

**PERANCANGAN SISTEM PENANGKAL PETIR EKSTERNAL  
PADA AIRNAV INDONESIA CABANG YOGYAKARTA**

**SKRIPSI**

untuk memenuhi salah satu persyaratan  
mencapai derajat Sarjana S1



**Disusun oleh:  
HARDIANSYAH  
14524017**

**Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Universitas Islam Indonesia  
Yogyakarta  
2018**

# LEMBAR PENGESAHAN

**Perancangan Sistem Penangkal Petir Eksternal Pada Airnav Indonesia**

**Cabang Yogyakarta**

**TUGAS AKHIR**  
**ISLAM**  
Dijukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh  
Gelar Sarjana Teknik  
pada Program Studi Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Universitas Islam Indonesia

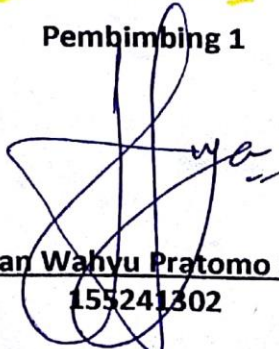
Disusun oleh:

Hardiansyah  
14524017

Yogyakarta, 13-November-2018

Menyetujui,

Pembimbing 1

  
Setyawan Wahyu Pratomo S.T.,M.T

155241302

# LEMBAR PENGESAHAN

## SKRIPSI

PERANCANGAN SISTEM PENANGKAL PETIR EKSTERNAL PADA AIRNAV

INDONESIA CABANG YOGYAKARTA

Dipersiapkan dan disusun oleh:

**HARDIANSYAH**

14524017

Telah dipertahankan di depan dewan penguji

Pada tanggal: tanggal bulan tahun

Susunan dewan penguji

Ketua Penguji : Setyawan Wahyu Pratomo, S.T.,M.T.,

Anggota Penguji 1: Husein Mubarak S.T.,M.Eng.,

Anggota Penguji 2: Wahyudi Budi Pramono, S.T, M.Eng.,

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
untuk memperoleh gelar Sarjana

Tanggal: 19 - Desember - 2018



Ketua Program Studi Teknik Elektro

**Yusuf Aziz Amrullah S.T., M.Sc.,Ph.D**

045240101

## PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan Saya juga tidak mengandung karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Informasi dan materi Skripsi yang terkait hak milik, hak intelektual, dan paten merupakan milik bersama antara tiga pihak yaitu penulis, dosen pembimbing, dan Universitas Islam Indonesia. Dalam hal penggunaan informasi dan materi Skripsi terkait paten maka akan diskusikan lebih lanjut untuk mendapatkan persetujuan dari ketiga pihak tersebut diatas.

Yogyakarta, 13-November-2018



Hardiansyah



## KATA PENGANTAR

AssalamualaikumWr. Wb.

Puji syukur atas rahmat Allah SWT yang telah melancarkan serta memudahkan penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Judul dari tugas akhir ini adalah Perancangan Sistem Penangkal Petir Eksternal Pada Airnav Indonesia Cabang Yogyakarta, harapan penulis dengan adanya tugas akhir ini dapat mempunyai manfaat bagi kalangan mahasiswa dan masyarakat luas. Shalawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, keluarga serta para sahabat-nya, karena dengan syafa'atnya kita dapat hijrah dari zaman jahiliyah sehingga menuju ke zaman yang terang benderang. Semoga kita dapat menjadi umat-umatnya yang mendapat syafaat Nabi Muhammad SAW di yaumul akhir nanti.

Dengan selesainya tugas akhir ini, penulis ingin berterima kasih dengan segala pihak yang memberikan bantuan, serta bimbingan.

1. Allah SWT, karena dengan rahmat-Nya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan lancar.
2. Setyawan Wahyu Pratomo S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan pengarahan dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
3. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Elektro, terima kasih atas bimbingan selama menempuh kuliah dari semester pertama hingga akhir di Jurusan Teknik Elektro.
4. Bapak Yusuf Aziz Amrulloh, ST., M.Eng.,Ph.D Selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
5. Orang tua tercinta Bapak Aspandi dan Ibu Jumrah atas segala dukungan yang berupa moral dan materi serta doa yang selalu menyertai sehingga melancarkan segala urusan dalam pelaksanaan tugas akhir ini.
6. Kakak Meldawati, Masdaniah, Kiky Septi Lia yang telah banyak memberikan bantuan berupa materi dan motivasi untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Teman-teman penulis dari Abd.Corp Hanif, Afgan, Hasbian, Dicky,Fathullah, Isbat dan mas Aulio. Suroto Squad Ahmad, Bayu, Danang, Faiz, Gilang, Gatot, Hendri,

Olan, Rahmat, Rendy, Ridho, Riduan, Sabil, Wisnu dan Yoga, terimakasih banyak atas kebahagiaannya disaat bersama yang sangat menghibur. Terimakasih juga kepada teman-teman KKN yang telah memberikan kebersamaan yang sangat bermanfaat.

8. Seluruh saudara Teknik Elektro Universitas Islam Indonesia yang telah membantu secara langsung maupun tidak langsung dalam proses Tugas Akhir ini.
9. Dan pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu secara langsung maupun tidak dalam proses Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan Tugas Akhir ini mempunyai kesalahan dan kekurangan sehingga jauh dalam kata sempurna. Akan tetapi penulis berharap agar dari Tugas Akhir ini dapat menambah wawasan dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis maupun orang lain.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, 13-November-2018

Hardiansyah

## ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Daftar Lambang dan Singkatan	Arti
$Nd$	Frekuensi rata – rata sambaran petir ke bangunan km <sup>4</sup> / tahun
$Ng$	Densitas rata-rata sambaran petir ke tanah /km <sup>2</sup> / tahun
$Nc$	Frekuensi sambaran petir maksimum yang dibolehkan m <sup>2</sup> / tahun
$Ae$	Area cakupan ekivalen dari bangunan gedung (m <sup>2</sup> )
$a$	Panjang atap gedung (m)
$b$	Lebar atap gedung (m)
$h$	Tinggi atap gedung (m)
$Xs$	Pengaruh jarak benda sekitar (m <sup>2</sup> )
$d$	Jarak antara bangunan dan benda (m)
$hs$	Tinggi benda sekitar bangunan (m)
$E$	Effisiensi
$R$	Radius proteksi (m)
$I$	Arus maksimum (kA)
$a^0$	Sudut proteksi
$h$	tinggi <i>splitzer</i> (m)
$A$	Luas penampang penghantar (mm <sup>2</sup> )
$S$	Arus gangguan berlangsung (detik)
$T$	Temperature konduktor yang diizinkan
$Rp$	Tahanan pentanahan ( ohm )
$\rho$	Tahanan jenis tanah ( ohm-cm )
$a$	Jari-jari penampang pasak ( cm )
$L$	Panjang pasak tanah ( cm )
$n$	Jumlah elektroda
$F$	Faktor perkalian
MSSR	<i>Monopulse Secondary Surveillance Radar</i>
PSR-SSR	<i>Primary Surveillance Radar – Secondary Surveillance Radar</i>

## ABSTRAK

Standarisasi penangkal petir eksternal pada bangunan dan tower penerbangan semakin dibutuhkan agar terhindar dari gangguan alam yaitu sambaran petir. Dari data stasiun geofisika Yogyakarta diketahui bahwa bangunan dan tower milik AirNav Indonesia Cabang Yogyakarta berada pada daerah hijau dengan nilai densitas sambaran petir 1-12 Km<sup>2</sup>. Setelah dilakukan perhitungan, bangunan dan tower milik AirNav Indonesia memerlukan perancangan penangkal petir eksternal.

Prancangan penangkal petir eksternal yang dilakukan pada tower dan bangunan Airnav Indonesia menggunakan metode *rolling sphere* pada bagian sistem terminasi udara dan multiple rod pada sistem terminasi bumi. Dalam menentukan bangunan perlu atau tidak proteksi petir dengan menggunakan Standar Nasional Indonesia 03-7015-2004. Pada sistem terminasi udara menggunakan *splitzer* dengan radius proteksi 150 meter, terminasi bumi dengan 3 batang elektroda dengan panjang 10 m.

**Kata kunci** : penangkal petir, sistem terminasi udara, sitem konduktor, sistem terminasi bumi, *rolling sphere*, *multiple rod*.



# DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN .....	vi
ABSTRAK .....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	1
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	3
2.1 Studi literatur .....	3
2.2 Tinjauan Teori.....	4
2.2.1 Penangkal Petir .....	4
2.2.2 Frekuensi Sambaran Petir .....	4
2.2.3 Risk assessment / taksiran resiko .....	6
2.2.4 Sistem Proteksi Petir Eksternal.....	7
2.2.4.1 Sistem terminasi udara.....	7
2.2.4.2 Sistem konduktor.....	8
2.2.4.3 Sistem terminasi bumi .....	9

BAB 3 METODOLOGI.....	13
3.1 Alur Penelitian .....	13
3.2 Alat dan Bahan (jika dibutuhkan).....	16
3.3 Perancangan Sistem .....	16
3.3.1 Kebutuhan Proteksi Bangunan.....	16
3.3.1.1 Bangunan Peralatan .....	17
3.3.1.2 Air Traffic Control (ATC).....	18
3.3.1.3 Tower radar PSR,SSR .....	18
3.3.1.4 Tower radar MSSR Mode-S .....	19
3.3.2 Sistem terminasi udara.....	20
3.3.2.1 Tower Radar PSR-SSR dan MSSR MODE-S.....	20
3.3.2.2 Air Traffic Control (ATC).....	21
3.3.3 Sistem konduktor .....	21
3.3.4 Sistem terminasi bumi .....	21
3.3.4.1 Elektroda tunggal.....	22
3.3.4.2 Multiple rod .....	23
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	24
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	28
5.1 Kesimpulan .....	28
5.2 Saran .....	28
DAFTAR PUSTAKA .....	30
LAMPIRAN .....	31

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Alur Penelitian.....	13
Gambar 3. 2 Diagram Terminasi Udara .....	14
Gambar 3. 3 Diagram Terinasi Bumi .....	15
Gambar 4.1 a Area Proteksi R =60 m .....	26
Gambar 4.1 b Area Proteksi R =80 m .....	26
Gambar 4.1 c Area Proteksi R =120 .....	26
Gambar 4.1 d Area Proteksi R=150m .....	26
Gambar 4.1 e Area Proteksi R=150 m Setelah Pergeseran .....	27

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tingkat Proteksi .....	6
Tabel 2. 2 Faktor Perkalian .....	10
Tabel 2. 3 Tahanan Jenis tanah .....	11
Tabel 4. 1 Frekuensi Sambaran Petir .....	24
Tabel 4. 2 Data Bangunan .....	25

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang Masalah**

AirNav Indonesia cabang Yogyakarta memiliki fasilitas *surveillance* untuk mengamati posisi dan pergerakan pesawat di udara. Fasilitas *surveillance* pada AirNav Indonesia Cabang Yogyakarta terdiri dari *Monopulse Secondary Surveillance Radar* (MSSR) *Mode-S* dan *Primary Surveillance Radar – Secondary Surveillance Radar* (PSR- SSR). Radar MSSR *Mode-S* ini menggantikan fungsi dari radar PSR-SSR dikarenakan sambaran petir yang menyebabkan radar PSR-SSR mengalami kerusakan. Setelah dilakukan pengukuran nilai tahanan pentanahan, nilai tahanan tanah yang diperoleh sangat jauh dari nilai standar yaitu  $43.1 \Omega$ . Untuk bangunan yang telah diproteksi terdapat penempatan sistem terminasi udara yang tidak tepat karena terdapat peralatan yang ditempatkan lebih tinggi dari *splitzer* yang dipasang. Dalam perancangan sistem penangkal petir eksternal ini, peneliti melakukan perancangan untuk menentukan area proteksi dari sistem terminasi udara, menentukan sistem konduktor penyalur yang digunakan dan menghitung kebutuhan sistem terminasi bumi menggunakan metode *single rod* dan *multiple rod*. Dalam prakteknya, pemasangan *grounding* untuk instalasi penangkal petir eksternal paling besar yaitu 5 ohm sesuai dengan yang dinyatakan dalam PUIL 2000 [1].

