknik kimia tidak dilakukan perbaikan. Pemasangan terminal udara berdasarkan tingkat ke-efisienan terburuk ada pada gedung departemen mesin, arsitektur, dan metalurgi yang memiliki 9 terminal udara terpasang sementara menurut metode *collection volume* hanya membutuhkan 3 terminal udara. Dan pemasangan terminal udara terbaik ada pada menara RTC yaitu 1 terminal udara. Pemasangan terminal udara pada menara RTC dinilai efektif dan efisien karena memiliki *attractive area* yang terbesar di wilayah FTUI, sehingga memiliki kemungkinan tersambar petir lebih besar.

Pada saat ini keadaan sistem proteksi eksternal di wilayah FTUI pada beberapa bangunan telah beroperasi lebih dari 15 tahun dan cenderung tidak terawat, seperti pada gedung departemen teknik kimia terdapat finial yang patah. Mengacu pada IEC 1024-1 : 1993, jadual evaluasi sistem proteksi petir adalah :

LEVEL PROTEKSI	Interval Evaluasi	
	Sistem Proteksi Lengkap	Sistem Proteksi Tertentu (kritis)
I	2 tahun	6 bulan
II	4 tahun	12 bulan
III,IV	6 tahun	12 bulan

Tabel 4.7. Jadual evaluasi sistem proteksi petir

Evaluasi ini dilakukan untuk memeriksa penginstalasi-an sistem proteksi eksternal petir dan unjuk kerja secara keseluruhan. Seperti pada sub-bab 4.2 dijelaskan bahwa level proteksi untuk bangunan di FTUI adalah level III, dan level I untuk menara RTC.

Pemasangan teminal udara di FTUI masih menggunakan metode yang lama, sehingga perlu dilakukan pemasangan terminal udara berdasarkan metode yang *up-to-date*. **Tidak ada** proteksi sambaran petir yang memiliki efisiensi 100%. Hal tersebut merupakan suatu yang vital dan harus bisa kita pahami.

Perkembangan ilmu pengetahuan hanya akan dapat meminimalisasi dan mentaksir akan bahaya dan kerugian sambaran petir hingga sekecil mungkin.

Metode *collection volume* dan *collection surface* telah merujuk kepada suatu desain penentuan letak pemasangan terminal udara pada gedung-gedung di Fakultas Teknik Universitas Indonesia sesuai gambar (4.13) hingga (4.20). terlihat pada tabel 4.8 :

Gedung/Struktur	Terminal Udara	
	Saat ini Terpasang	Berdasarkan Metode <i>Collection Volume</i>
Gedung Dekanat	1 buah	1 buah
Gedung PAF	5 buah	3 buah
Gedung Kuliah Bersama	1 buah	5 buah
Gedung Departemen Elektro	5 buah	4 buah
Gedung Departemen Mesin	9 buah	4 buah
Gedung Departemen Metalurgi	9 buah	4 buah
Gedung Departemen T. Kimia	5 buah	4 buah
Gedung Departemen Industri	4 buah	4 buah
Gedung Departemen Sipil	7 buah	4 buah
Gedung Departemen Arsitektur	9 buah	4 buah
Menara RTC UI	1 buah	1 buah

Tabel 4.8 Perbandingan kebutuhan terminal udara yang terpasang dengan berdasarkan *metode collection volume*.

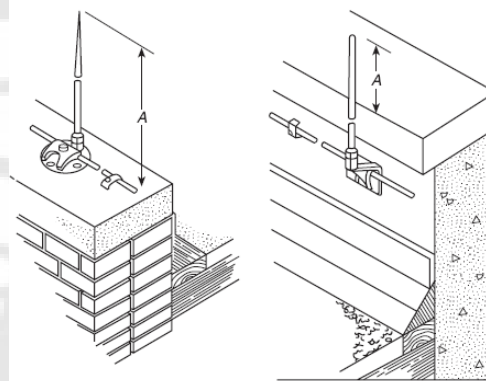
selain letak pemasangan, ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam menentukan jenis terminal udara yang akan dipasang.

Dengan memperhatikan hari guruh di wilayah depok tergolong sangat tinggi, dan sesuai analisa IEC standar gedung-gedung di Fakultas Teknik Universitas Indonesia, maka diperlukan konfigurasi terminal udara sesuai dengan standar minimum kebutuhan material kelas 2 (NFPA 780). Sesuai dengan tabel dibawah ini:

Type of Conductor	Parameter	Copper		Aluminum	
		English	Metric	English	Metric
Air terminal, solid	Diameter	1/2 in.	12.7 mm	5/8 in.	15.9 mm
Main conductor, cable	Size ea. strand	15 AWG		13 AWG	
	Wgt. per length	375 lb/1000 ft	558 g/m	190 lb/1000 ft	283 g/m
	Cross sect. area	115,000 CM	58 mm ²	192,000 CM	97 mm ²
Bonding conductor, cable (solid or stranded)	Size ea. strand	17 AWG		14 AWG	
	Cross sect. area	26,240 CM		41,100 CM	
Bonding conductor, solid strip	Thickness	0.051 in.	1.30 mm	0.064 in.	1.63 mm
	Width	1/2 in.	12.7 mm	1/2 in.	12.7 mm

Tabel 4.8 Standar minimum material kelas 2.

Perangkat terminal udara pun harus dilengkapi dengan beberapa bagian penyokong terminal udara. Seperti bagian ujung dari terminal udara tidak boleh kurang dari 254 mm (10 in). Bagian ujung dari terminal udara dapat berbentuk runcing atau tumpul.



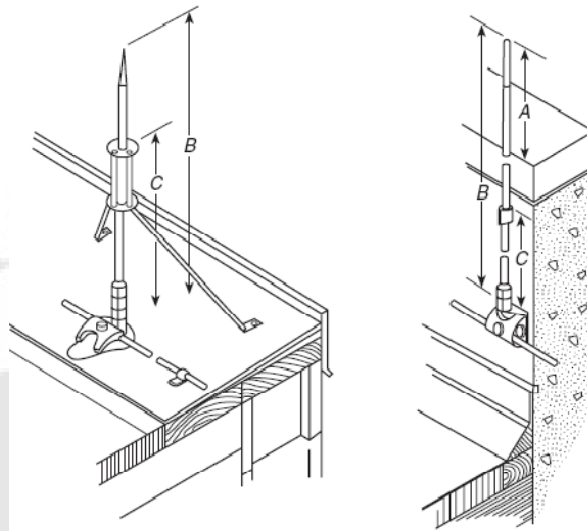
A: 10 in. (254 mm)

Gambar 4.21 Tinggi terminal udara

Selain itu terminal udara membutuhkan sokongan agar dapat berdiri kokoh dan tidak terguling dari posisinya. Pemasangan sokongan terminal udara dapat berupa:

- (a) mengikatkan/mencantelkan ke objek yang diproteksi
- (b) menggunakan penjepit/penahan secara permanen dan kaku pada bangunan

Untuk terminal udara yang tingginya melebihi 600 mm (24 in) di atas bangunan atau struktur yang diproteksi harus memiliki penyokong dengan tinggi yang tidak kurang dari satu setengah kali tinggi terminal udaranya.



- A: 24 in. (600 mm).
- B: Air terminals over 24 in. (600 mm) high are supported.
- C: Air terminal supports are located at a point not less than one-half the height of the air terminal.

Gambar 4.22 Penyokong terminal udara

Pada desain terminal udara yang digunakan oleh penulis adalah sebesar 1m, sehingga memenuhi standar penentuan terminal udara menurut versi NFPA.

BAB V

KESIMPULAN

1. Besar jarak sambaran berdasarkan metode *collection volume* dipengaruhi oleh besarnya kuat arus petir, sudut datang petir, dan tinggi bangunan yang akan diproteksi.
2. Jarak sambaran terbesar di FTUI ada pada menara RTC sebesar 72,35 m dan jarak sambaran terkecil ada pada gedung departemen teknik sipil sebesar 33,51 m namun sudut perlindungan terbesar ada pada gedung teknik sipil sebesar $58,4^\circ$ dan sudut perlindungan terkecil ada pada menara RTC sebesar $30,9^\circ$.
3. Berbeda dengan metode konvensional dan bola berguling, besar sudut perlindungan volume suatu bangunan berdasarkan metode *collection volume* dipengaruhi oleh ketinggian bangunan dan besar arus petir.
4. Pemasangan proteksi terminal udara pada gedung di wilayah FTUI dinilai tidak efisien, karena jumlah terminal udara terpasang pada bangunan lebih banyak daripada perhitungan dan analisa melalui metode *collection volume*.
5. Sistem proteksi eksternal pada gedung-gedung dan struktur di wilayah FTUI sudah memerlukan perawatan dan evaluasi unjuk kerjanya untuk selanjutnya menerapkan metode yang up-to-date dalam hal ini metode *collection volume*.

DAFTAR ACUAN

- [1] Iwa Garniwa M.K, "Sistem Penangkal Petir dan Pentanahan", (Depok: Laboratorium Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik (LTTPL))
- [2] T. Horvarth, "Rolling Sphere-Theory and Application," 25th ICLP, 2000 : hal 301-305
- [3] Z.A Hartono, I Robiah, "The Collection Surface Concept As a Reliable Method for Predicting The Lightning Strike Location," 25th ICLP, Greece, 2000 : hal 328-333
- [4] F.D'Alessandro, J.R Gumley, "The Development of The Three Dimensional "COLLECTION VOLUME METHOD" as an Improves Electrogeometric Model for The Protection of Structures," 25th ICLP, 2000 : hal 311-317
- [5] N.I. Petrov, G.N Petrov, R.T Waters, "Determination of Attractive-Area and Collection Volume of Earthed Structure," 25th ICLP,Greece, 2000 : hal 374-379
- [6] Syamsir Abduh, "Fenomena Petir", Jakarta: Penerbit Universitas Trisakti,2004.
- [7] Syakur, Abdul, "Sistem Proteksi Penangkal Petir pada Gedung Widya Puraya," Jurnal Teknik Elektro Fakultas Teknik UNDIP, Juni 2006: hal 35-39
- [8] Proctor, D.E., 1971, A hyperbolic system for obtaining VHF radio pictures of lightning, J. Geophys. Res., 76, 1478-1489
- [9] IEC,"Assessment of The Risk of Damage due to Lightning". IEC No.1662, Desember 1995.
- [10] www.jstor.org/stable/52774?seq=4&Search=yes&term=%22n+i+petrov+%22&list=hide&searchUri=%2Faction%2FdoBasicSearch%3FSearch%3DSearch%26Query%3Dau%3A%2522N.%2520I.%2520Petrov%2522&item=2&ttl=2&returnArticleService=showArticle
- [11]F.D'alessandro," A Modern Perspective on Direct Strike Lightning Protection",ERICO lightning Technologies, Australia.
- [12] N.I. Petrov,R.T. Waters, Determination of the striking distance of lightning to earthed structures. Proc. Roy. Soc. A, 1995, v.450, 589-601

- [13] NFPA 780,” Standard for the installation of lightning protection systems”. Quincy 2000.
- [14] R.Zoro ,W.Arismunandar, “Ancaman impuls elektromagnetik dari petir pada instalasi berbasis elektronika dalam industri dengan teknologi maju di Indonesia,”PT Lapi Elpatsindo.
- [15] R.Zoro, R. Mefiardhi, “ Statistik data petir dari sistem deteksi petir: Pemanfaatannya sebagai data petir lokal untuk pemakaian engineering?”, Bandung: ITB.
- [16]Indriani, Astried, “Evaluasi sistem proteksi petir konvensional gedung bertingkat (Perkantoran) studi kasus rektorat Universitas Indonesia,” Departemen Elektro UI, Depok:2001.

LAMPIRAN A

Perhitungan Resiko Sambaran Petir dengan IEC 1662 : 1995 untuk Pemilihan Level Proteksi Sistem Proteksi Petir (IEC 1024-1-1 : 1993)

I. Perhitungan Parameter Sambaran Petir

1. Perhitungan Jumlah Sambaran Petir ke Gedung

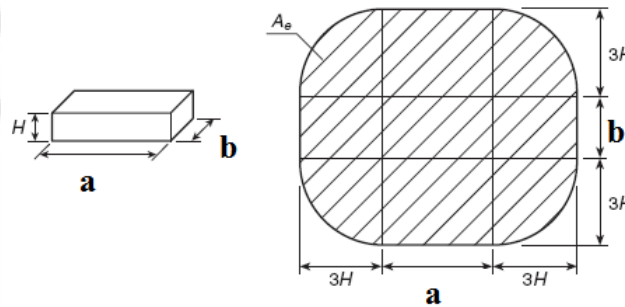
$$N_d = N_g \cdot A_e \dots \dots \dots [a-1]$$

Dengan :

N_d = jumlah sambaran petir ke gedung

N_g = kerapatan sambaran petir ke tanah

A_e = area koleksi efektif, besar A_e yang merupakan luas daerah perlindungan efektif pada suatu gedung didapat melalui:



Gambar A.1. Area koleksi

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

a. $N_g = 4 \cdot 10^{-2} \cdot T^{1.26}$ (sambaran per km² pertahun).....[a-3]

dengan :

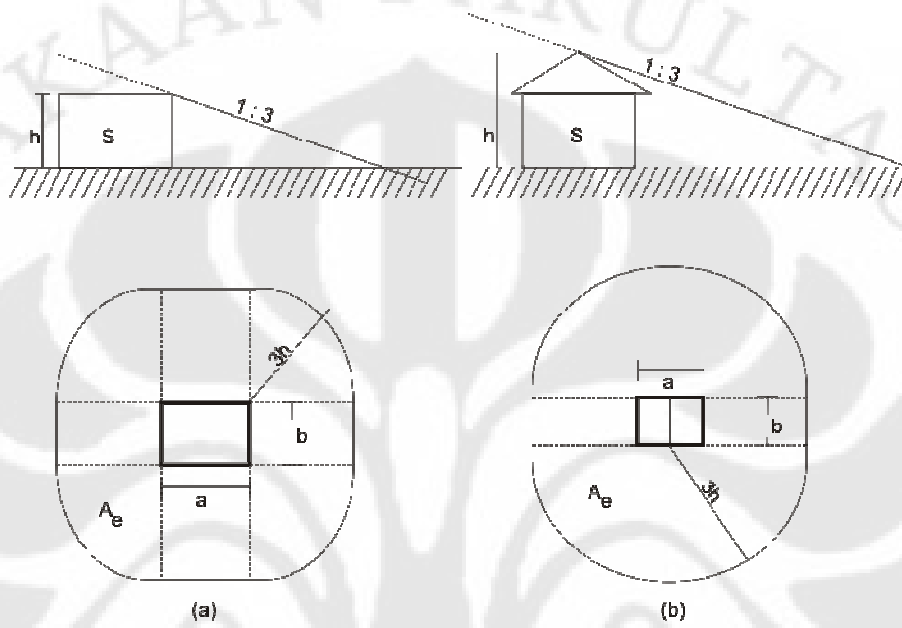
T = jumlah hari guruh pertahun berdasarkan IKL

b. Area kolektif efektif, diperoleh dari penentuan titik ujung area sekitar gedung yang sebanding dengan 3 (tiga) kali ketinggian gedung. Lihat gambar (A.2).

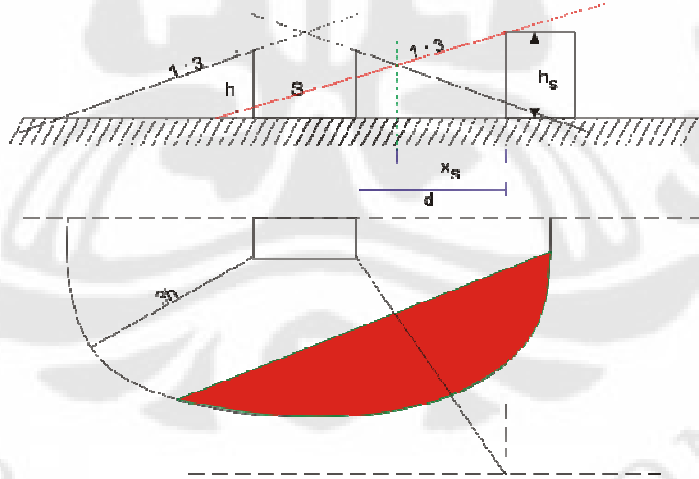
Jika area koleksi efektif A_e ini saling bertumpukan dengan area koleksi efektif gedung lain maka A_e yang sudah terbentuk dikurangi dengan area tumpukan A_{ov} yang dapat ditentukan dengan perhitungan dan gambar. Penentuan area tumpukan A_{ov} diawali dengan penentuan garis X_s . X_s merupakan jarak dari gedung lain ke titik di area A_e di gedung ini. X_s diperoleh melalui perhitungan :

$$X_s = \frac{d+3(h_s-h)}{2} \dots\dots\dots [a-4]$$

Dari titik X_s ditarik garis yang tegak lurus dengan garis d_s hingga menyentuh batas A_e . Daerah tumpukan A_{ov} terlihat pada gambar (A.3) dan area koleksi sebenarnya efektif adalah sebesar $[A_e - A_{ov}]$.



Gambar A.2. Area koleksi efektif A_e
 (a) untuk gedung beratap rata (b) untuk beratap sudut



Gambar A.3. Area tumpukan A_{ov} (berwarna merah), area efektif A_e (tidak berwarna)

2. Perhitungan Jumlah Sambaran ke Tanah dekat/di sekitar gedung

$$N_n = N_g \cdot A_g \dots \dots \dots [a-5]$$

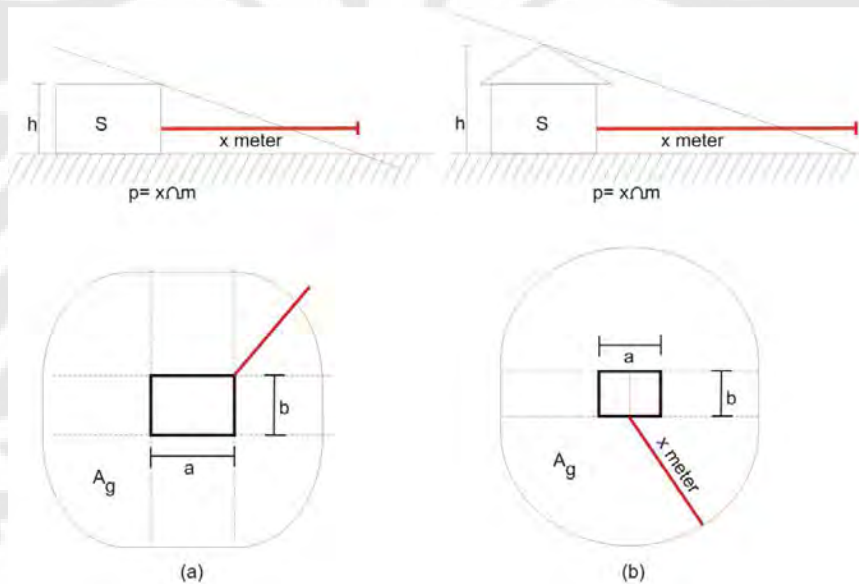
Dengan :

N_n = jumlah sambaran ke tanah dekat gedung

N_g = kerapatan sambaran ke tanah

A_g = area koleksi tanah di sekitar gedung

Area koleksi tanah tidak sama dengan area koleksi efektif. A_g adalah area di sekitar gedung dimana terjadi sambaran ke tanah yang dapat menyebabkan peningkatan atau pergeseran posisi potensial tanah yang dapat mempengaruhi gedung atau sistem-sistem layanan yang masuk ke gedung. Jika A_e , titik ujung area sebanding dengan nilai numeral tahanan tanah spesifik $\rho[\Omega m]$ dalam satuan meter. Kesebandingan numeral ini memiliki besaran maksimum 500. Lihat gambar (A.4).



Gambar A.4. Area koleksi tanah A_g
 (a) untuk gedung beratap rata (b) untuk gedung beratap sudut

3. Perhitungan Jumlah Sambaran Petir yang Mempengaruhi Sistem Layanan yang Masuk ke dalam Gedung.

Seperti kita ketahui sistem layanan yang masuk ke dalam gedung contohnya berupa penghantar suplai tenaga listrik dari gardu atau tiang listrik,

sambungan telepon dan jaringan komputer. Besar frekuensi sambaran petir yang mempengaruhi Instalasi jasa umum (IJU) dirumuskan sebagai:

$$N_k = N_g \cdot A_k \dots \dots \dots [A.6]$$

$$A_k = A_{sk} + A_{ak} \dots \dots \dots [A.7]$$

Dimana:

N_g = frekuensi sambaran petir ke tanah per tahun

A_k = luas daerah yang masih mendapat suplai instalasi jasa umum

A_{sk} = luas daerah yang memuat perangkat IJU

A_{ak} = luas gedung yang berdekatan dan terhubung secara langsung maupun tidak langsung dengan jaringan IJU yang sama dengan gedung yang sedang ditinjau

Untuk perhitungan luas jangkauan efektif sebuah IJU (A_{sk}) dapat dilihat melalui tabel (A-1):

TABEL A-1

Jenis kabel penyalur utama	Luas area efektif (m ²)
SUTR	2000 x L
SUTT	500 x L
SBTTR	2 x d _s x L
SBTTT	0,1 x d _s x L
Saluran udara sinyal	2000 x L
Bawah tanah sinyal	2 x d _s x L
Fiber optik tanpa pelindung metalik	0
Catatan: 1. L adalah panjang kabel dari gedung bersangkutan ke titik cabang atau gedung lain yang terdekat, dengan panjang maksimum 1000 m. Jika tidak diketahui, asumsikan 1000 m. 2. d _s bernilai maksimum 500 m. 3. Untuk nilai A_{ak} : <ul style="list-style-type: none"> • Jika IJU tidak memakai saluran yang mengandung logam, maka $A_{ak}=0$. • Jika $L < 3h$ (tinggi gedung), maka $A_{ak}=0$. • Untuk penghantar berkas, tiap kabel tunggal diperhitungkan sendiri. 	