### **1.2 Rumusan Masalah**

1. Bagaimana menentukan area proteksi pada bangunan dan tower AirNav Indonesia
2. Berapa tingkat proteksi yang dibutuhkan bangunan yang akan diproteksi.
3. Bagaimana menentukan kebutuhan sistem terminasi udara, sistem konduktor dan sistem terminasi bumi.

### **1.3 Batasan Masalah**

1. Menghitung kebutuhan proteksi pada bangunan berdasarkan Standar Nasional Indonesia 03-7015-2004
2. Perancangan sistem terminasi udara menggunakan metode *rolling sphere*
3. Perancangan sistem terminasi bumi menggunakan metode *single rod* dan *multiple rod*
4. Pada sistem terminasi bumi tidak membahas metode pengolahan tanah

### **1.4 Tujuan Penelitian**

1. Dapat meningkatkan area proteksi pada bangunan AirNav Indonesia Yogyakarta
2. Dapat menentukan *risk assessment* pada setiap bangunan AirNav Indonesia Yogyakarta
3. Dapat menentukan sistem terminasi udara, sistem konduktor dan sistem terminasi bumi

### **1.5 Manfaat Penelitian**

1. Meningkatkan sistem penangkal petir pada bangunan dan tower pada AirNav Indonesia Yogyakarta dari sambaran petir
2. Mengetahui area proteksi pada bangunan AirNav Indonesia Yogyakarta

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Studi literatur**

Kegagalan dalam menginstalasi penangkal petir mengakibatkan bangunan dan peralatan mengalami kerusakan yang fatal. Kegagalan sistem tersebut bisa diakibatkan kesalahan dalam pengambilan data saat perancangan atau kesalahan dari salah satu sistem yang ada pada instalasi penangkal petir eksternal, misalnya sistem terminasi udara yang tidak tepat sehingga tidak melindungi seluruh bangunan, sistem konduktor yang tidak memenuhi nilai standar atau sistem terminasi bumi yang tidak baik. Berikut ini merupakan penelitian yang berkaitan dengan perancangan sistem penangkal petir eksternal seperti “Perencanaan Pemasangan Grounding Penangkal Petir Pada Bangunan Cf Silo Di Proyek Indarung Vi Pt Semen Padang” pada penelitian tersebut sistem terminasi udara menggunakan metode sudut proteksi (*Razevig*) hal tersebut dikarenakan struktur bagian atas bangunan yang meruncing keatas [2]. Sedangkan pada penelitian yang peneliti lakukan menggunakan metode bola bergulir (*Rolling Sphere*) di karenakan bentuk atas bangunan tidak datar ataupun meruncing keatas. Penelitian lainnya yaitu “Rancang Bangun Sistem Pentanahan Pada Pltph Desa Padayo Kecamatan Lubuk Kilangan” pada penelitian tersebut, membahas tentang sistem pentanahan dimana metode yang digunakan yaitu segi empat kosong dengan jumlah elektroda 4 buah sedalam 1 meter[3]. Sedangkan pada penelitian ini, peneliti menggunakan metode *multiple rod* dengan jumlah elektroda 3 batang dengan kedalaman 10 meter dikarenakan nilai tahanan jenis tanah yang tinggi dan lahan yang tidak luas. Penelitian berikutnya yaitu “Studi Analisis Sistem Pentanahan Eksternal Pada Gedung Unit Pelaksana Teknis Teknologi Informasi Dan Komunikasi Universitas Lampung” penelitian ini melakukan analisa dan perhitungan mengenai perencanaan instalasi penangkal petir yang menggunakan metode Franklin[4] dikarenakan bentuk atas bangunannya adalah limas segi empat. Sistem Franklin merupakan penangkal petir yang bersifat pasif atau menunggu sambaran

petir sedangkan peneliti menggunakan metode *Rolling Sphere* dimana *Splitzer* bersifat aktif.

## 2.2 Tinjauan Teori

### 2.2.1 Penangkal Petir

Penangkal petir ditemukan pertama kali oleh Benyamin Franklin sekitar tahun 1752. Dengan mempelajari persamaan listrik dan petir akhirnya Benjamin Franklin menemukan bahwa petir merupakan pelepasan muatan listrik dan Benjamin Franklin melakukan eksperimen yaitu metal diikatkan kelayang-layang, untuk menarik sambaran petir. Jika petir menyambar metal di bagian layang-layang, maka arus dialirkan melalui kawat yang dijadikan tali menuju kebumi. Atas dasar itu, benyamin Franklin memasang tembaga runcing pada bagian atas bangunan dan menghubungkannya ke konduktor pembumian. Penyalur petir tersebut pada saat itu disebut Franklin rod dimana saat ini dikenal dengan penangkal petir konvensional [5]. Seiring berkembangnya zaman, ditemukan penangkal petir non-konvensional. Dalam merancang sistem penangkal petir pada bangunan, hal pertama yang harus dilakukan adalah mengetahui bangunan tersebut memerlukan proteksi petir atau tidak dengan mempertimbangkan kondisi geografis dan keadaan bangunan.

### 2.2.2 Frekuensi Sambaran Petir

Rata-rata frekuensi sambaran petir langsung per tahun ( $N_d$ ), bisa diperoleh dari perhitungan densitas rata-rata sambaran petir ke tanah  $/\text{km}^2 / \text{tahun}$  ( $N_g$ ) yang diprakirakan ke bangunan, dikalikan dengan area ekivalen ( $A_e$ ) bangunan. Dimana ditulis dalam persamaan 2.1 [6]

$$N_d = N_g \times A_e \times 10^{-6} \quad (2.1)$$

Dimana :

$N_d$  : frekuensi rata – rata sambaran petir ke bangunan  $\text{km}^4 / \text{tahun}$



$Ng$  : densitas rata-rata sambaran petir ke tanah /km<sup>2</sup> / tahun

$Ae$  : area cakupan ekivalen dari bangunan gedung (m<sup>2</sup>)

Dalam perancangan nilai  $Ng$  yang digunakan adalah 12 / km<sup>2</sup> / tahun. Dimana hasil tersebut diperoleh dari pengukuran yang diberikan Stasiun Geofisika pada tahun 2017 seperti yang terdapat pada Gambar 1.1

Area cakupan ekivalen dari suatu bangunan yaitu area permukaan tanah yang dianggap sebagai bangunan dengan nilai frekuensi sambaran petir langsung tahunan. Dihitung dengan persamaan 2.2 [6]

$$Ae = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \quad (2.2)$$

Dimana :

$a$  : panjang atap gedung (m)

$b$  : lebar atap gedung (m)

$h$  : tinggi atap gedung (m)

Area ekivalen sangat dipengaruhi oleh benda / bangunan lain yang ada disekitarnya apabila jarak benda tersebut kurang dari 3 ( $h + h_s$ ) sehingga area cakupan ekivalen akan saling tumpang tindih. Dalam hal ini, maka jika jarak benda  $< 3(h + h_s)$  area cakupan ekivalen dikurangi nilai  $x_s$ . nilai  $x_s$  ditulis dengan persamaan 2.3 [6]

$$x_s = \frac{d+3(hs-h)}{2} \quad (2.3)$$

Dimana :

$x_s$  : pengaruh jarak benda sekitar (m<sup>2</sup>)

$d$  : jarak antara bangunan dan benda (m)

$hs$  : tinggi benda sekitar bangunan (m)

### 2.2.3 Risk assessment / taksiran resiko

Suatu sistem proteksi petir yang baik, harus mampu melindungi seluruh bangunan beserta orang dan peralatan yang ada didalamnya guna menghindari bahaya yang ditimbulkan. Jika suatu bangunan di anggap beresiko terkena sambaran petir, maka akan dilakukan perhitungan untuk melakukan perancangan sistem penangkal petir eksternal yang diperlukan bangunan tersebut. Dalam menentukan seberapa besar resiko suatu bangunan terhadap sambaran petir berdasarkan Standar Nasional Indonesia 03-7015-2004, ditentukan dengan [6]:

- a. Jika  $N_d \leq N_c$ , maka tidak diperlukan proteksi.
- b. Jika  $N_d > N_c$ , maka memerlukan proteksi dengan tingkat efisiensi berdasarkan persamaan 2.4 [6]:

$$E = 1 - \frac{N_c}{N_d} \quad (2.4)$$

Dimana :

$E$  : Efisiensi

$N_c$  : Frekuensi sambaran petir maksimum yang dibolehkan dengan nilai ketetapan yaitu  $10^{-1}$  / tahun .[7]

$N_d$  : Frekuensi rata – rata sambaran petir ke bangunan  $\text{km}^4$  / tahun

Dengan nilai efisiensi yang diperoleh, akan menentukan tingkat proteksi berdasarkan Tabel 2.1 [6].

**Tabel 2. 1 Tingkat Proteksi**

Tingkat proteksi	Effisiensi
I	98 %
II	95 %
III	90 %
IV	80 %

## 2.2.4 Sistem Proteksi Petir Eksternal

Sistem proteksi eksternal terdiri dari 3 bagian yaitu sistem terminasi udara (*air terminal*), sistem konduktor (*down conductor*) dan sistem terminasi bumi (*grounding*).