Dari tabel perhitungan dapat disimpulkan bahwa saluran udara tegangan rendah (SUTR) memiliki luas efektif untuk resiko tersambar petir lebih besar karena SUTR berada paling dekat dengan gedung-gedung.

II. PERHITUNGAN RESIKO-RESIKO

Perhitungan resiko diawali dengan perhitungan probabilitas kerusakan (P) kemudian dilanjutkan dengan perhitungan frekuensi kerusakan (F). target perhitungan adalah membandingkan hasil perhitungan frekuensi kerusakan F dengan maksimum frekuensi kerusakan yang dapat diterima (F_a). Berkaitan dengan resiko akibat fenomena petir ini maka perbandingan tersebut dapat dipakai sebagai acuan,

- Jika sebagai analisa perancangan sistem proteksi petir untuk suatu gedung akan mendapatkan rekomendasi butuh tidaknya sistem tersebut dan label proteksi jika ternyata membutuhkan sistem proteksi petir.
- Jika sebagai bentuk evaluasi sistem proteksi petir suatu gedung, maka akan mendapatkan pernyataan atau kesimpulan sistem proteksi petir tersebut memenuhi atau tidak.

Frekuensi kerusakan akibat sambaran petir pada suatu gedung dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$F = F_h + F_t + F_o \dots \dots \dots [A.8]$$

Dimana :

F_h = frekuensi untuk tegangan sentuh dan langkah

F_t = frekuensi kerusakan akibat api dan ledakan

F_o = frekuensi kerusakan akibat over voltage

Probabilitas (lemungkinan) kerusakan dijabarkan sebagai berikut ;

1. P_h , probabilitas kerusakan/kecelakaan akibat tegangan sentuh atau langkah
2. P_t , probabilitas kebakaran, ledakan, efek kimia dan efek mekanik yang dipengaruhi oleh probabilitas bahaya spark over yang memicu terjadinya kebakaran atau ledakan (P_t) yang dapat terjadi pada :
 - Instalasi metal (P1)
 - Instalasi listrik dalam gedung (P2)
 - Sistem layanan yang masuk ke gedung (P3)
 - Sistem saluran luar yang masuk ke gedung (P4)
3. P_o , probabilitas bahaya kerusakan berupa tegangan lebih yang dapat terjadi pada instalasi listrik dalam gedung (P2) dan sistem layanan yang masuk ke gedung (P3).

III. MENENTUKAN PROBABILITAS KERUSAKAN

Perhitungan probabilitas ini sangat memerlukan panduan dari IEC 1662:1995, sehingga kita dapat menentukan perhitungan frekuensi kerusakan (F).

III.1. Probabilitas kerusakan oleh Tegangan Sentuh dan Langkah (P_h)

Dalam hal ini hanya tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diperhitungkan, yaitu melalui rumus:

$$P_h = K_h \cdot P'_h \dots \dots \dots [A.9]$$

$P'_h = P_h$ tanpa tindakan proteksi apapun.

K_h = faktor pengurangan sesuai dengan sistem proteksi petir yang terpasang.

P_h dihitung berkaitan dengan tipe permukaan tanah luar gedung dan ada tidaknya peralatan proteksi. Mengenai ketentuan harga P'_h dan K_h dapat dilihat dari tabel (A-2):

TABEL A-2

Jenis permukaan tanah di luar gedung	R_c (k Ω)	P'_h	Tindakan Proteksi	K_h
Humus	< 1	10^{-2}	Tanpa SPP	1
Marmer	1 - 10	10^{-3}	Dengan SPP	1 - E
Kerikil	10 - 100	10^{-4}	Dengan SPP & Memakai Penyalur	0,5(1-E)
Aspal	>100	10^{-5}		

Catatan:

- Jika biasanya tidak ada orang di luar gedung, asumsikan $P'_h = 0$.
- Jika ada lebih dari satu jenis permukaan tanah, pilih yang nilai P'_h -nya paling tinggi.
- Jika ada lebih dari satu proteksi, nilai akhir K_h adalah nilai hasil kali dari semua tindakan proteksi yang ada.

III.2. Probabilitas kerusakan oleh api, ledakan, efek mekanis dan kimiawi (P_{td}).

Kerusakan jenis ini dapat disebabkan sumber S_2 atau S_5 seperti yang telah dikemukakan di awal tadi. Probabilitas yang ada mencakup :

P_t : probabilitas dari percikan yang dipicu oleh api atau ledakan yang berbahaya

P_1 : probabilitas dari percikan berbahaya pada instalasi logam

P_2 : probabilitas dari percikan berbahaya dalam instalasi listrik ke gedung

P_3 : probabilitas dari percikan berbahaya pada IJU

P_4 : probabilitas dari percikan berbahaya pada bagian-bagian konduktif di luar IJU

Untuk sambaran langsung berlaku hanya untuk P_1 , P_2 dan P_4 . Sedangkan yang dapat berlaku pada baik sambaran langsung maupun sambaran tidak langsung adalah P_3 . Perumusan dalam sambaran langsung yang menimbulkan kerusakan berhubungan dengan api, ledakan, efek mekanik dan kimiawi adalah:

$$P_{td} = 1 - [(1 - P_1 P_1)(1 - P_1 P_2)(1 - P_1 P_3)(1 - P_1 P_4)] = P_1 (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) \dots \dots \dots [a.10]$$

Dihitung berkaitan dengan adanya spark over yang memicu terjadinya kebakaran dan ledakan pada instalasi metal, instalasi listrik dalam gedung, sistem layanan ke dala gedung (siste tenaga atau telekomunikasi) dan saluran luar yang masuk ke gedung (misalkan ; pipa air, pipa gas atau pipa buangan).

a. Probabilitas bahaya spark over pemicu kebakaran atau ledakan (P_t)

$$P_t = P'_t k_t \dots \dots \dots [a.11]$$

P_t dihitung berkaitan dengan karakteristik material gedung dan isinya. Sedangkan konstanta k_t merupakan keterangan ada tidaknya peralatan proteksi. Mengenai ketentuan harga P'_t dan k_t dapat dilihat pada tabel (A-3) :

TABEL A-3

Tipe material dan atau isi dalam gedung	P'_t	Fasilitas P3K	K_t
Eksplosif	1	Tabung semprot	0,9
Flammable	10^{-1}	Konstruksional	0,7
Umum	10^{-3}	Otomatis	0,6
Tidak Flammable	10^{-5}	Satuan Pemadam Kebakaran	0,5
Catatan: 1. Tembok, pintu dan lantai anti api; rute keluar yang terlindungi 2. Sistem deteksi dan pemadam api			

b. Probabilitas kerusakan berupa kebakaran dan ledakan pada instalsi metal (P_1) dan pada instlasi gedung (P_2)

$$P_1 = k_1 P'_1 \dots \dots \dots [A.12]$$

$$P_2 = k_2 P'_2 \dots \dots \dots [A.13]$$

Besar P'_1 , P'_2 , k_1 dan k_2 dapat dilihat melalui tabel (A-4) dan (A-5):

TABEL A-4

Jenis Gedung	P'_1 dan P'_2
Batu bata, batu, kayu atau dinding tidak konduktif dan tidak ada sistem proteksi	1
Bingkai logam atau kolom beton bertulang berjarak 10-20 meter atau ada sistem proteksi level V-1V	0,1 - 0,2
Bingkai logam atau kolom beton bertulang berjarak 3-6 meter atau ada sistem proteksi level I-II	0,05 - 0,08
Dinding berlapisan depan berupa logam (metallic facade) atau beton bertulang tanpa jendela atau hanya ada jendela kecil yang kurang dari 20 % luas dinding gedung	0,005 - 0,001

TABEL A-5

Data Proteksi	k_1 dan k_2
Tidak ada pen-shielding-an (kabel tidak diselubungi)	1
Kabel diselubungi atau tidak ada loop	0,1 - 0,01
Kabel diselubungi dan tidak ada loop	0,01 - 0,001
Kabel serat optik tanpa ada unsur logam	0

c. Probabilitas kerusakan berupa kebakaran atau ledakan pada instalasi sistem layanan (P_3) dan pada sistem saluran (P_4) yang masuk gedung.

$$P_3 = k_3 P'_3 \dots \dots \dots [A.14]$$

$$P_4 = k_4 P'_4 \dots \dots \dots [A.15]$$

Harga P'_3 dan P'_4 adalah 1 dan konstanta k_3 dan k_4 merupakan keterangan ada tidaknya peralatan proteksi. Mengenai k_3 dan k_4 dapat dilihat pada tabel (A-6) dan (A-7) :

TABEL A-6

Data Proteksi	K_3
Tidak ada pengamanan	1
Isolation Transformer	0,1
Ada divais proteksi (SPD)	0,1 - 0,001
Selubung / isolasi di-bonding ke tanah	0,1 - 0,001
Kabel serat optik tanpa unsur logam	0

Catatan:

1. SPD = Surge Protection Device

2. S = luas penampang selubung

Untuk penentuan nilai K_3 dan SPD tergantung kualitas SPD dan penginstalannya demikian juga penghantar, K_3 tergantung kualitas isolasi/selubung, jumlah dan panjang kabel.

TABEL A-7

Data Proteksi	K_4
Ada divais proteksi (SPD)	0,001
Selubung / isolasi di-bonding ke tanah	0

III.3. Probabilitas kerusakan akibat tegangan lebih (P_o).

Fenomena tegangan lebih dirasakan pada instalasi yang bertegangan listrik seperti instalasi listrik dan instalasi layanan (suplai tenaga listrik dan sistem telekomunikasi) sehingga probabilitas yang relevan untuk perhitungan ini adalah P_2 dan P_3 . Frekuensi kerusakan dapat ditentukan dengan mengalikan probabilitas timbulnya kerusakan dengan jumlah kejadian dari faktor yang menyebabkan kerusakan tersebut. Kita ketahui bahwa kerusakan pada gedung akibat fenomena petir diakibatkan karena sambaran langsung maupun tidak langsung. Dalam perhitungan sebelumnya telah dijelaskan bahwa sambaran langsung adalah sambaran langsung ke gedung (dalam perhitungan N_d) dan sambaran tidak langsung adalah sambaran ke tanah sekitar gedung yang memberikan efek ke dalam gedung (dalam perhitungan N_n) dan sambaran ke sistem layanan yang masuk ke gedung (dalam perhitungan N_k).