### 2.2.4.1 Sistem terminasi udara

Sistem terminasi udara merupakan salah satu bagian dari sistem proteksi petir eksternal, yang berfungsi untuk mengetahui daerah proteksi petir dari penempatan *splitzer* (terminal udara). *Splitzer* merupakan suatu komponen yang digunakan untuk menangkap sambaran petir langsung. Dengan penangkapan petir tersebut bangunan atau benda disekitarnya tidak terkena sambaran petir yang bisa merusak bangunan atau benda disekitarnya. *Splitzer* tersebut ditempatkan sedemikian rupa sehingga bisa melindungi seluruh bagian bangunan dan tidak ada area yang tidak terlindungi.

Dalam penempatannya *splitzer* diletakkan pada jarak 2-3 meter lebih tinggi dari permukaan tertinggi bangunan guna menghindari peningkatan frekuensi sambaran petir langsung [8]. Dalam menghitung area proteksi berdasarkan penempatan *splitzer*, terdapat berbagai metode yaitu dengan metode sudut proteksi (*Razevig*), bola bergulir (*Rolling Sphere*) atau metode jala (*Mesh*). Dengan metode sudut proteksi (*Razevig*) area proteksi adalah area yang berada didalam daerah kerucut. Pada metode jala daerah proteksi adalah daerah keseluruhan permukaan jala. Pada perancangan ini menggunakan metode bola bergulir, dimana area proteksi, sudut dan radius proteksi terlihat seperti pada Gambar 1.2.

Besarnya radius proteksi dalam metode ini berhubungan dengan besarnya nilai arus petir dan dinyatakan dengan persamaan 2.5 [5]

$$R = I^{0.75} \quad (2.5)$$

Dimana :

$R$  = Radius proteksi (m)

$I$  = Arus maksimum (kA)

Setelah menentukan radius proteksi yang akan digunakan, maka selanjutnya adalah menghitung besarnya sudut lindung. Jika tinggi bangunan yang diproteksi lebih kecil dari radius, besarnya sudut lindung dari batang *splitzer* ke area proteksi dihitung dengan persamaan 2.6 [8]

$$a^0 = \sin^{-1} \left( 1 - \frac{h}{R} \right) \quad (2.6)$$

Dimana :

$a^0$  : sudut proteksi

$h$  : tinggi *splitzer* (m)

#### 2.2.4.2 Sistem konduktor

Sistem konduktor merupakan salah satu sistem dari proteksi petir eksternal yang berfungsi sebagai penyalur arus petir (down konduktor) yang diterima dari terminasi udara menuju elektroda bumi. Jenis konduktor yang digunakan dalam instalasi proteksi petir eksternal bisa menggunakan kabel terisolasi atau tanpa isolasi (telanjang). Beberapa faktor yang perlu diperhitungkan saat memilih konduktor yaitu ketahanan terhadap panas, pengaruh kimia atau korosi, konduktivitas tinggi, kekuatan tarik tinggi dan murah. Pada sistem konduktor luas penghantar arus petir menuju sistem terminasi bumi dihitung berdasarkan persamaan 2.7 sebagai berikut [9]:

$$A = I \sqrt{\frac{8.5 \times 10^{-6} S}{\log_{10} \left( \frac{T}{274} + 1 \right)}} \quad (2.7)$$

Dimana :

$A$  = Luas penampang penghantar (mm<sup>2</sup>)

$I$  = Arus petir maksimum (kA)

$S$  = Arus gangguan berlangsung (detik)

$T$  = Temperature konduktor yang diizinkan

Arus gangguan belangsung yaitu 0.001 detik dan tempertur konduktor yang diizinkan adalah 1000° C [9]. Jika hasil perhitungan yang diperoleh lebih kecil dari konduktor yang akan digunakan, maka Adrias (2000) yang dikutip oleh Gusrita (2009) menyatakan bahwa apabila luas penampang kabel yang akan digunakan tidak ada maka dapat digunakan kabel atau kawat yang mendekati nilai hasil perhitungan dan tidak boleh menggunakan kabel atau kawat yang lebih kecil dari hasil perhitungan tersebut [9].

### 2.2.4.3 Sistem terminasi bumi

Sistem terminasi bumi merupakan salah satu dari sistem proteksi petir eksternal yang berfungsi untuk merambatkan arus petir yang diterima dari konduktor menuju bumi. Dalam merambatkan arus petir tersebut yaitu dengan menanam satu atau beberapa elektroda ke bumi sehingga memperoleh nilai tahanan yang diinginkan. Elektroda bumi yang digunakan dalam sistem terminasi bumi bisa berbentuk elektroda batang, pita atau pelat, jika kabel konduktor yang terhubung ke konduktor merupakan kabel tanpa isolasi maka kabel konduktor yang tersentuh ke bumi juga berfungsi sebagai elektroda bumi. Dalam standar instalasi penangkal petir, nilai tahanan pentanahan untuk penangkal petir eksternal maksimal sebesar 5Ω. Terdapat beberapa metode dalam menghitung nilai tahanan pentanahan, pada penelitian ini menggunakan metode *single rod* dan *multiple rod* menggunakan persamaan berikut:

a. *Single Rod* (satu batang elektroda)

Nilai tahanan pentanahan dengan sat bantang elektroda, dihitung berdasarkan persamaan 2.8 [10]:

$$Rp = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \quad (2.8)$$

Dimana :

- $Rp$  : Tahanan pentanahan ( ohm )
- $\rho$  : Tahanan jenis tanah ( ohm-cm )
- $a$  : Jari-jari penampang pasak ( cm )

L : Panjang pasak tanah ( cm )

b. *Multiple rod*

Persamaan yang digunakan pada metode pasak tunggal dikembangkan oleh *Professor H.B. Dwight dari Institut Teknologi Massachusetts*. Jika nilai tahanan pada pasak tunggal belum memenuhi nilai tahanan yang diinginkan, maka dilakukan penambahan electrode dengan jarak elektroda minimal 2 meter dan dihubungkan dengan kabel elektroda seperti pada Gambar 1.9. Apabila masih memerlukan elektroda ketiga, maka elektroda ketiga harus diatur hingga memiliki jarak yang sama dengan elektroda lainnya. Sehingga ketiga batang elektroda membentuk segitiga sama sisi dengan jarak elektroda tidak boleh kurang dari dua kali panjang elektroda[3] Dimana perhitungan yang digunakan berdasarkan persamaan 2.9 yaitu :

$$R_p = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \times F \quad (2.9)$$

Dimana :

n = Jumlah elektroda

F = Faktor perkalian berdasarkan Tabel 2.2 [11]

**Tabel 2. 2 Faktor Perkalian**

<b>Jumlah rod</b>	<b>F</b>
2	1.16
3	1.29
4	1.36
8	1.68
12	1.80
16	1.92
20	2.00
24	2.16

Dalam usaha mencapai nilai tahanan pada sistem pentanahan, tidak semua tanah memberikan nilai yang diharapkan. Sehingga dilakukan pengolahan tanah agar tanah memiliki nilai tahanan jenis yang rendah. Nilai tahanan pada jenis tanah berbeda-beda karena terdapat beberapa factor yang mempengaruhi tahanan jenis tanah seperti

kandungan air, garam atau mineral, tekstur tanah dan derajat keasaman yang terdapat pada tanah tersebut. jika tanah cukup mengandung banyak air bahkan berlebih, maka nilai tahanan sebaran lebih mudah didapat sehingga konduktivitas pada tanah akan bagus. Salah satu tanah yang menandung banyak air yaitu tanah liat dan rawa. Untuk tanah dengan kandungan mineral / garam yang tinggi maka resistansi sebaran akan semakin baik karena lebih mudah dalam menghantarkan listrik. Contoh termudah yaitu tanah pantai yang mengandung banyak mineral dan garam yang tinggi sehingga nilai tahanan tanah sangat rendah. Untuk tekstur tanah, daerah yang tanahnya bertekstur pasir atau berpori-pori, maka akan sulit untuk mendapatkan tahanan yang baik karena air dan mineral pada tanah tersebut mudah hanyut dan mudah kering. Nilai tahanan jenis tanah tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.3 [2].

**Tabel 2. 3 Tahanan Jenis tanah**

Jenis tanah	Tanah rawa	Tanah liat & ladang	Pasir basah	Kerikil basah	Pasir dan kerikil kering	Tanah berbatu
Tahanan jenis tanah ( $\Omega$ -m)	30	100	200	500	1000	3000

Dalam mencapai nilai tahanan pentanahan, selain dari factor tahanan jenis tanah, juga terdapat variabel yang mempengaruhi hasil dari tahanan pentanahan dimana terdapat 4 variabel yaitu [2]:

- Kedalaman / panjang elektroda

Dalam acuan yang diberikan NEC code (1987, 250-83-3), minimal panjang elektroda yang terhubung ketanah yaitu 2.5 meter. Pada umumnya, dengan menggandakan panjang elektroda tanah maka bisa mengurangi tingkat resitansi pentanahan dengan tambahan hingga 40%. Namun hal tersebut tidak bisa dilakukan jika lapisan tanah terdapat batu.

- Diameter elektroda

Memperbesar diameter elektroda tanah memiliki efek yang tidak terlalu besar untuk memperoleh hasil tahanan tanah yang rendah. Misalnya, apabila menggandakan diameter sebuah elektroda maka penurunan tahanan tanah hanya 10%.

- Jumlah lektroda

Dalam usaha menurunkan tahanan tanah yaitu dengan menambahkan elektroda yang dihubung paralel. Agar diperoleh hasil yang efektif, dalam menambahkan elektroda dari satu elektroda menjadi dua elektroda maka elektroda tambahan minimal sama dengan kedalaman batang yang telah ditanam.