Kerusakan berupa tegangan sentuh atau tegangan langkah sudah dipastikan karena sambaran langsung bukan sambaran tidak langsung, sehingga perhitungan F_h dipengaruhi variabel N_d . Kerusakan berupa kebakaran dan ledakan diakibatkan oleh sambaran langsung maupun tidak langsung demikian juga kerusakan berupa tegangan lebih, sehingga perhitungan F_f dan F_o dipengaruhi variabel N_d , N_n dan N_k . Maka perhitungan frekuensi kerusakan F adalah sebagai berikut :

$$F = F_h + F_f + F_o, \text{ dengan}$$

$$[1] F_h = N_d \cdot Ph \dots \dots \dots [A.16]$$

$$[2] F_f = N_d \cdot Ptd_1 + N_n \cdot Ptd_2 + \sum_1^n N_k \cdot Ptd_3 \dots \dots \dots [A.17]$$

Yaitu :

$$F_f = N_d \cdot Pt(P1 + P2 + P3 + P4) + N_n \cdot Pt(P3) + \sum_1^n N_k \cdot Ptd_3$$

Dengan n = jumlah sistem layanan yang masuk ke gedung

$$[3] F_0 = N_d \cdot Po_1 + N_n \cdot Po_2 + \sum_1^n N_k \cdot Po_3 \dots \dots \dots [A.18]$$

Yaitu:

$$F_0 = N_d \cdot (P2 + P3) + N_n(P3) + \sum_1^n N_k \cdot (P3)$$

IV. PERHITUNGAN FREKUENSI MAKSIMUM

Dengan sudah diketahui frekuensi kerusakan F maka perlu untuk mengetahui besar frekuensi kerusakan yang dapat diterima (maksimum) atau F1.

Frekuensi kerusakan maksimum Fa yang dinyatakan sebagai berikut :

$$Fa = \frac{Ra}{\delta} \dots \dots \dots [A.19]$$

Dimana :

Ra = resiko yang dapat diterima (maksimum)

δ = rata-rata kehilangan

Kerusakan seperti yang sudah dijelaskan sumber-sumber kerusakan pada sub bab sebelumnya (tabel A-8) dapat diklarifikasikan kerugiannya menjadi beberapa tipe yaitu :

1. Merenggut atau kehilangan jiwa manusia
2. Kehilangan pelayanan terhadap masyarakatnya
3. Kehilangan benda bernilai budaya yang tak tergantikan
4. Kehilangan selain manusia, nilai budaya dan sosial (seperti kehilangan harta benda dan peralatan)
5. Kehilangan selain peralatan yang sensitif

TABEL A-8

Tipe Kerusakan	Sumber Kerusakan				
	Sambaran Langsung			Sambaran Tak Langsung	
	Fh	Ff	Fo	Ff	Fo
1	√	√		√	
2		√	√	√	√
3		√		√	
4		√	√	√	√
5		√		√	
√ = sebagai komponen kerusakan					

Dari definisi tipe kerusakan tersebut maka besar rata-rata kehilangan δ dirumuskan sebagai berikut :

a. tipe kerusakan 1 : merenggut atau kehilangan jiwa manusia.

$$\delta = 1 - [1 - \frac{t}{8760}]^n \dots\dots\dots[A.20]$$

Dimana :

δ = kemungkinan satu orang berada pada tempat berbahaya.

n = jumlah orang pada daerah yang berbahaya.

t = kehadiran orang tersebut pada daerah yang berbahaya [jam/tahun].

b. tipe kerusakan 2 : kehilangan pelayanan terhadap masyarakat.

$$\delta = \frac{nt'}{n_t 8760} \dots\dots\dots[A.21]$$

Dimana :

δ = jumlah kehilangan relatif pada setiap kerusakan.

n = jumlah rata-rata orang yang mengalami kerugian dengan hilangnya pelayanan pada setiap kerusakan.

t' = kehilangan pelayanan per setiap kerusakan [jam/tahun].

n_t = jumlah masyarakat yang harus dilayani.

c. tipe kerusakan 3 : kehilangan barang berharga yang tidak tergantikan.

$$\delta = \frac{C_i}{C_t} \dots\dots\dots[A.22]$$

Dimana :

δ = jumlah kehilangan relatif pada setiap kerusakan

C_i = nilai uang yang tidak terjamin pada barang yang rusak pada setiap kerusakan sesuatu mata uang yang berlaku

C_t = nilai uang yang tidak terjamin pada semua barang sesuai mata uang yang berlaku

d. tipe kerusakan 4 dan 5 : kehilangan yang tidak meliputi manusia, nilai budaya dan sosial.

$$\delta = \frac{C_m}{C_v} \dots \dots \dots [A.23]$$

Dimana :

δ = jumlah kehilangan relatif pada setiap kerusakan

C_m = nilai rata-rata kehilangan maksimum bangunan, perabotan dan barang-barang dalam mata uang yang berlaku pada setiap kerusakan

C_t = jumlah keseluruhan nilai bangunan, perabotan dan barang dalam mata uang yang berlaku

Setelah dapat menentukan nilai δ , maka frekuensi maksimum F_a dapat ditentukan dengan di ketahui besar resiko maksimum R_a yang terdapat pada Tabel A-9.

TABEL A-9

Tipe Kerusakan	R_a
1	10^{-5}
2	10^{-3}
3	10^{-3}
Untuk tipe 4 dan 5 dapat ditentukan nilai khusus.	

Untuk rekomendasi sistem proteksi maka selain frekuensi kerusakan F , juga berdasarkan perbandingan frekuensi kerusakan karena sambaran langsung (F_d) maupun tidak langsung (F_i) terhadap frekuensi kerusakan maksimum F_a . Hal ini untuk spesifikasi sistem proteksi petir yang direkomendasikan. Lihat tabel A-10.

TABEL A-10

Tingkat Resiko	Sistem Proteksi				
	Tidak perlu proteksi	Perlu Divais Proteksi (SPD)	Perlu sistem Proteksi eksternal (LPS)	Perlu sistem proteksi untuk Menghindari pulsa induksi Elektromagnetik (LEMP) Yaitu <i>shielding</i>	Perlu Sistem Proteksi lain
$F \leq F_a$	√				
$F > F_a$ $F_d > F_a$ $F \leq F_a$			√	√	
$F > F_a$ $F_d \leq F_a$ $F > F_a$		√			
$F > F_a$ $F_d \leq F_a$ $F \leq F_a$					√

Rekomendasi kebutuhan suatu sistem proteksi terutama untuk sistem proteksi eksternal tersebut sebagai bentuk kompensasi yang tepat untuk mengusahakan agar frekuensi kerusakan F terutama kerusakan karena sambaran langsung F_d berada dibawah frekuensi maksimum F_a .

$$E = 1 - \frac{F_a}{F_d} \dots \dots \dots [A.24]$$

Dimana :

E = efisiensi sistem proteksi eksternal

F_a = frekuensi kerusakan maksimum

F_d = frekuensi kerusakan karena sambaran langsung

Bentuk kompensasinya adalah suatu sistem proteksi eksternal yang mempunyai level proteksi tertentu yang perancangan dapat mengacu pada IEC 1024-1 : 1993.

TABEL A-11

Level Proteksi	Efisiensi sistem Proteksi eksternal
I	0,98
II	0,95
V	0,90
IV	0,80

LAMPIRAN B

DATA IKL DAN DATA HARI GURUH 1991 - 2006

No.	Stasiun	Bujur	Lintang	Data IKL 1991 s/d 2006																Rata-rata IKL	Kerapatan (0)	Tingkat Kerawanan
				1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006			
1	Tangerang / Budiono Cing	106.57000	-6.29000	60.3	81.9	75.1	52.9	64.4	62.7	48.2	72.9	55.6	59.7	61.6	58.4	55.3	66.3	67.7	52.9	62.2	13.1	Sangat Tinggi
2	Serang	106.15000	-6.15000	21.4	33.2	27.4	29.0	34.2	35.1	21.9	35.9	29.0	29.3	35.3	37.0	31.8	38.9	44.4	31.2	32.2	6.8	Sedang
3	Jakarta / Halm P.K	106.80000	-2.25000						21.6	15.6	49.6	38.1	41.9	45.8	37.8	36.2	45.8	37.5	30.4	36.4	7.6	Sedang
4	Cemplang / Seelamo Hata	106.65000	-6.11667						21.1	37.5	21.6				24.7	28.8	26.8	22.2		26.1	5.5	Sedang
5	Jatibarang	106.28333	-6.73000	39.7	52.9	43.0	29.6	40.0	48.5	36.2	58.1	51.2	37.0	41.1	21.4	26.0	36.4	40.5	35.1	39.8	8.4	Tinggi
6	Darmaga / Bogor	106.86667	-6.53333										54.8	58.6	59.7	34.5	40.8	65.5	51.0	52.1	10.9	Sangat Tinggi
7	Cikato / Bogor	106.65000	-6.67000	39.2	81.6	75.3	54.4	59.5	44.3	41.1	56.6	44.9	28.7			48.5	60.9	57.8	46.8	52.8	11.1	Sangat Tinggi

No.	Stasiun	Bujur	Lintang	Data Hari Guruh 1991 s/d 2006																Jumlah	Rata-rata Ts Days / Tahun	Rata-rata Ts Days/Bulan
				1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006			
1	Tangerang / Budiono Cing	106.57000	-6.29000	220	299	214	193	235	230	176	286	203	219	225	213	202	243	247	193	3637	227	19
2	Serang	106.15000	-6.15000	78	121	100	106	125	128	80	131	106	107	129	135	116	142	162	114	1881	118	10
3	Jakarta / Halm P.K	106.80000	-2.25000						79	57	181	139	153	167	138	132	167	137	111	1462	133	11
4	Cemplang / Seelamo Hata	106.65000	-6.11667					77	137	79					90	105	98	81		668	95	8
5	Jatibarang	106.28333	-6.73000	145	193	157	108	146	177	132	212	187	135	150	78	95	133	148	128	2325	145	12
6	Darmaga / Bogor	106.86667	-6.53333										201	214	218	126	149	239	186	1333	190	16
7	Cikato / Bogor	106.65000	-6.67000	143	299	275	198	217	162	150	206	164	105			177	223	211	171	2702	193	16

(Sumber : Badan Meteorologi dan Geofisika)

LAMPIRAN C

Perhitungan Resiko Sambaran Petir dengan IEC 1662 : 1995 Studi Kasus gedung-gedung di Fakultas Teknik Universitas Indonesia

I. Perhitungan Parameter Sambaran Petir

I.1. perhitungan jumlah sambaran petir ke gedung

$$N_d = N_g \cdot A_e$$

Dimana :

N_d = jumlah sambaran petir ke gedung

N_g = kerapatan sambaran petir ke tanah

A_e = area koleksi efektif

a. $N_g = 11$ sambaran/Km²/Tahun (Data BMG 1991-2006)

b. Area koleksi efektif (A_e)

b.1 Gedung dekanat

Jika gedung dekanat berada di daerah terpencil:

$$\begin{aligned} A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 32,33 \times 29,33 + 6 \times 21,18 (32,33 + 29,33) + 9 \times 3,14 \times (21,18)^2 \\ &= 21.461,21 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Besar pengaruh gedung-gedung di sekitar gedung dekanat terhadap besar

A_e :

a. Elektro = $X_s = \frac{10,65 m + 3(|21,18 - 22,95|)}{2} = 7,98 \text{ m}^2$

b. Sipil = $7,34 \text{ m}^2$

c. PAF = $19,78 \text{ m}^2$

d. Arsitektur = $32,51 \text{ m}^2$

e. Mesin = $31,99 \text{ m}^2$

f. GKB = $34,05 \text{ m}^2$

g. Menara RTC = $154,12 \text{ m}^2$

Sehingga,

$A_e \text{ dekanat} = 21.181,42 \text{ m}^2 = 0,02 \text{ Km}^2$

b.2 Gedung pusat administrasi fakultas

Jika gedung Pusat Administrasi Fakultas di daerah terpencil:

$$\begin{aligned}A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 46,15 \times 24,20 + 6 \times 22,343 (46,150 + 24,200) + 9 \times 3,14 \times (22,343)^2 \\ &= 24.655,47 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Besar pengaruh gedung-gedung di sekitar gedung PAF terhadap besar A_e :

- a. Dekanat = 19,78 m²
- b. Sipil = 25,75 m²
- c. Elektro = 40,91 m²
- d. GKB = 47,64 m²
- e. Menara RTC = 171,16 m²

Sehingga,

$$A_e \text{ PAF} = 24.350,23 \text{ m}^2 = \mathbf{0,02 \text{ Km}^2}$$

b.3 Gedung kuliah bersama

Jika gedung kuliah bersama di daerah terpencil:

$$\begin{aligned}A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 48,20 \times 48,20 + 6 \times 26,33 (48,20 + 48,20) + 9 \times 3,14 \times (22,95)^2 \\ &= 32.437,12 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Besar pengaruh gedung-gedung di sekitar gedung kuliah bersama terhadap besar A_e :

- a. Elektro = 12,74 m²
- b. Sipil = 18,07 m²
- c. Dekanat = 23,39 m²
- d. Arsitektur = 7,07 m²
- e. Mesin = 2,57 m²
- f. T.Kimia = 44,73 m²
- g. Metalurgi = 25,4 m²
- h. Industri = 44,73 m²
- i. PAF = 47,64 m²
- j. Menara RTC = 109,12 m²

Sehingga,

$$A_e \text{ GKB} = 32.101,66 \text{ m}^2 = \mathbf{0,03 \text{ Km}^2}$$

b.4 Gedung jurusan elektro

Jika gedung Jurusan Elektro di daerah terpencil:

$$\begin{aligned}A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 47,33 \times 22,15 + 6 \times 22,95 (47,33 + 22,15) + 9 \times 3,14 \times (22,95)^2 \\ &= 25.500,37 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Besar pengaruh gedung-gedung di sekitar gedung elektro terhadap besar

A_e :

- a. GKB = 12,74 m²
- b. Sipil = 29,99 m²
- c. Dekanat = 7,98 m²
- d. Arsitektur = 41,83 m²
- e. Mesin = 26,66 m²
- f. PAF = 40,91 m²
- g. Menara RTC = 145,64 m²

Sehingga,

$$A_e \text{ Elektro} = 25.194,62 \text{ m}^2 = \mathbf{0,02 \text{ Km}^2}$$

b.5 Gedung jurusan mesin

Jika gedung Jurusan Mesin di daerah terpencil:

$$\begin{aligned}A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 47,33 \times 22,15 + 6 \times 22,95 (47,33 + 22,15) + 9 \times 3,14 \times (22,95)^2 \\ &= 25.500,37 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Besar pengaruh gedung-gedung di sekitar gedung Mesin terhadap besar

A_e :

- a. GKB = 2,57 m²
- b. Metalurgi = 19,99 m²
- c. Dekanat = 31,98 m²
- d. Arsitektur = 29,83 m²
- e. Elektro = 26,66 m²
- f. Sipil = 41,99 m²
- g. T. Kimia = 39,33 m²
- h. Industri = 37,33 m²
- i. Menara RTC = 117,34 m²

Sehingga,

$$A_e \text{ Mesin} = 25.153,35 \text{ m}^2 = \mathbf{0,02 \text{ Km}^2}$$

b.6 Gedung jurusan arsitektur

Jika gedung Jurusan Arsitektur di daerah terpencil:

$$\begin{aligned} A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 47,33 \times 22,15 + 6 \times 19,95 (47,33 + 22,15) + 9 \times 3,14 \times (19,95)^2 \\ &= 20.612,67 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Besar pengaruh gedung-gedung di sekitar gedung Arsitektur terhadap besar A_e :

- a. GKB = 7,07 m²
- b. Sipil = 28,16 m²
- c. Dekanat = 65,01 m²
- d. Elektro = 41,83 m²
- e. Mesin = 29,83 m²
- f. T.Kimia = 43,83 m²
- g. Metalurgi = 37,16 m²
- h. Menara RTC = 115,68 m²

Sehingga,

$$A_e \text{ Arsitektur} = 20.244,1 \text{ m}^2 = \mathbf{0,02 \text{ Km}^2}$$

b.7 Gedung jurusan sipil

Jika gedung Jurusan Sipil di daerah terpencil:

$$\begin{aligned} A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 47,33 \times 22,15 + 6 \times 18,95 (47,33 + 22,15) + 9 \times 3,14 \times (18,95)^2 \\ &= 19.096,47 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Besar pengaruh gedung-gedung di sekitar gedung Sipil terhadap besar A_e :

- a. GKB = 18,07 m²
- b. PAF = 25,75 m²
- c. Arsitektur = 28,16 m²
- d. Elektro = 29,99 m²
- e. Mesin = 41,99 m²
- f. Dekanat = 7,34 m²
- g. Metalurgi = 37,16 m²

$$h. \text{Menara RTC} = 145,46 \text{ m}^2$$

Sehingga,

$$A_e \text{ Sipil} = 18.762,55 \text{ m}^2 = \mathbf{0,01 \text{ Km}^2}$$

b.8 Gedung jurusan metalurgi

Jika gedung Jurusan Metalurgi di daerah terpencil:

$$\begin{aligned} A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 47,33 \times 22,15 + 6 \times 22,95 (47,33 + 22,15) + 9 \times 3,14 \times (22,95)^2 \\ &= 25.500,37 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Besar pengaruh gedung di sekitar gedung Metalurgi terhadap besar A_e :

- a. Industri = 4,67 m²
- b. T.Kimia = 6,67 m²
- c. Mesin = 19,99 m²
- d. GKB = 25,4 m²
- e. Arsitektur = 37,16 m²
- f. Menara RTC = 101,34 m²

Sehingga,

$$A_e \text{ Metalurgi} = 25.305,14 \text{ m}^2 = \mathbf{0,02 \text{ Km}^2}$$

b.9 Gedung jurusan industri

Jika gedung Jurusan Industri di daerah terpencil:

$$\begin{aligned} A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 47,33 \times 22,15 + 6 \times 22,95 (47,33 + 22,15) + 9 \times 3,14 \times (22,95)^2 \\ &= 25.500,37 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Besar pengaruh gedung-gedung di sekitar gedung Industri terhadap besar

A_e :

- a. Metalurgi = 4,67 m²
- b. T.Kimia = 10,67 m²
- c. Mesin = 37,33 m²
- d. GKB = 44,73 m²
- e. Menara RTC = 107,49 m²

Sehingga,

$$A_e \text{ Industri} = 25.295,48 \text{ m}^2 = \mathbf{0,02 \text{ Km}^2}$$

b.9 Gedung jurusan teknik kimia

Jika gedung Jurusan Teknik Kimia di daerah terpencil:

$$\begin{aligned}A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 47,33 \times 22,15 + 6 \times 22,95 (47,33 + 22,15) + 9 \times 3,14 \times (22,95)^2 \\ &= 25.500,37 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Besar pengaruh gedung-gedung di sekitar gedung Teknik Kimia terhadap besar A_e :

- a. Industri = 10,67 m²
- b. Metalurgi = 6,67 m²
- c. GKB = 44,73 m²
- d. Menara RTC = 75,49 m²

Sehingga,

$$A_e \text{ T. Kimia} = 25.362,81 \text{ m}^2 = \mathbf{0,02 \text{ Km}^2}$$

b.10 Menara RTC UI 107,9 FM

Jika Menara RTC UI 107,9 FM di daerah terpencil:

$$\begin{aligned}A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 0,3 \times 0,3 + 6 \times 70 (0,3 + 0,3) + 9 \times 3,14 \times (70)^2 \\ &= 138511,89 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Besar pengaruh gedung-gedung di sekitar Menara RTC UI 107,9 FM terhadap besar A_e :

- a. Dekanat = 154,12 m²
- b. Elektro = 145,64 m²
- c. GKB = 109,12 m²
- d. Sipil = 145,46 m²
- e. Mesin = 117,34 m²
- f. T. Kimia = 75,49 m²
- g. Metalurgi = 101,34 m²
- h. Industri = 107,49 m²
- i. PAF = 171,16 m²
- j. Arsitektur = 115,68 m²

Sehingga,

$$A_e \text{ Tower RTC} = 137.269,04 \text{ m}^2 = \mathbf{0,1 \text{ Km}^2}$$

I.2. Perhitungan Jumlah Sambaran ke Tanah dekat/di sekitar gedung

$$N_n = N_g \cdot A_g$$

Dengan :

N_n = jumlah sambaran ke tanah dekat gedung

N_g = kerapatan sambaran ke tanah

A_g = area koleksi tanah di sekitar gedung

a. $N_g = 11$ sambaran/Km²/Tahun (Data BMG 1991-2006)

b. Area koleksi tanah sekitar gedung (A_g)

$$A_g = ab + 6x(a + b) + 9\pi x^2$$

- Gedung Dekanat = 3523,86 m² = 0,003 Km²
- Gedung PAF = 3078,12 m² = 0,003 Km²
- Gedung Kuliah Bersama = 4771,73 m² = 0,004 Km²
- Gedung Departemen Elektro = 3097,66 m² = 0,003 Km²
- Gedung Departemen Sipil = 1484,04 m² = 0,001 Km²
- Gedung Departemen Mesin = 1569,78 m² = 0,001 Km²
- Gedung Departemen Metalurgi = 3270,59 m² = 0,003 Km²
- Gedung Departemen Arsitektur = 1358,59 m² = 0,001 Km²
- Gedung Departemen Teknik Kimia = 2964,27 m² = 0,002 Km²
- Gedung Departemen Industri = 4028,81 m² = 0,004 Km²
- Menara RTC UI = 279,26 m² = 0,0002 Km²

I.3. Perhitungan Jumlah Sambaran Petir yang Mempengaruhi Sistem Layanan yang Masuk ke dalam Gedung.