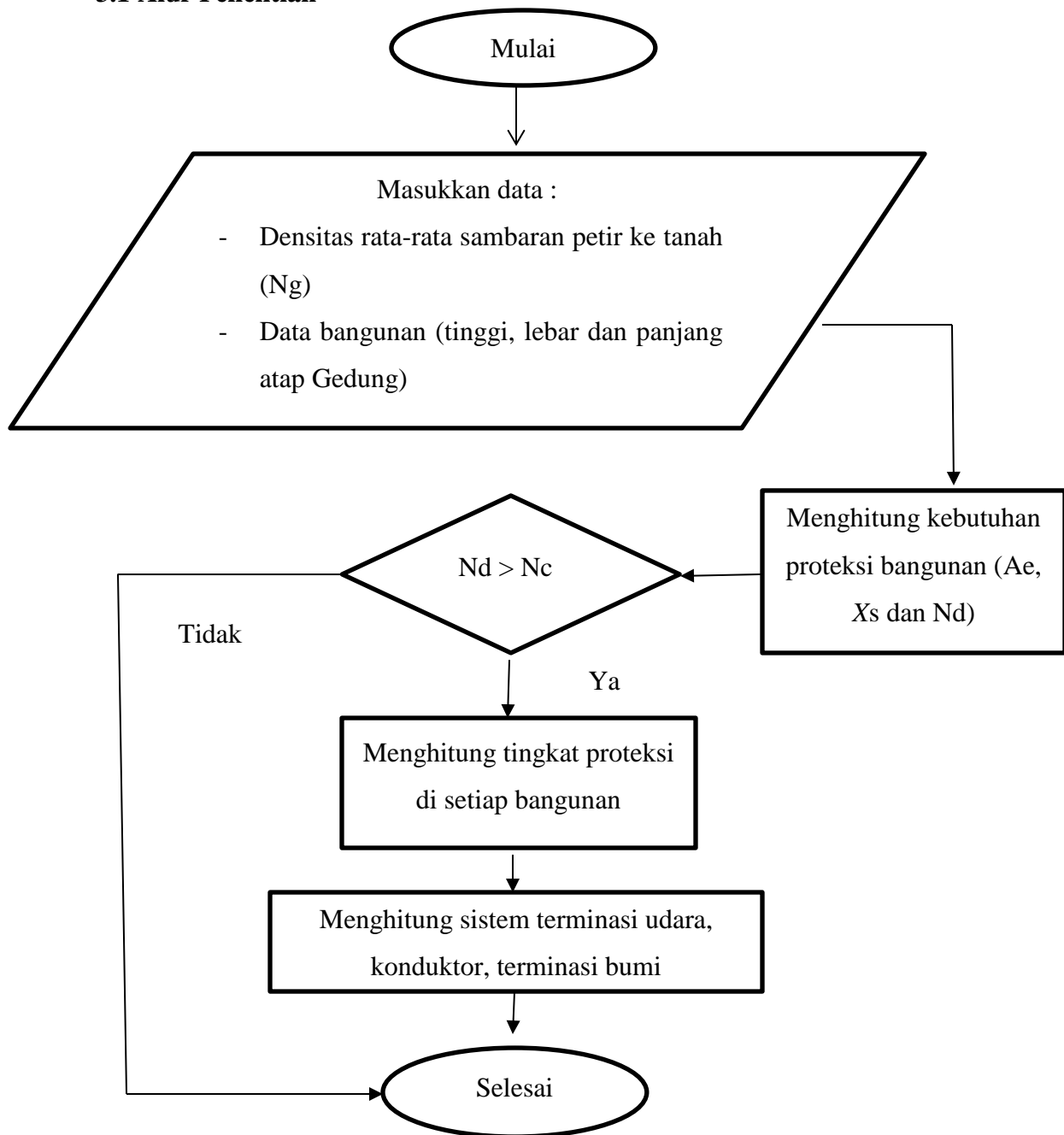
- Desain sistem grounding

Sistem grounding sederhana terdiri dari satu batang elektroda yang ditanamkan ketanah. Sistem grounding yang kompleks yaitu beberapa batang elektroda yang saling terhubung, pelat atau lainnya. Hal tersebut meningkatkan jumlah kontak konduktor ke bumi sehingga resistansi tanah yang diperoleh semakin rendah.

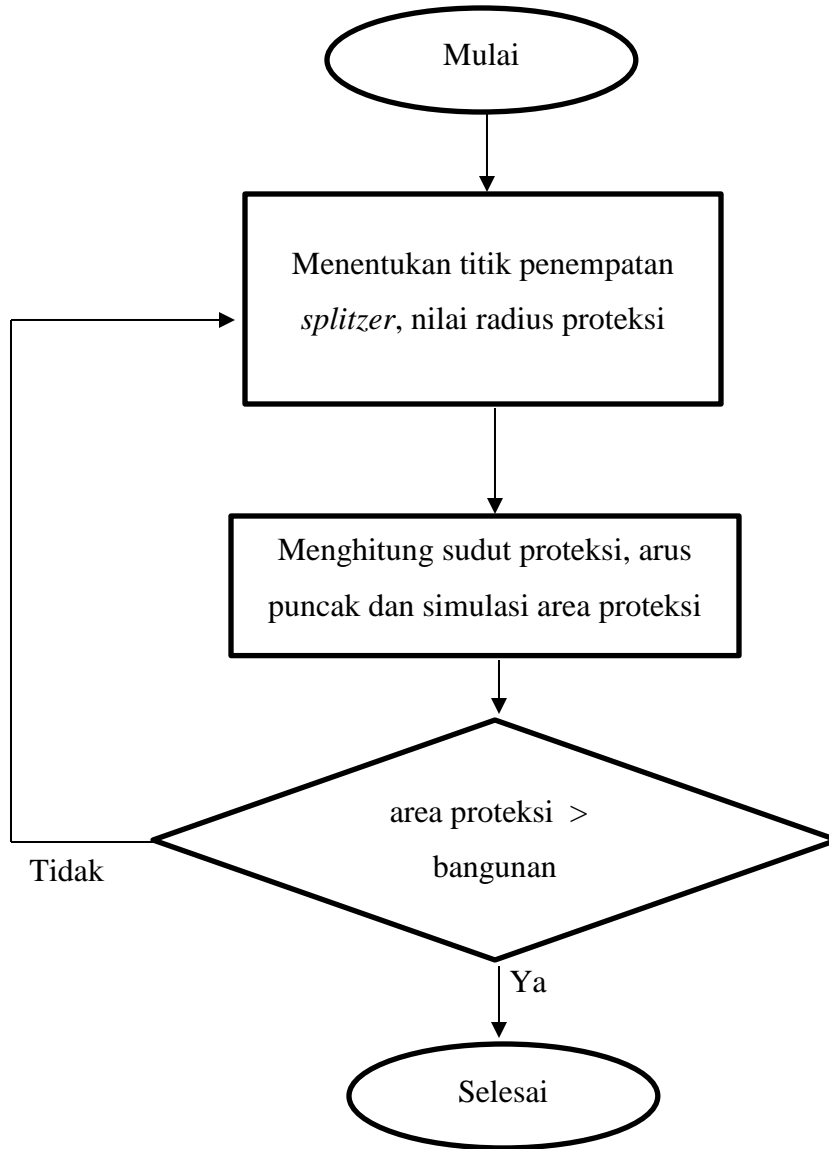


## BAB 3 METODOLOGI

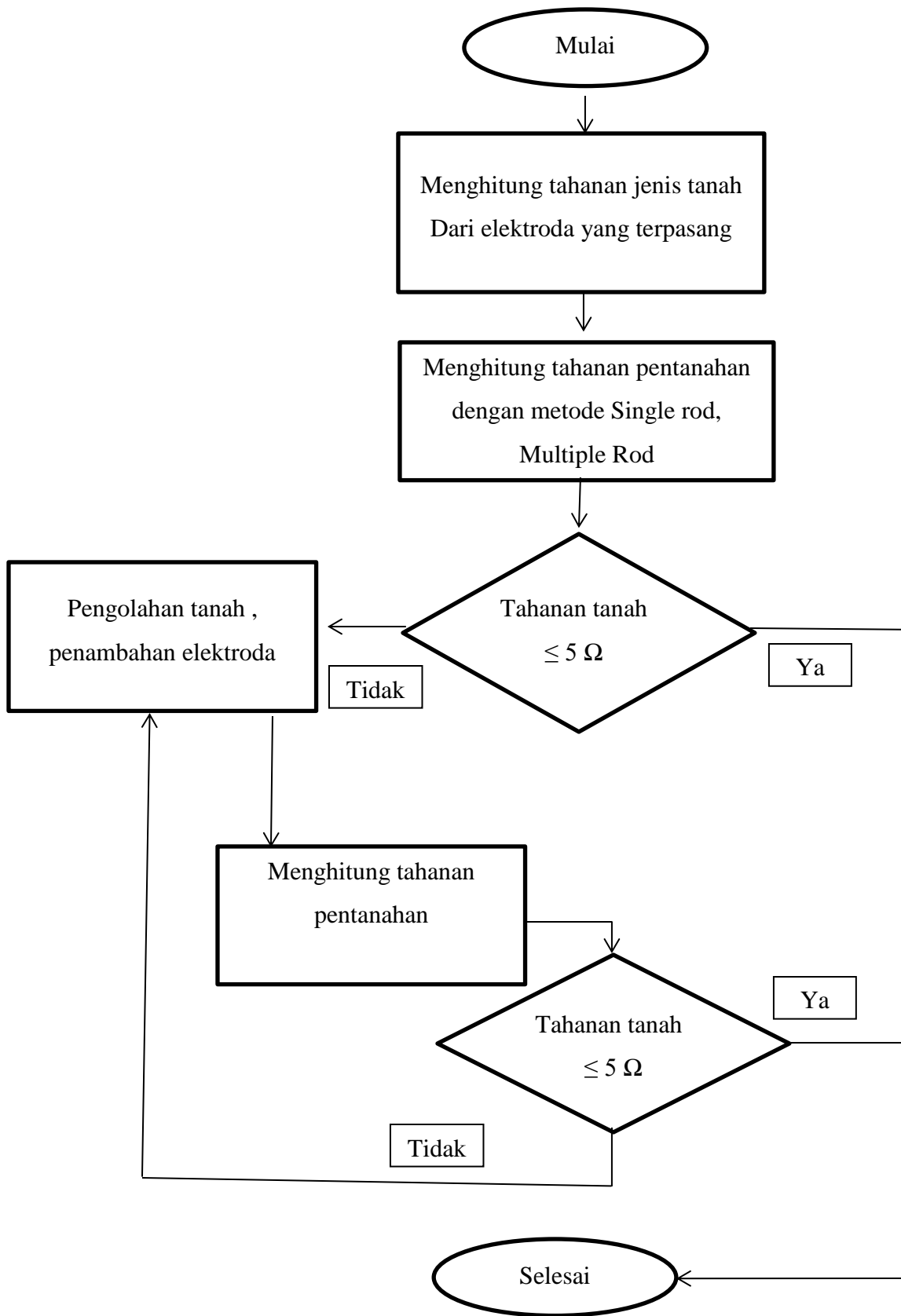
### 3.1 Alur Penelitian



Gambar 3. 1 Alur Penelitian



Gambar 3. 2 Diagram Terminasi Udara



Gambar 3. 3 Diagram Terinasi Bumi

### **3.2 Alat dan Bahan (jika dibutuhkan)**

Sub-bab ini berisi daftar peralatan dan bahan yang digunakan selama melakukan penelitian

1. Meter konvensional dan meteran laser untuk mengukur panjang, lebar, jarak antar bangunan dan ketinggian puncak bangunan.
2. Perangkat lunak SketchUp Pro untuk menggambar bangunan dan melihat apakah bangunan yang diproteksi berada pada area proteksi.
3. Earth tester ground digunakan untuk mencari nilai tahanan pentanahan pada lokasi bangunan saat pengumpulan data.
4. Data rod dan densitas sambaran petir digunakan untuk mengetahui nilai tahanan jenis tanah dan menghitung kebutuhan proteksi bangunan.

### **3.3 Perancangan Sistem**

Dalam perancangan sebuah sistem penangkal petir, hal utama yang perlu diperhitungkan yaitu mengetahui apakah bangunan memerlukan penangkal petir eksternal atau tidak dengan menghitung *risk assessment*, mengetahui tingkat proteksi, menghitung sistem terminasi udara, menentukan jenis dan kebutuhan kabel konduktor dan menghitung nilai tahanan pentanahan pada sistem terminasi bumi.

#### **3.3.1 Kebutuhan Proteksi Bangunan**

Menghitung kebutuhan proteksi disetiap bangunan bertujuan untuk menentukan apakah bangunan memerlukan proteksi atau tidak. Jika memerlukan proteksi, maka akan ditentukan tingkat proteksinya. Pada AirNav Indonesia Cabang Yogyakarta terdapat 4 bangunan yang akan dilakukan penelitian untuk menentkan bangunan tersebut memerlukan proteksi atau tidak yaitu :

### 3.3.1.1 Bangunan Peralatan

Pada bangunan ini, bangunan berbentuk huruf L dimana dalam proses perhitungan untuk menentukan tingkat proteksi, bangunan dihitung per bagian yaitu bangunan pada Generator dan bangunan teknisi.

a. Bangunan generator

Pada bangunan ini panjang bangunan 18 meter, lebar 5.65 meter dan tinggi bangunan 6 meter. Pada bagian timur terdapat Tower radar lama dengan jarak 7 meter dan tinggi tower 25 meter. Untuk menghitung area ekivalen ( $A_e$ ) menggunakan persamaan 2.2 persamaan 2.3 untuk pengaruh jarak bangunan diperoleh :

$$X_s = 17 \text{ m}^2$$

$$A_e \text{ pada Generator} = 1956.46 \text{ m}^2$$

b. Bangunan teknisi

Pada bangunan ini panjang bangunan 30.35 meter, lebar 16 meter dan tinggi bangunan 6 meter ditambah tinggi peralatan yang berada di atasnya yaitu 3 meter. Pada bagian selatan terdapat tower radar lama dengan jarak 5 meter dengan tinggi tower 25 meter, pada bagian timur terdapat tower baru dengan jarak 3 meter dengan ketinggian 28 meter dan pada bagian antara timur-selatan terdapat bangunan ATC dengan jarak 5 meter dengan ketinggian 15 meter. Maka berdasarkan persamaan 2.2 untuk area ekivalen dan persamaan 2.3 untuk pengaruh jarak bangunan diperoleh :

$$X_s = 17 \text{ m}^2$$

$$A_e \text{ pada bangunan teknisi} = 3039.975 \text{ m}^2$$

Berdasarkan hasil diatas, maka frekuensi rata-rata sambaran petir ke bangunan peralatan berdasarkan persamaan 2.1 adalah :

$$N_d = N_g \times A_e \times 10^{-6} = 0.059 \text{ km}^4 / \text{Tahun}$$

Karena nilai  $N_c = 0.1$  dan  $N_d = 0.06$ ,  $N_d < N_c$  maka tidak diperlukan proteksi pada bangunan tersebut.

### 3.3.1.2 Air Traffic Control (ATC)

Pada bangunan ini panjang bangunan 15 meter, lebar 15 meter dan tinggi bangunan 15 meter. Pada bagian barat terdapat tower radar lama dengan jarak 9 meter dan tinggi tower 25 meter, pada bagian utara terdapat tower baru dengan jarak 1 meter dan tinggi 28 meter. Pada bagian antara barat-utara terdapat bangunan teknis dengan jarak 5 m dan tinggi 9 meter. Pada bagian selatan terdapat bangunan untuk trafo, dengan jarak 14 meter dan tinggi 5 meter. Maka berdasarkan persamaan 2.2 untuk area ekuivalen dan persamaan 2.3 untuk pengaruh jarak bangunan diperoleh :

$$X_s = 73 \text{ m}^2$$

$$A_e \text{ pada bangunan ATC} = 9210.5 \text{ m}^2$$

Berdasarkan hasil diatas maka frekuensi rata-rata sambaran petir ke bangunan peralatan berdasarkan persamaan 2.1 adalah :

$$Nd = Ng \times Ae \times 10^{-6} = 0.11 \text{ km}^4/\text{Tahun}$$

Karena nilai  $Nd \geq Nc$  maka diperlukan proteksi pada bangunan tersebut dengan efisiensi berdasarkan persamaan 2.4 yaitu :

$$E > 1 - \frac{Nc}{Nd}$$

$$E > 0.095$$

Maka berdasarkan Tabel 2.1 digunakan proteksi tingkat 4 dengan minimal efisiensi 80 %..

### 3.3.1.3 Tower radar PSR,SSR

Pada tower ini panjang 5 meter, lebar 5 meter dan tinggi 25 meter. Pada bagian barat terdapat bangunan dengan jarak 7 meter dan tinggi 6 meter, pada bagian utara terdapat bangunan dengan jarak 5 meter dan tinggi 9 meter. Pada bagian antara utara-selatan terdapat tower dengan jarak 14 m dan tinggi 28 meter. Pada bagian timur terdapat bangunan ATC dengan jarak 9 meter dan tinggi 15 meter. Maka berdasarkan persamaan 2.2 untuk area ekuivalen dan persamaan 2.3 untuk pengaruh jarak bangunan diperoleh hasil sebagai berikut :

$$X_s = 89.5 \text{ m}^2$$

$$A_e \text{ pada bangunan teknis} = 19098 \text{ m}^2$$

Berdasarkan hasil diatas maka frequensi rata-rata sambaran petir ke bangunan peralatan berdasarkan persamaan 2.1 adalah :

$$\begin{aligned} Nd &= Ng \times Ae \times 10^{-6} \\ &= 0.229 \text{ km}^4 / \text{Tahun} \end{aligned}$$

Karena nilai  $Nd \geq Nc$  maka diperlukan proteksi pada bangunan tersebut dengan effisiensi berdasarkan persamaan 2.4 yaitu :

$$\begin{aligned} E &> 1 - \frac{Nc}{Nd} \\ E &> 0.563 \end{aligned}$$

Maka berdasarkan Tabel 2.1 digunakan proteksi tingkat 4 dengan minimal effisiensi 80 %.

#### **3.3.1.4 Tower radar MSSR Mode-S**

Pada tower ini panjang 5 meter, lebar 5 meter dan tinggi 28 meter. Pada bagian barat terdapat bangunan dengan jarak 3 meter dan tinggi 9 meter, pada bagian selatan terdapat bangunan ATC dengan jarak 1 meter dan tinggi 15 meter. Maka berdasarkan persamaan 2.2 untuk area ekivalen dan persamaan 2.3 untuk pengaruh jarak bangunan diperoleh hasil sebagai berikut :

$$X_s = 41.5 \text{ m}^2$$

$$A_e \text{ pada tower MSSR Mode-S} = 23819.34 \text{ m}^2$$

Berdasarkan hasil diatas maka frequensi rata-rata sambaran petir ke bangunan peralatan berdasarkan persamaan 2.1 adalah :

$$\begin{aligned} Nd &= Ng \times Ae \times 10^{-6} \\ &= 0.285 \text{ km}^4 / \text{Tahun} \end{aligned}$$

Karena nilai  $Nd \geq Nc$  maka diperlukan proteksi pada bangunan tersebut dengan effisiensi berdasarkan persamaan 2.4 yaitu :

$$E > 1 - \frac{Nc}{Nd}$$

$$E > 0.65$$

Maka berdasarkan Tabel 2.1 digunakan proteksi tingkat 4 dengan minimal efisiensi 80 %.

### 3.3.2 Sistem terminasi udara

Sistem terminasi udara yang akan digunakan pada bangunan yang akan diproteksi yaitu menggunakan metode bola bergulir yang akan dipasang pada :

#### 3.3.2.1 Tower Radar PSR-SSR dan MSSR MODE-S

Pada bangunan tower PSR-SSR dan MSSR MODE-S, sistem penempatan *splitzer* pada ketinggian 3 meter dari ketinggian bangunan yang paling tinggi yaitu pada tower radar MSSR MODE-S. Berdasarkan tingkat proteksi pada bangunan tower radar PSR-SSR adalah tingkat IV, maka berdasarkan Tabel 2.6 Radius proteksinya adalah 60 m [12] dan arus puncak berdasarkan persamaan 2.5 yaitu:

$$R (m) = I^{0.75}$$

$$I = 234.892 \text{ kA}$$

Pemasangan *splitzer* pada tower dipasang sebanyak 2 buah yaitu pada tower radar PSR-SSR dan MSSR-S dengan ketinggian yang sama.. namun pada saat menggunakan radius 60 m hasil yang ditunjukkan sangat tidak baik karena tower berada diluar area proteksi seperti terlihat pada Gambar 4.1 sehingga dilakukan perubahan nilai radius menjadi 150 sehingga nilai arus puncak berdasarkan persamaan 2.5 yaitu :

$$R (m) = I^{0.75}$$

$$I = 796.993 \text{ kA}$$

Besarnya sudut lindung yaitu berdasarkan persamaan 2.6 yaitu:

$$\alpha^0 = \sin^{-1} \left( 1 - \frac{31}{150} \right)$$



$$a^0 = 52,498$$

Hasil tersebut saat diterapkan pada program SketchUp terlihat seperti pada Gambar 4.2, Dimana sangat sedikit bangunan yang tidak terproteksi. Sehingga dilakukan perubahan posisi tiang *splitzer* petir sejauh 0.5 meter ke arah utara sehingga bangunan terproteksi sepenuhnya seperti pada Gambar 4.3.

### 3.3.2.2 Air Traffic Control (ATC)

Jika dilihat dari Gambar 4.3 bangunan ATC sudah berada di dalam area lidung sehingga tidak perlu instalasi penangkal petir.