Seperti kita ketahui sistem layanan yang masuk ke dalam gedung contohnya berupa penghantar suplai tenaga listrik dari gardu atau tiang listrik, sambungan telepon dan jaringan komputer. Besar frekuensi sambaran petir yang mempengaruhi Instalasi jasa umum (IJU) dirumuskan sebagai:

$$N_k = N_g \cdot A_k$$

$$A_k = A_{sk} + A_{ak}$$

dengan :

Jenis kabel penyalur utama	Luas area efektif (m ²)
SUTR	2000 x L
SUTT	500 x L
SBTTR	2 x d _s x L
SBTTT	0,1 x d _s x L
Saluran udara sinyal	2000 x L
Bawah tanah sinyal	2 x d _s x L
Fiber optik tanpa pelindung metalik	0

Catatan:

- L adalah panjang kabel dari gedung bersangkutan ke titik cabang atau gedung lain yang terdekat, dengan panjang maksimum 1000 m. Jika tidak diketahui, asumsikan 1000 m.
- d_s bernilai maksimum 500 m.
- Untuk nilai A_{ak}:
 - Jika IU tidak memakai saluran yang mengandung logam, maka A_{ak}=0.
 - Jika L < 3h (tinggi gedung), maka A_{ak}=0.
 - Untuk penghantar berkas, tiap kabel tunggal diperhitungkan sendiri.

Besar N_k diasumsikan = 1.

II. Perhitungan Resiko-resiko

II.1. Ph, Probabilitas kerusakan oleh Tegangan Sentuh dan Langkah

Dalam hal ini hanya tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diperhitungkan, yaitu melalui rumus:

$$P_h = K_h \cdot P'_h$$

$P'_h = P_h$ tanpa tindakan proteksi apapun.

K_h = faktor pengurangan sesuai dengan sistem proteksi petir yang terpasang.

Dimana besar P'_h dan K_h dapat ditentukan melalui tabel :

Jenis permukaan tanah di luar gedung	R _c (kΩ)	P' _h	Tindakan Proteksi	K _h
Humus	< 1	10 ⁻²	Tanpa SPP	1
Marmer	1 - 10	10 ⁻³	Dengan SPP	1 - E
Kerikil	10 - 100	10 ⁻⁴	Dengan SPP	0,5(1-E)
Aspal	>100	10 ⁻⁵	& Memakai Penyalur	

Catatan:

- Jika biasanya tidak ada orang di luar gedung, asumsikan $P'_h = 0$.

- Jika ada lebih dari satu jenis permukaan tanah, pilih yang nilai P'_h -nya paling tinggi.
- Jika ada lebih dari satu proteksi, nilai akhir K_h adalah nilai hasil kali dari semua tindakan proteksi yang ada.

➤ Instalasi gedung-gedung di teknik memiliki besar R_c kurang dari 1 (sehingga tergolong tanah humus), sehingga nilai P'_h sebesar 10^{-2} .

➤ Semua gedung-gedung di teknik telah dilengkapi dengan SPP, sehingga besar

K_h menjadi (1-E).

Maka,

$$P_h = K_h \cdot P'_h$$

$$P_h = (1 - 0,9)10^{-2} = 0,001$$

Untuk menara RTC,

$$P_h = (1 - 0,98)10^{-2} = 0,0002$$

II.2. P_{td} ,Probabilitas kerusakan oleh api, ledakan, efek mekanis dan kimiawi

Perumusan dalam sambaran langsung yang menimbulkan kerusakan berhubungan dengan api, ledakan, efek mekanik dan kimiawi adalah:

$$P_{td} = 1 - [(1 - P_t P_1)(1 - P_t P_2)(1 - P_t P_3)(1 - P_t P_4)] = P_t (P_1 + P_2 + P_3 + P_4)$$

II.b.1. P_t : probabilitas dari percikan yang dipicu oleh api atau ledakan yang berbahaya

$$P_t = P'_t k_t$$

P_t dihitung berkaitan dengan karakteristik material gedung dan isinya. Sedangkan konstanta k_t merupakan keterangan ada tidaknya peralatan proteksi. Penentuan harga P'_t dan k_t dapat ditentukan melalui tabel :

Tipe material dan atau isi dalam gedung	P'_t	Fasilitas P3K	K_t
Eksplorisif	1	Tabung semprot	0,9
Flammable	10^{-1}	Konstruksional	0,7
Umum	10^{-3}	Otomatis	0,6
Tidak Flammable	10^{-5}	Satuan Pemadam Kebakaran	0,5
Catatan:			

1. Fasilitas P3K konstruksional adalah adanya alat pemadam kebakaran pada dinding (lemari hidrant) dan pintu keluar darurat.
2. Otomatis adalah adanya detektor dan alarm kebakaran dan splinker atau sistem pemadam otomatis lain (penyemprot CO₂ otomatis).

- Gedung-gedung di Fakultas Teknik secara umum tergolong flammable (dapat terbakar), sehingga nilai P'_t adalah 10^{-1} .
- Sementara fasilitas P3K-nya sudah konstruksional, sehingga nilai K_t sebesar 0,7.
- Sehingga, $P_t = 0,1 \cdot 0,7 = 0,07$
- Untuk menara RTC UI dikategorikan sebagai tipe material yang tidak flammable dan memiliki fasilitas P3K satuan pemadam kebakaran sehingga, $P_t = 0,00001 \cdot 0,5 = 0,000005$

II.b.2. P_1 : probabilitas dari percikan berbahaya pada instalasi logam (P1) dan pada instalasi listrik gedung (P2)

Jenis Gedung	P'_1 dan P'_2
Batu bata, batu, kayu atau dinding tidak konduktif dan tidak ada sistem proteksi	1
Bingkai logam atau kolom beton bertulang berjarak 10-20 meter atau ada sistem proteksi level V-1V	0,1 - 0,2
Bingkai logam atau kolom beton bertulang berjarak 3-6 meter atau ada sistem proteksi level I-II	0,05 - 0,08
Dinding berlapisan depan berupa logam (metallic facade) atau beton bertulang tanpa jendela atau hanya ada jendela kecil yang kurang dari 20 % luas dinding gedung	0,005 - 0,001

Data Proteksi	k_1 dan k_2
Tidak ada pen-shielding-an (kabel tidak diselubungi)	1
Kabel diselubungi atau tidak ada loop	0,1 - 0,01
Kabel diselubungi dan tidak ada loop	0,01 - 0,001
Kabel serat optik tanpa ada unsur logam	0

- Instalasi gedung-gedung di Fakultas Teknik sudah memiliki kabel yang terselubungi, sehingga $K_1 = K_2 = 0,01$.
- $P'_1 = P'_2 = 1$

- Maka $P_1=P_2=0,01$
- Untuk menara RTC nilai $P'_1=P'_2=0,05$ dan $K_1=K_2=1$ sehingga $P_1=P_2=0,05$

II.b.3. P_3 : probabilitas dari percikan atau kebakaran atau ledakan pada instalasi sistem layanan (P_3) dan pada sistem saluran (P_4) yang masuk gedung.

Data Proteksi	K_3
Tidak ada pengamanan	1
Isolation Transformer	0,1
Ada divais proteksi (SPD)	0,1 – 0,001
Selubung / isolasi di-bonding ke tanah	0,1 – 0,001
Kabel serat optik tanpa unsur logam	0
Catatan: 1. SPD = Surge Protection Device 2. S = luas penampang selubung Untuk penentuan nilai K_3 dan SPD tergantung kualitas SPD dan penginstalannya demikian juga penghantar, K_3 tergantung kualitas isolasi/selubung, jumlah dan panjang kabel.	

Data Proteksi	K_4
Ada divais proteksi (SPD)	0,001
Selubung / isolasi di-bonding ke tanah	0

- $P'_3 = P'_4 = 1$
- Saat awal perancangan dianggap tidak ada proteksi, $K_3=K_4=1$
- $P_3=P_4=1$

Dari Ketiga sub-sub bab diatas yang menjabarkan tentang probabilitas kerusakan oleh api, ledakan, efek mekanis dan kimiawi. Maka dapat dihitung :

$$P_{td} = P_t (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) = 0,07 (0,01 + 0,01 + 1 + 1) = 0,1414$$

Dan untuk menara RTC :

$$P_{td} = P_t (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) = 0,000005 (0,05 + 0,05 + 1 + 1) = 0,0000105$$

II.3. P_0 ,Probabilitas kerusakan akibat tegangan lebih

Untuk sambaran langsung menggunakan P_2 dan P_3 , sedangkan sambaran tidak langsung menggunakan P_3 .

- $P_2 + P_3 = 0,01 + 1 = 1,01$

➤ P3 = 1

III. Perhitungan Frekuensi

$$F = F_h + F_t + F_o$$

Dimana :

F_h = frekuensi untuk tegangan sentuh dan langkah

F_t = frekuensi kerusakan akibat api dan ledakan

F_o = frekuensi kerusakan akibat over voltage

$$[1] F_h = N_d \cdot Ph$$

F_h untuk Gedung-gedung dan struktur di FTUI :

- Gedung Dekanat = $1 \times 0,001 = 0,001$
- Gedung Elektro = $1 \times 0,001 = 0,001$
- Gedung PAF = $1 \times 0,001 = 0,001$
- Gedung Sipil = $1 \times 0,001 = 0,001$
- Gedung Mesin = $1 \times 0,001 = 0,001$
- Gedung Metalurgi = $1 \times 0,001 = 0,001$
- Gedung Kuliah Bersama = $1 \times 0,001 = 0,001$
- Gedung Arsitektur = $1 \times 0,001 = 0,001$
- Gedung Teknik Kimia = $1 \times 0,001 = 0,001$
- Gedung Industri = $1 \times 0,001 = 0,001$
- Menara RTC UI = $2 \times 0,001 = 0,002$

$$[2] F_f = N_d \cdot Ptd_1 + N_n \cdot Ptd_2 + \sum_1^n N_k \cdot Ptd_3$$

Yaitu :

$$F_f = N_d \cdot Pt(P1 + P2 + P3 + P4) + N_n \cdot Pt(P3) + \sum_1^n N_k \cdot Ptd_3$$

(n = 3, sistem tenaga masuk gedung, telepon dan internet)

- Gedung Dekanat = $(1 \times 0,1414) + (1 \times 0,07 \times 1) + (3 \times 1 \times 0,07 \times 1) = 0,4214$
- Gedung Elektro = $(1 \times 0,1414) + (1 \times 0,07 \times 1) + (3 \times 1 \times 0,07 \times 1) = 0,4214$
- Gedung PAF = $(1 \times 0,1414) + (1 \times 0,07 \times 1) + (3 \times 1 \times 0,07 \times 1) = 0,4214$
- Gedung Sipil = $(1 \times 0,1414) + (1 \times 0,07 \times 1) + (3 \times 1 \times 0,07 \times 1) = 0,4214$
- Gedung Mesin = $(1 \times 0,1414) + (1 \times 0,07 \times 1) + (3 \times 1 \times 0,07 \times 1) = 0,4214$

- f. Gedung Metalurgi = $(1 \times 0,1414) + (1 \times 0,07 \times 1) + (3 \times 1 \times 0,07 \times 1) = 0,4214$
- g. Gedung Kuliah Bersama = $(1 \times 0,1414) + (1 \times 0,07 \times 1) + (3 \times 1 \times 0,07 \times 1) = 0,4214$
- h. Gedung Arsitektur = $(1 \times 0,1414) + (1 \times 0,07 \times 1) + (3 \times 1 \times 0,07 \times 1) = 0,4214$
- i. Gedung Teknik Kimia = $(1 \times 0,1414) + (1 \times 0,07 \times 1) + (3 \times 1 \times 0,07 \times 1) = 0,4214$
- j. Gedung Industri = $(1 \times 0,1414) + (1 \times 0,07 \times 1) + (3 \times 1 \times 0,07 \times 1) = 0,4214$
- k. Menara RTC UI = $(2 \times 0,0000105) + (1 \times 0,000005 \times 1) + (3 \times 1 \times 0,000005 \times 1) = 0,000041$

$$[3] F_0 = N_d \cdot P_{o1} + N_n \cdot P_{o2} + \sum_1^n N_k \cdot P_{o3}$$

Yaitu:

$$F_0 = N_d \cdot (P_2 + P_3) + N_n \cdot (P_3) + \sum_1^n N_k \cdot (P_3)$$

- a. Gedung Dekanat = $(1 \times 1,01) + (1 \times 1) + (3 \times 1 \times 1) = 5,01$
- b. Gedung Elektro = $(1 \times 1,01) + (1 \times 1) + (3 \times 1 \times 1) = 5,01$
- c. Gedung PAF = $(1 \times 1,01) + (1 \times 1) + (3 \times 1 \times 1) = 5,01$
- d. Gedung Sipil = $(1 \times 1,01) + (1 \times 1) + (3 \times 1 \times 1) = 5,01$
- e. Gedung Mesin = $(1 \times 1,01) + (1 \times 1) + (3 \times 1 \times 1) = 5,01$
- f. Gedung Metalurgi = $(1 \times 1,01) + (1 \times 1) + (3 \times 1 \times 1) = 5,01$
- g. Gedung Kuliah Bersama = $(1 \times 1,01) + (1 \times 1) + (3 \times 1 \times 1) = 5,01$
- h. Gedung Arsitektur = $(1 \times 1,01) + (1 \times 1) + (3 \times 1 \times 1) = 5,01$
- i. Gedung Teknik Kimia = $(1 \times 1,01) + (1 \times 1) + (3 \times 1 \times 1) = 5,01$
- j. Gedung Industri = $(1 \times 1,01) + (1 \times 1) + (3 \times 1 \times 1) = 5,01$
- k. Menara RTC UI = $(2 \times 1,05) + (1 \times 1) + (3 \times 1 \times 1) = 6,1$

Sehingga besar frekuensi total kerusakan adalah :

$$F = F_h + F_t + F_o$$

- a. Gedung Dekanat = $0,001 + 0,4214 + 5,01 = 5,4324$
- b. Gedung Elektro = $0,001 + 0,4214 + 5,01 = 5,4324$
- c. Gedung PAF = $0,001 + 0,4214 + 5,01 = 5,4324$
- d. Gedung Sipil = $0,001 + 0,4214 + 5,01 = 5,4324$

- e. Gedung Mesin = $0,001 + 0,4214 + 5,01 = 5,4324$
- f. Gedung Metalurgi = $0,001 + 0,4214 + 5,01 = 5,4324$
- g. Gedung Kuliah Bersama = $0,001 + 0,4214 + 5,01 = 5,4324$
- h. Gedung Arsitektur = $0,001 + 0,4214 + 5,01 = 5,4324$
- i. Gedung Teknik Kimia = $0,001 + 0,4214 + 5,01 = 5,4324$
- j. Gedung Industri = $0,001 + 0,4214 + 5,01 = 5,4324$
- k. Menara RTC UI = $0,002 + 0,000041 + 6,1 = 6,102041$

Dan besar frekuensi akibat sambaran langsung adalah :

$$F_d = N_d \cdot P_h + N_d \cdot P_t(P_1 + P_2 + P_3 + P_4) + N_d \cdot (P_2 + P_3)$$

- a. Gedung Dekanat = $0,001 + 0,1414 + 1,01 = 1,1524$
- b. Gedung Elektro = $0,001 + 0,1414 + 1,01 = 1,1524$
- c. Gedung PAF = $0,001 + 0,1414 + 1,01 = 1,1524$
- d. Gedung Sipil = $0,001 + 0,1414 + 1,01 = 1,1524$
- e. Gedung Mesin = $0,001 + 0,1414 + 1,01 = 1,1524$
- f. Gedung Metalurgi = $0,001 + 0,1414 + 1,01 = 1,1524$
- g. Gedung Kuliah Bersama = $0,001 + 0,1414 + 1,01 = 1,1524$
- h. Gedung Arsitektur = $0,001 + 0,1414 + 1,01 = 1,1524$
- i. Gedung Teknik Kimia = $0,001 + 0,1414 + 1,01 = 1,1524$
- j. Gedung Industri = $0,001 + 0,1414 + 1,01 = 1,1524$
- k. Menara RTC UI = $0,002 + 0,000021 + 2,1 = 2,102021$

Tingkat Resiko	Sistem Proteksi				
	Tidak perlu proteksi	Perlu Divais Proteksi (SPD)	Perlu sistem Proteksi eksternal (LPS)	Perlu sistem proteksi untuk Menghindari pulsa induksi Elektromagnetik (LEMP) Yaitu <i>shielding</i>	Perlu Sistem Proteksi lain
$F \leq F_a$	√				
$F > F_a$ $F_d > F_a$ $F_i \leq F_a$			√	√	
$F > F_a$ $F_d \leq F_a$ $F_i > F_a$		√			
$F > F_a$					√

Fd ≤ Fa					
Fi ≤ Fa					

Dari hasil perhitungan potensi-potensi sambaran petir yang mengancam gedung-gedung dan struktur pada wilayah FTUI maka kebutuhan akan proteksi petir baik eksternal maupun internal cukup besar. Hal ini bertujuan untuk meminimalisasi besar total kerusakan akibat sambaran petir (F) terutama besar kerusakan yang diakibatkan oleh sambaran langsung (Fd) berada dibawah frekuensi minimum (Fa).

$$E = 1 - \frac{Fa}{Fd}$$

Dimana :

E = efisiensi sistem proteksi eksternal

Fa = frekuensi kerusakan maksimum

Fd = frekuensi kerusakan karena sambaran langsung

Bentuk kompensasinya adalah suatu sistem proteksi eksternal yang mempunyai level proteksi tertentu yang perancangan dapat mengacu pada IEC 1024-1 : 1993.

Level Proteksi	Efisiensi sistem Proteksi eksternal
I	0,98
II	0,95
V	0,90
IV	0,80

Dengan besar Fd = 1,1524, besar F = 5,4324 dan besar E = 0,9. Dari persamaan di atas maka didapat besar Fa = 0,11524. Besar Fi = Ff(i) + Fo(i) = 0,21 + 3=3,21. Sedangkan untuk menara RTC, besar Fd = 2,102021, besar F = 6,102041 dan besar E = 0,98. Dari persamaan di atas maka didapat besar Fa = 0,04204042. Besar Fi = Ff(i) + Fo(i) = 0,000015 + 3=3,000015.

Maka jika mengacu pada tabel di atas besaran untuk evaluasi gedung-gedung bertingkat di FTUI dan menara RTC UI menghasilkan kesimpulan bahwa F > Fa, Fd > Fa, Fi > Fa, yang artinya bahwa gedung-gedung di fakultas teknik membutuhkan sistem proteksi eksternal, bahkan dibutuhkan pula shielding untuk menghindari pulsa induksi elektromagnetik.

LAMPIRAN D

TIPE I : Perhitungan metode *collection volume* untuk gedung elektro, mesin, metalurgi, industri, teknik kimia.

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs
0	10	42,66728	10	10	43,95348	20	10	43,90417
	20	67,73009		20	69,7718		20	69,69352
	30	88,75152		30	91,42692		30	91,32435
	40	107,5148		40	110,7558		40	110,6316
	50	124,7599		50	128,5207		50	128,3766
	60	140,8843		60	145,1312		60	144,9684
	70	156,1326		70	160,8392		70	160,6588
30	10	42,52086	40	10	39,84557	50	10	35,95959
	20	67,49765		20	63,25089		20	57,08229
	30	88,44694		30	82,88212		30	74,79896
	40	107,1458		40	100,4045		40	90,61249
	50	124,3317		50	116,5091		50	105,1465
	60	140,4008		60	131,5672		60	118,736
	70	155,5968		70	145,8071		70	131,5871
60	10	30,981						
	20	49,17927						
	30	64,44308						
	40	78,06723						
	50	90,589						
	60	102,297						
	70	113,369						

Tabel D.1 . perhitungan jarak sambaran vs arus vs sudut untuk gedung teknik elektro, teknik mesin, teknik metalurgi, teknik industri, teknik kimia.

Sudut	Arus	Δ_{max}	Sudut	Arus	Vcol	Sudut	Arus	θ_F
0	10	25,1737	0	10	53765,94	0	10	46,30546
	20	39,96075		20	215063,8		20	58,95675
	30	52,3634		30	483893,4		30	65,32941
	40	63,43374		40	860255		40	69,23498
	50	73,60833		50	1344148		50	71,90492
	60	83,12171		60	1935574		60	73,86179
	70	92,11825		70	2634531		70	75,36686

Tabel D.2. (a) perhitungan maximum lateral displacement vs arus vs sudut 0°

(b) perhitungan *collection volume* vs arus vs sudut 0°

(c) perhitungan sudut perlindungan vs arus vs sudut 0°

TIPE II : Hasil tabel perhitungan metode *collection volume* untuk gedung dekanat.