### 3.3.3 Sistem konduktor

Pada bagian sistem konduktor yang akan mengalirkan arus yang diterima dari terminasi udara menuju sistem terminasi bumi, kabel konduktor menggunakan kabel terisolasi, dikarenakan struktur bangunan yang terbuat dari besi. Dimana luas penampang minimal berdasarkan persamaan 2.7 adalah sebagai berikut:

$$A = I \sqrt{\frac{8.5 \times 10^{-6} S}{\log_{10}\left(\frac{T}{274} + 1\right)}}$$
$$A = 34.1 \text{ mm}^2$$

### 3.3.4 Sistem terminasi bumi

Pada saat melakukan penelitian, diperoleh data suatu sistem grounding dengan metode elektroda tunggal yang ditanam ke tanah dengan nilai tahanan pentanahan 43.1  $\Omega$  seperti pada Gambar 1.3, panjang elektroda / kedalaman elektroda 6 m, jari-jari elektroda 0.015 m. Pada saat pengambilan data, pengukuran dilakukan secara langsung menggunakan Earth tester ground untuk mengetahui nilai tahanan tanah pada elektroda tersebut, untuk kedalaman penanaman elektroda data diketahui dengan tanya jawab kepada Bapak Sutikno A.Md, selaku kepala bagian teknisi AirNav Indonesia Perum LPPNPI Cabang Yogyakarta. Dari data tersebut bisa diketahui tahanan jenis tanah pada daerah tersebut menggunakan persamaan 2.8:

$$5 = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$$

$$\rho = 254.636 \Omega\text{-m}$$

Dari hasil tersebut berdasarkan Tabel 2.3 maka jenis tanah adalah pasir basah. Tahanan jenis tanah ini akan dijadikan referensi untuk merancang sistem grounding pada tower radar PSR-SSR dan tower radar MSSR Mode-S. Berikut perancangan sistem grounding menggunakan metode elektroda tunggal dan multiple rod.

### 3.3.4.1 Elektroda tunggal

Pada perhitungan nilai tahanan jenis tanah berdasarkan pengukuran tahanan pentanahan, tahanan jenis tanah adalah pasir basah. Untuk melakukan pengolahan tanah, maka dilakukan perubahan nilai tahanan pentanahan untuk mengetahui target nilai tahanan jenis tanah yang dibutuhkan dengan asumsi bahwa nilai tahanan jenis tanah saat perancangan sama dengan nilai tahanan jenis saat pengukuran. Sehingga bisa diketahui apakah dengan elektroda tunggal bisa memperoleh tahanan pentanahan dibawah  $5\Omega$ . Karena nilai tahanan terlalu besar maka diambil nilai perancangan awal dengan panjang elektroda yaitu 10 m dan jari-jari elektroda tetap pada 0.015 m. Diperoleh nilai tahanan pentanahan berdasarkan persamaan 2.8 yaitu :

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

$$5 = \frac{\rho}{2 \times 3.14 \times 10} \left( \ln \frac{4 \times 10}{0.015} - 1 \right)$$

$$\rho = 45.588 \Omega\text{-m}$$

Dari hasil perancangan sistem grounding dengan metode elektroda tunggal, maka tahanan jenis tanah yang dibutuhkan pada elektroda dengan panjang 10 meter adalah  $45.588265904 \Omega\text{-m}$ . Untuk memperoleh nilai tahanan pentanahan dibawah  $5\Omega$ , maka panjang elektroda harus ditambah atau pengolahan tanah harus memperoleh nilai tahanan pentanahan yang lebih kecil dari  $45.588265904 \Omega\text{-m}$ . Jika dilihat berdasarkan Tabel 2.3 maka tahanan jenis tanah yang dibutuhkan yaitu berada antara tanah liat dan rawa.

### 3.3.4.2 Multiple rod

Perancangan ini panjang elektroda yang digunakan cukup panjang mengingat nilai tahanan jenis tanah yang begitu besar, yaitu panjang 8 m dan jari jari 1.5 cm, karena nilai tahanan jenis tanah yang tinggi maka pada perancangan ini dilakukan pengolahan tanah menjadi tanah liat yaitu berdasarkan Tabel 2.3 tanah liat memiliki tahanan jenis tanah sebesar 100  $\Omega$ -m. Dengan jumlah elektroda yaitu 3 buah, diperoleh nilai tahanan pentanahan berdasarkan persamaan 2.9 yaitu :

$$R_p = \frac{\frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)}{n} \times F$$
$$R_p = 6.56 \Omega$$

Dari nilai tersebut bisa diketahui nilai sudah mendekati 5 $\Omega$ , sehingga dicoba melakukan penambahan panjang elektroda namun pada elektroda dengan panjang 9 m masih belum mendapat nilai di bawah 5  $\Omega$ , lalu elektroda diperpanjang kembali menjadi 10 m dan diperoleh hasil nilai tahanan pentanahan berdasarkan persamaan 2.9 yaitu :

$$R_p = \frac{\frac{100}{2 \times 3.14 \times 10} \left( \ln \frac{4 \times 10}{0.015} - 1 \right)}{3} \times 1.29$$
$$R_p = 4.716 \Omega$$

Dari nilai tersebut maka tahanan pentanahan sudah terpenuhi.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan perhitungan untuk menentukan apakah bangunan memerlukan proteksi atau tidak dengan melihat kondisi geografis dan kondisi bangunan maka diperoleh hasil yang ditunjukkan tabel berikut :

**Tabel 4. 1 Frekuensi Sambaran Petir**

<b>Bangunan</b>	<b><i>Ng</i> per / Tahun</b>	<b><i>Ae</i> / Km<sup>2</sup></b>	<b>(Nd) km<sup>4</sup> / Tahun</b>	<b>(Nc) km<sup>4</sup> / Tahun</b>	<b>E</b>	<b>Keterangan</b>
Peralatan	12 Km <sup>2</sup>	4993.435 x 10 <sup>-6</sup>	0.0599	0.1	-	Tidak perlu
ATC	12 Km <sup>2</sup>	9210.5 x 10 <sup>-6</sup>	0.11052	0.1	80 %	Perlu
Tower PSR-SSR	12 Km <sup>2</sup>	19098 x 10 <sup>-6</sup>	0.22917	0.1	80 %	Perlu
Tower MSSR Mode-S	12 Km <sup>2</sup>	23819.34 x 10 <sup>-6</sup>	0.28583	0.1	80 %	Perlu

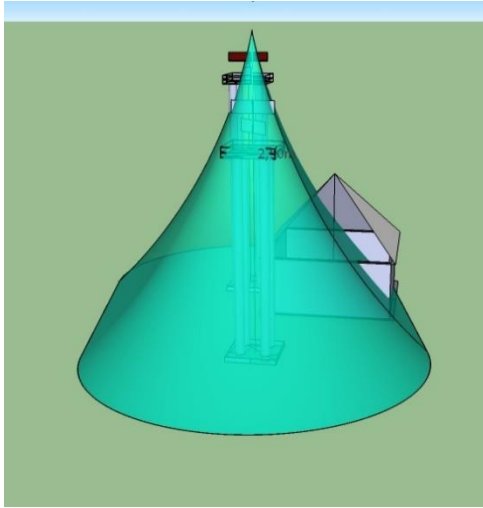
Dari Tabel 4.1, bisa diketahui bahwa dari keempat bangunan, bangunan yang memerlukan instalasi penangkal petir eksternal adalah ATC, Tower PSR-SSR dan Tower MSSR Mode-S. Dimana Tower MSSR Mode-S memiliki area cakupan ekivalen yang paling besar dengan nilai 23819.34 m<sup>2</sup>. Besarnya nilai tersebut sangat dipengaruhi oleh tingginya bangunan. Sedangkan pada bangunan peralatan tidak memerlukan proteksi dikarenakan area cakupan ekivalen hanya 4993.435 m<sup>2</sup> sehingga setelah dihitung frekuensi rata-rata sambaran petir, hanya pada bangunan peralatan yang memiliki frekuensi rata-rata sambaran petir yang lebih kecil dari frekuensi maksimal. hasil tersebut sangat dipengaruhi oleh tinggi bangunan yang

sangat rendah. Berikut data bangunan dan pengaruh bangunan sekitarnya yang ditunjukkan pada Tabel 4.2.

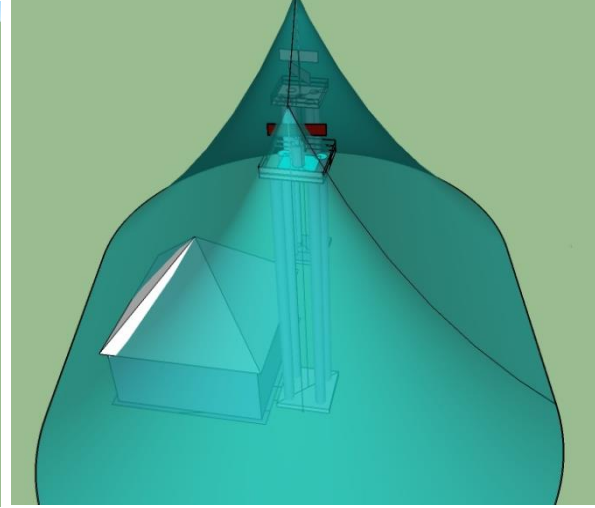
**Tabel 4. 2 Data Bangunan**

Nama Bangunan		Panjang atap	Lebar atap	Tinggi atap
Peralatan	Bangunan generator	18 m	5.65 m	6 m
	Bangunan teknisi	30.35 m	16 m	9 m
ATC		15 m	15 m	15
Tower PSR-SSR		5 m	5 m	25
Tower MSSR Mode-S		5 m	5 m	28

Pada sistem terminasi udara, Penempatan terbaik *splitzer* seharusnya berada di titik tengah bagian atas tower. Namun hal tersebut tidak memungkinkan karena radar pada bagian atas tower MSSR-S berputar sehingga *splitzer* tidak bisa ditempatkan. Dari perancangan yang dilakukan pada tower radar MSSR-S, dipilih penempatan *splitzer* pada bagian timur tower yang ditempatkan dengan jarak 3 meter ke utara. Penempatan dianggap ideal karena sistem terminasi udara pada tower ini telah melindungi bangunan ATC. Sedangkan pada tower radar PSR-SSR ditempatkan pada titik tengah radar yang sudah tidak aktif lagi. Radius proteksi yang digunakan pada tower radar MSSR-S dan PSR-SSR sejauh 60 m dengan sudut proteksi 28.9°, diperoleh hasil yang tidak memuaskan karena masih terdapat area yang tidak terlindungi seperti yang terlihat pada Gambar 4.1a.

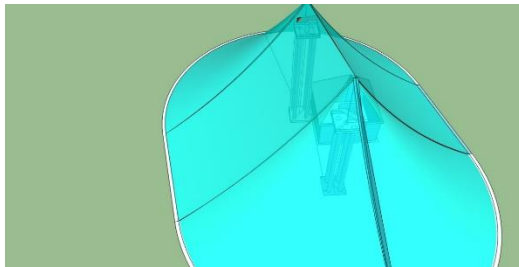


**Gambar 4.1 a Area Proteksi R =60 m**

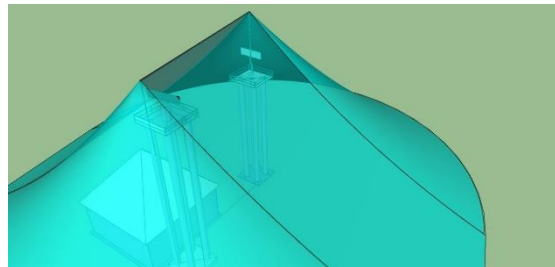


**Gambar 4.1 b Area Proteksi R =80 m**

Pada percobaan menggunakan radius 80 yang terlihat seperti gambar 4.1b dimana bangunan masih tidak sepenuhnya terlindungi. Pada saat menggunakan radius 120 seperti yang terlihat pada Gambar 4.1c dan radius 150 seperti yang terlihat pada Gambar 4.1d area yang tidak terproteksi sangat sedikit yaitu pada sisi utara.