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs
0	10	41,36467	10	10	42,67066	20	10	42,6801
	20	65,66232		20	67,73545		20	67,7504
	30	86,04198		30	88,75854		30	88,7782
	40	104,2324		40	107,5233		40	107,547
	50	120,951		50	124,7698		50	124,797
	60	136,5831		60	140,8954		60	140,926
	70	151,366		70	156,145		70	156,179

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs
30	10	41,39276	40	10	38,84771	50	10	35,1222
	20	65,70692		20	61,6669		20	55,7531
	30	86,10042		30	80,8064		30	73,0573
	40	104,3032		40	97,8901		40	88,5026
	50	121,0332		50	113,5914		50	102,698
	60	136,6759		60	128,2723		60	115,971
	70	151,4688		70	142,1556		70	128,523

Sudut	Arus	rs
60	10	30,3297
	20	48,14539
	30	63,08831
	40	76,42605
	50	88,68457
	60	100,1465
	70	110,9856

Tabel D.3 . perhitungan jarak sambaran vs arus vs sudut untuk gedung dekanat

Sudut	Arus	Δ_{max}	Sudut	Arus	Vcol	Sudut	Arus	θ_s
0	10	24,40516	0	10	49662,86	0	10	47,61356
	20	38,74077		20	198651,4		20	60,10283
	30	50,76477		30	446965,7		30	66,30927
	40	61,49714		40	794605,7		40	70,08952
	50	71,36111		50	1241571		50	72,66497
	60	80,58405		60	1787863		60	74,54857
	70	89,30593		70	2433480		70	75,99522

Tabel D.4. (a) perhitungan maximum lateral displacement vs arus vs sudut 0°
 (b) perhitungan *collection volume* vs arus vs sudut 0°
 (c) perhitungan sudut perlindungan vs arus vs sudut 0°

TIPE III : Hasil tabel perhitungan *collection volume* untuk gedung kuliah bersama.

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs
0	10	43,66922	10	10	44,9402	20	10	44,84569
	20	69,32057		20	71,33812		20	71,18809
	30	90,83565		30	93,47938		30	93,28279
	40	110,0395		40	113,2422		40	113,0041
	50	127,6896		50	131,4059		50	131,1296
	60	144,1926		60	148,3893		60	148,0772
	70	159,799		70	164,4499		70	164,1041

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs
30	10	43,38856	40	10	40,6131	50	10	36,60363
	20	68,87505		20	64,46928		20	58,10464
	30	90,25185		30	84,47865		30	76,13861
	40	109,3323		40	102,3386		40	92,23536
	50	126,8689		50	118,7534		50	107,0297
	60	143,2659		60	134,1015		60	120,8625
	70	158,772		70	148,6157		70	133,9439

Sudut	Arus	rs
60	10	31,48197
	20	49,97452
	30	65,48514
	40	79,3296
	50	92,05385
	60	103,9512
	70	115,2022

Tabel D.5. perhitungan jarak sambaran vs arus vs sudut untuk gedung kuliah bersama

Sudut	Arus	Δ_{max}	Sudut	Arus	Vcol	Sudut	Arus	θ_z
0	10	25,76484	0	10	57072,11	0	10	45,36597
	20	40,89914		20	228288,5		20	58,11988
	30	53,59303		30	513649		30	64,60877
	40	64,92333		40	913153,8		40	68,60412
	50	75,33685		50	1426803		50	71,34254
	60	85,07363		60	2054596		60	73,35286
	70	94,28143		70	2796534		70	74,90073

Tabel D.6. (a) perhitungan maximum lateral displacement vs arus vs sudut 0°
 (b) perhitungan *collection volume* vs arus vs sudut 0°
 (c) perhitungan sudut perlindungan vs arus vs sudut 0°

TIPE IV : Hasil tabel perhitungan *collection volume* untuk gedung teknik sipil.

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs
0	10	39,69369	10	10	41,02506	20	10	41,10991
	20	63,0098		20	65,12322		20	65,25791
	30	82,5662		30	85,33556		30	85,51205
	40	100,0218		40	103,3767		40	103,5905
	50	116,065		50	119,958		50	120,2061
	60	131,0657		60	135,4618		60	135,7419
	70	145,2513		70	150,1232		70	150,4337

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs
30	10	39,94565	40	10	37,56766	50	10	34,0482
	20	63,40976		20	59,63495		20	54,04815
	30	83,0903		30	78,14389		30	70,82311
	40	100,6567		40	94,66458		40	85,79609
	50	116,8018		50	109,8485		50	99,55755
	60	131,8976		60	124,0457		60	112,4247
	70	146,1733		70	137,4716		70	124,5928

Sudut	Arus	rs
60	10	29,4942
	20	46,81913
	30	61,35042
	40	74,32074
	50	86,24158
	60	97,38772
	70	107,9283

Tabel D.7. perhitungan jarak sambaran vs arus vs sudut untuk gedung teknik sipil

Sudut	Arus	Δ_{max}	Sudut	Arus	Vcol	Sudut	Arus	θ_s
0	10	23,41928	0	10	44713,8	0	10	49,45343
	20	37,17578		20	178855,5		20	61,67874
	30	48,71406		30	402424,9		30	67,64384
	40	59,01288		40	715422		40	71,24763
	50	68,47838		50	1117847		50	73,69197
	60	77,32874		60	1609700		60	75,47478
	70	85,69829		70	2190980		70	76,84149

(a)

(b)

(c)

Tabel D.8. (a) perhitungan maximum lateral displacement vs arus vs sudut 0°

(b) perhitungan *collection volume* vs arus vs sudut 0°

(c) perhitungan sudut perlindungan vs arus vs sudut 0°

TIPE V : Hasil tabel perhitungan *collection volume* untuk gedung teknik arsitektur.

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs
0	10	40,4472	10	10	41,7672	20	10	41,8180
	20	64,2060		20	66,3012		20	66,3820
	30	84,1337		30	86,8792		30	86,9850
	40	101,920		40	105,246		40	105,374
	50	118,268		50	122,128		50	122,276
	60	133,554		60	137,912		60	138,080
	70	148,008		70	152,838		70	153,025

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	Rs
30	10	40,59827	40	10	38,14494	50	10	34,5326
	20	64,44574		20	60,55132		20	54,8170
	30	84,44781		30	79,34468		30	71,8307
	40	102,3012		40	96,11923		40	87,0166
	50	118,7101		50	111,5365		50	100,973
	60	134,0525		60	125,9518		60	114,024
	70	148,5615		70	139,584		70	126,365

Sudut	Arus	rs
60	10	29,871
	20	47,41725
	30	62,13418
	40	75,2702
	50	87,34333
	60	98,63186
	70	109,3071

Tabel D.9. perhitungan jarak sambaran vs arus vs sudut untuk gedung teknik arsitektur

Sudut	Arus	Δ_{max}	Sudut	Arus	Vcol	Sudut	Arus	θ_s
0	10	23,8638	0	10	46902	0	10	48,5996
	20	37,8815		20	187610		20	60,9525
	30	49,6388		30	422124		30	67,0306
	40	60,1332		40	750443		40	70,7163
	50	69,7784		50	1172568		50	73,2212
	60	78,7968		60	1688498		60	75,0504
	70	87,3252		70	2298233		70	76,4539

(a)

(b)

(c)

Tabel D.10. (a) perhitungan maximum lateral displacement vs arus vs sudut 0°
 (b) perhitungan *collection volume* vs arus vs sudut 0°
 (c) perhitungan sudut perlindungan vs arus vs sudut 0°

TIPE VI : Hasil tabel perhitungan *collection volume* untuk gedung PAF.

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs
0	10	42,2228	10	10	43,5157	20	10	43,4865
	20	67,0245		20	69,077		20	69,0305
	30	87,8270		30	90,5164		30	90,4556
	40	106,394		40	109,652		40	109,579
	50	123,460		50	127,240		50	127,155
	60	139,416		60	143,685		60	143,589
	70	154,506		70	159,237		70	159,1305

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs
30	10	42,13595	40	10	39,5051	50	10	35,67391
	20	66,88666		20	62,71044		20	56,6288
	30	87,64632		30	82,17392		30	74,20472
	40	106,1759		40	99,54662		40	89,89261
	50	123,2063		50	115,5136		50	104,3111
	60	139,1299		60	130,443		60	117,7926
	70	154,1883		70	144,5612		70	130,5417

Sudut	Arus	rs
60	10	30,75878
	20	48,82652
	30	63,98084
	40	77,50726
	50	89,93921
	60	101,5632
	70	112,5558

Tabel D.11. perhitungan jarak sambaran vs arus vs sudut untuk gedung PAF

Sudut	Arus	Δ_{max}	Sudut	Arus	Vcol	Sudut	Arus	θ_s
0	10	24,91147	0	10	52341,42	0	10	46,74029
	20	39,5445		20	209365,7		20	59,34016
	30	51,81795		30	471072,8		30	65,6581
	40	62,77298		40	837462,7		40	69,52204
	50	72,84159		50	1308535		50	72,16046
	60	82,25587		60	1884291		60	74,09283
	70	91,15869		70	2564729		70	75,57833

(a)

(b)

(c)

Tabel D.12. (a) perhitungan maximum lateral displacement vs arus vs sudut 0°

(b) perhitungan *collection volume* vs arus vs sudut 0°

(c) perhitungan sudut perlindungan vs arus vs sudut 0°

TIPE VII : Hasil tabel perhitungan *collection volume* untuk Menara RTC UI.

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs
0	10	72,34729	10	10	73,18258	20	10	71,79426
	20	114,8442		20	116,1701		20	113,9663
	30	150,4884		30	152,2259		30	149,3381
	40	182,3038		40	184,4086		40	180,9102
	50	211,5448		50	213,9872		50	209,9277
	60	238,8855		60	241,6436		60	237,0594
	70	264,7409		70	267,7974		70	262,7171

Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs	Sudut	Arus	rs
30	10	68,2245	40	10	62,58178	50	10	55,03754
	20	108,2996		20	99,34238		20	87,36664
	30	141,9127		30	130,1753		30	114,4827
	40	171,915		40	157,6962		40	138,6859
	50	199,4896		50	182,9902		50	160,9307
	60	225,2723		60	206,6405		60	181,7299
	70	249,6543		70	229,0058		70	201,3992

Sudut	Arus	rs
60	10	45,82101
	20	72,73632
	30	95,31154
	40	115,4617
	50	133,9814
	60	151,2976
	70	167,6731

Tabel D.13. perhitungan jarak sambaran vs arus vs sudut untuk Menara RTC UI

Sudut	Arus	Δ_{max}	Sudut	Arus	Vcol	Sudut	Arus	θ_s
0	10	42,6849	0	10	218654,6	0	10	30,90678
	20	67,75806		20	874618,6		20	43,54008
	30	88,78818		30	1967892		30	51,23349
	40	107,5592		40	3498474		40	56,45919
	50	124,8114		50	5466366		50	60,26158
	60	140,9424		60	7871567		60	63,16536
	70	156,1971		70	10714078		70	65,46386

(a)

(b)

(c)

Tabel D.14. (a) perhitungan maximum lateral displacement vs arus vs sudut 0°

(b) perhitungan *collection volume* vs arus vs sudut 0°

(c) perhitungan sudut perlindungan vs arus vs sudut 0°