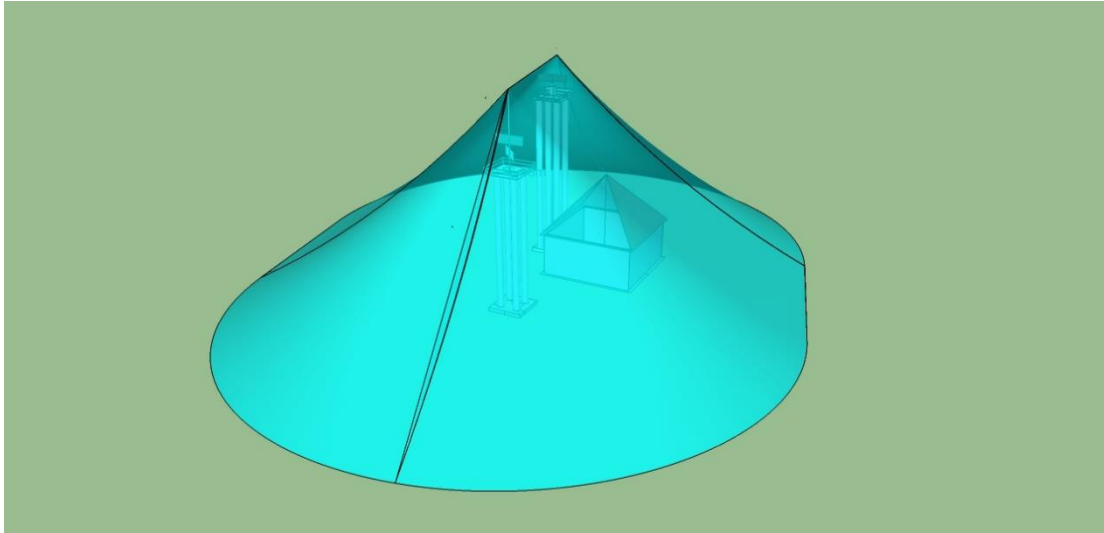


**Gambar 4.1 c Area Proteksi R =120**



**Gambar 4.1 d Area Proteksi R=150m**

Pada sisi selatan, masih terdapat area proteksi yang cukup jauh sehingga dilakukan pergeseran tiang sejauh 0.5 meter ke utara. Dari hasil tersebut bisa diketahui area pada kedua tower telah terlindungi dan pada bangunan ATC sudah berada pada area proteksi seperti terlihat pada Gambar 4.1e, sehingga bangunan ATC tidak perlu pemasangan penangkal petir.



**Gambar 4.1 e Area Proteksi R=150 m Setelah Pergeseran**

Pada sistem konduktor, konduktor yang digunakan adalah konduktor terisolasi dikarenakan struktur bangunan pada kedua tower adalah besi dan pada bagian terminasi bumi menggunakan metode single rod dan multiple rod, pada metode single rod pengolahan tanah akan sangat sulit karena pengolahan harus mencapai  $45.588 \Omega\text{-m}$  yang artinya tanah sekitar elektroda yaitu berada antara tanah liat dan rawa. Pada metode multiple rod diambil asumsi pengolahan tanah adalah tanah liat karena tanah liat biasa menjadi metode pengolahan tanah yang sangat sering digunakan. Dengan metode multiple rod ini panjang elektroda yang digunakan adalah 10 m sebanyak 3 buah dan diperoleh hasil tahanan pentanahan sebesar  $4.716 \Omega$ . Nilai  $4.716 \Omega$  ini sudah memenuhi standar karena maksimal tahanan pentanahan berdasarkan PUIL 2000, tahanan pentanahan maksimal  $5 \Omega$ . Pada metode multiple rod ini nilai tahanan pentanahan bukanlah nilai yang paling efisien karena nilai elektroda dan jumlah elektroda masih bisa dirubah sesuai kondisi saat pemasangan elektroda.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil penelitian dan pembahasan diperoleh kesimpulan sebagai berikut : Berdasarkan Standar Nasional Indonesia 03-7015-2004, bangunan yang memerlukan penangkal petir eksternal pada AirNav Indonesia cabang Yogyakarta terdapat bangunan yang memiliki frekuensi rata-rata sambaran petir yang melebihi batas maksimal frekuensi sambaran petir yang dibolehkan. Maksimal frekuensi rata-rata sambaran petir yang dibolehkan adalah  $0.1 \text{ km}^4/\text{tahun}$  sedangkan tower radar MSSR Mode – S memiliki frekuensi sambaran petir kebangunan sebesar  $0.285 \text{ km}^4/\text{tahun}$ , tower radar PSR-SSR dengan frekuensi sambaran petir kebangunan sebesar  $0.229 \text{ km}^4/\text{tahun}$ , dan bangunan ATC dengan frekuensi sambaran petir kebangunan sebesar  $0.1105 \text{ km}^4/\text{tahun}$ . Pada sistem terminasi udara penempatan *splitzer* diatas tower radar MSSR Mode – S dan tower radar PSR-SSR pada ketinggian 31 m, menggunakan metode *Rolling Sphere* dengan radius 150 m, sudut proteksi sebesar  $52.49^\circ$  dan arus maksimal sebesar  $796.993 \text{ kA}$ . Pada sistem sistem konduktor menggunakan kabel terisolasi dengan luas penampang minimal  $34.1 \text{ mm}^2$ . Pada sistem terminasi bumi pada elektroda tunggal, untuk mendapatkan tahanan tanah  $\leq 5 \Omega$  nilai tahanan jenis tanah yang diolah harus  $\leq 45.588 \Omega\text{-m}$  dengan panjang elektroda minimal 10 m. Pada elektroda multiple rod untuk mendapatkan tahanan tanah  $\leq 5 \Omega$  dan pengolahan tanah menjadi  $100 \Omega\text{-m}$ , jumlah elektroda 3 batang dengan panjang elektroda 10 m.

#### **5.2 Saran**

Dari kesimpulan yang diperoleh, maka saran yang bisa diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Untuk menentukan bangunan memerlukan proteksi petir atau tidak, dilakukan



perhitungan menggunakan standar selain Standar Nasional Indonesia 03 7015-2004 sebagai pembandingan.

2. Pada sistem terminasi bumi diperlukan tahanan jenis tanah yang baik sehingga perlu penelitian untuk mengetahui lokasi tanah yang memiliki tahanan jenis tanah rendah di area sekitar AirNav Indonesia Cabang Yogyakarta.

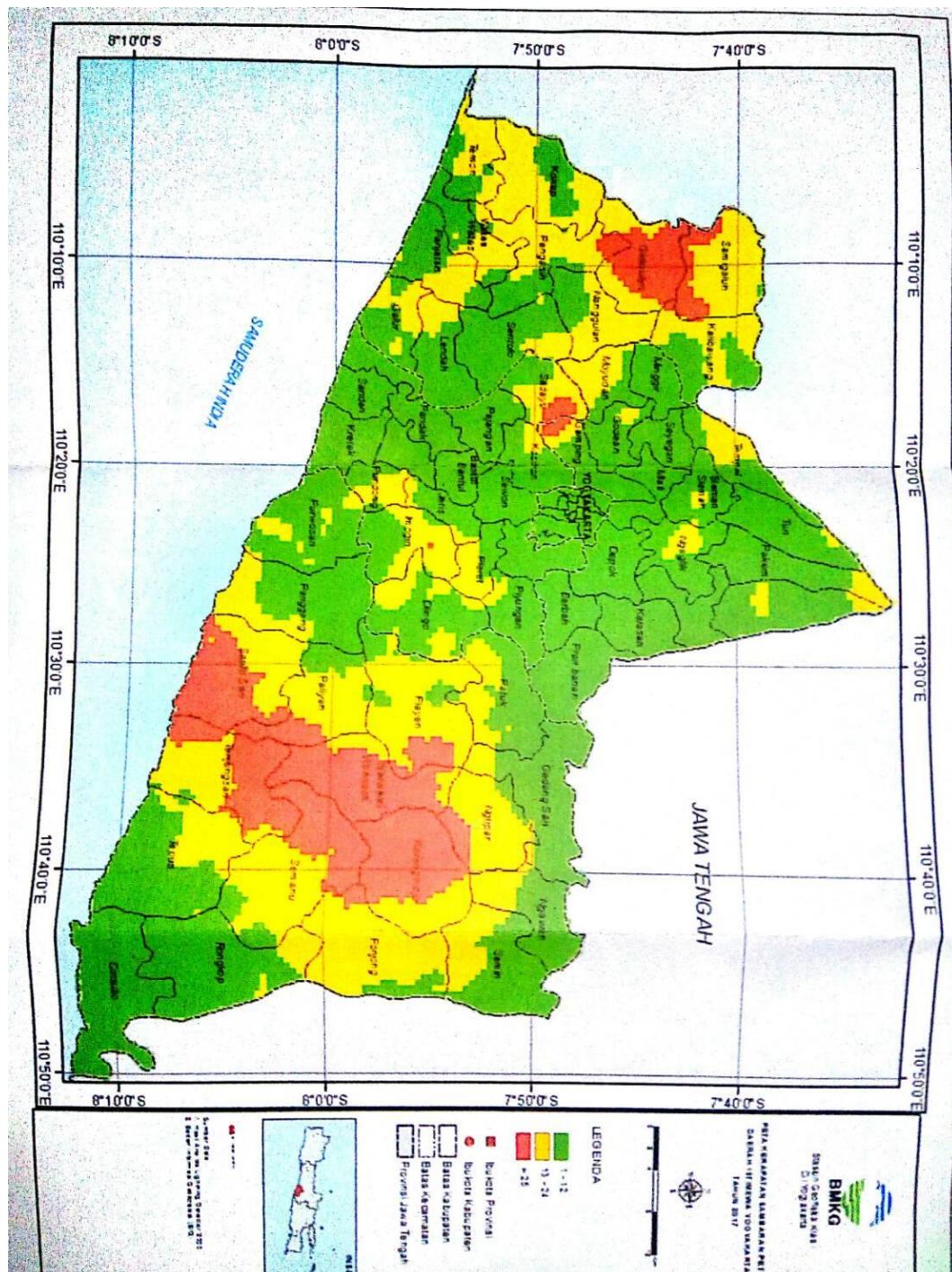
## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. N. Indonesia and B. S. Nasional, “Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000),” vol. 2000, no. Puil, 2000.
- [2] E. Kantona, “Perencanaan pemasangan grounding penangkal petir pada bangunan cf silo di proyek indarung vi pt. semen padang tugas akhir,” 2016.
- [3] T. Akhir, “Prodi Teknik Listrik Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Padang,” 2016.
- [4] R. Ariesta *et al.*, “STUDI ANALISIS SISTEM PENTANAHAN EKSTERNAL PADA GEDUNG UNIT PELAKSANA TEKNIS TEKNOLOGI INFORMASI DAN KOMUNIKASI UNIVERSITAS LAMPUNG,” *Stud. Anal. Sist. PENTANAHAN EKSTERNAL PADA GEDUNG UNIT PELAKSANA Tek. Teknol. Inf. DAN Komun. Univ. LAMPUNG*, pp. 1–5.
- [5] *OPTIMALISASI SISTEM PENANGKAL PETIR EKSTERNAL MENGGUNAKAN JENIS EARLY STREAMER*. 2010.
- [6] S. N. Indonesia, “Sistem proteksi petir pada bangunan gedung,” 2004.
- [7] M. Sukmawidjaja *et al.*, “ANALISIS PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI BANGUNAN THE BELLAGIO RESIDENCE TERHADAP SAMBARAN PETIR,” vol. 12, pp. 75–86, 2015.
- [8] M. Ulfa, “Perencanaan sistem penangkal petir di gedung bengkel teknik alat berat politeknik negeri padang,” 2016.
- [9] J. Gajah, “( APLIKASI BALAI KOTA PARIAMAN ) Oleh :,” vol. 1, no. 2, pp. 12–18, 2012.
- [10] E. Rod, “Pengembangan Sistem Penangkal Petir dan Pentanahan,” vol. 3, no. 2, pp. 66–71, 2016.
- [11] C. P. Systems, *Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*, vol. 2007. 2007.
- [12] G. Principles and R. Management, “Introduction BS EN / IEC 62305 Lightning protection standard Key points Guide to BS EN / IEC 62305,” vol. 44, no. 0, 2008.

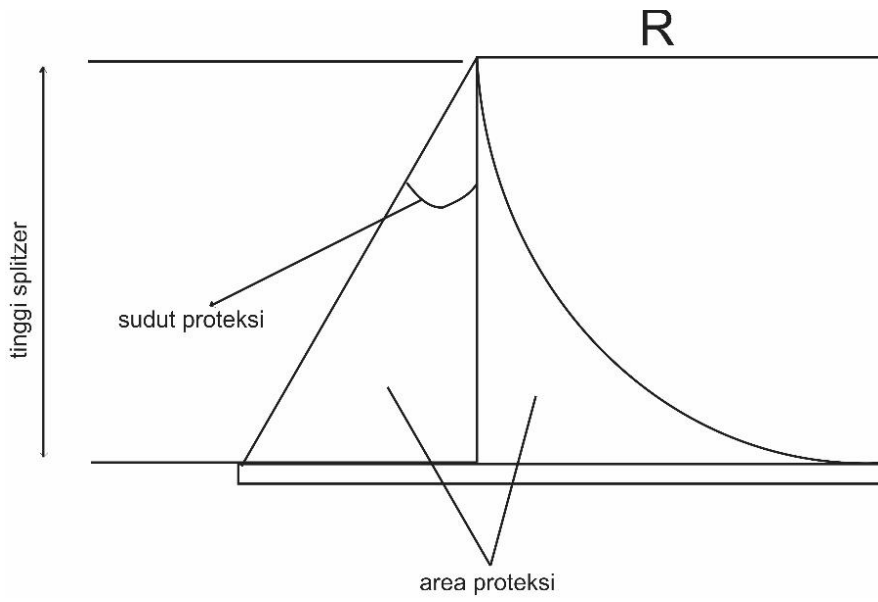
# LAMPIRAN

## 1. Lampiran Gambar

Gambar 1.1 Peta densitas sambaran petir



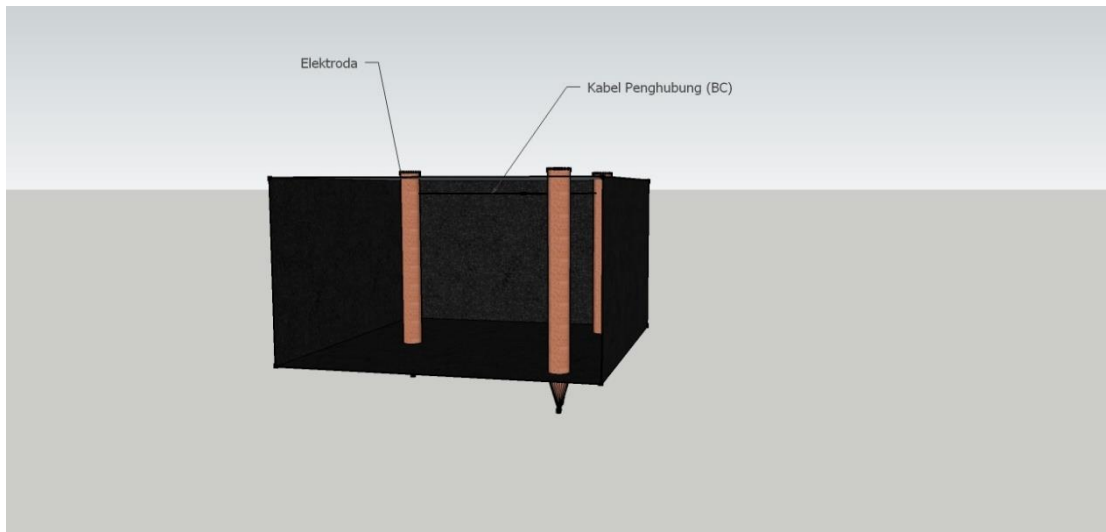
Gambar 1.2. Area proteksi metode bola bergulir



Gambar 1.3. Pengukuran tahanan pentanahan



**Gambar 1. 9 Multiple Rod**



**2. Lampiran Tabel**

**Tabel 2.6**

Ligtning Protection System	Rolling Sphare Radius
I	20
Ligtning Protection System	Rolling Sphare Radius
II	30
III	45
IV	60

**3. Lampiran Perhitungan kebutuhan Proteksi Bangunan**

a. Bangunan Peralatan

- Ruang generator

$$\begin{aligned}A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\&= 5.65 \times 18 + 6 \times 6(5.65 + 18) + 9 \times 3.14 \times 6^2 \\&= 101.7 + 851.4 + 1017.36 \\&= 1970.46 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Dan pengaruh jarak Tower timur bangunan (PSR dan SSR) dihitung berdasarkan persamaan 2.3 adalah :

$$\begin{aligned}X_s &= \frac{d + 3(hs - h)}{2} \\&= \frac{7 + 3(25 - 6)}{2} \\X_s &= 17\end{aligned}$$

$$A_e \text{ pada Generator} = 1970.46 - 17 = 1956.46 \text{ m}^2$$

- Ruang teknisi

$$\begin{aligned}A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\&= 30.35 \times 16 + 6 \times 9(30.35 + 16) + 9 \times 3.14 \times 9^2 \\&= 485.6 + 319.815 + 2289.06 \\&= 3094.475 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Pengaruh jarak tower selatan bangunan (Tower PSR dan SSR)

$$\begin{aligned}X_s &= \frac{d + 3(hs - h)}{2} \\&= \frac{7 + 3(25 - 6)}{2} \\X_s &= 17 = 17 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Pengaruh jarak tower timur bangunan (Tower PSR dan SSR)

$$\begin{aligned}X_s &= \frac{d + 3(hs - h)}{2} \\&= \frac{3 + 3(28 - 9)}{2} \\&= 30 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Pengaruh jarak bangunan ATC

$$\begin{aligned} X_s &= \frac{5+3(15-19)}{2} \\ &= \frac{3+3(4)}{2} \\ &= 7.5 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$X_s \quad \text{total} = 17+30+7.5 = 54.5 \text{ m}^2$$

$$A_e \text{ pada bangunan teknisi} = 3094.475 - 54.5 = 3039.975 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} A_e \text{ total} &= A_e \text{ pada Generator} + A_e \text{ bangunan teknisi} \\ &= 1956.46 + 3039.975 \\ &= 4996.435 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil diatas maka frekuensi rata-rata sambaran petir ke bangunan peralatan / tahun berdasarkan persamaan 2.1 adalah :

$$\begin{aligned} Nd &= Ng \times Ae \times 10^{-6} \\ &= 12 \times 4996.435 \times 10^{-6} \\ &= 0.05995722 \end{aligned}$$

Karena nilai  $N_c = 0.1$  dan  $N_d = 0.06$ ,  $N_d < N_c$  maka bangunan peralatan tidak memerlukan proteksi.

b. Bangunan ATC

$$\begin{aligned} A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 15 \times 15 + 6 \times 15 (15 + 15) + 9 \times 3.14 \times 15^2 \\ &= 225 + 2700 + 6358.5 \\ &= 9283.5 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

pengaruh jarak tower PSR dan SSR

$$\begin{aligned} X_s &= \frac{d + 3(hs - h)}{2} \\ &= \frac{9 + 3(25 - 15)}{2} \\ &= 19.5 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Pengaruh jarak tower MSSR Modes-S

$$X_s = \frac{1 + 3(28 - 15)}{2}$$

$$= 20 \text{ m}^2$$

Pengaruh jarak bangunan teknisi

$$X_s = \frac{5 + 3(9 - 15)}{2}$$

$$= 11.5 \text{ m}^2$$

Pengaruh jarak bangunan trafo

$$X_s = \frac{14 + 3(5 - 15)}{2}$$

$$= 22 \text{ m}^2$$

$$X_s \text{ total} = 19.5 + 20 + 11.5 + 22 = 73 \text{ m}^2$$

$$A_e \text{ pada bangunan ATC} = 9283.5 - 73 = 9210.5 \text{ m}^2$$

Berdasarkan hasil diatas maka frekuensi rata-rata sambaran petir ke bangunan peralatan / tahun berdasarkan persamaan 2.1 adalah :

$$Nd = Ng \times Ae \times 10^{-6}$$

$$= 12 \times 9210.5 \times 10^{-6}$$

$$= 0.110526$$

Karena nilai  $Nd \geq Nc$  maka diperlukan proteksi pada bangunan tersebut dengan efisiensi berdasarkan persamaan 2.4 yaitu :

$$E > 1 - \frac{Nc}{Nd}$$

$$E > 1 - \frac{0.1}{0.110526}$$

$$E > 0.095$$

Maka berdasarkan Tabel 2.1 digunakan proteksi tingkat 4 dengan minimal efisiensi 80 % dan maksimal arus puncak berdasarkan Tabel 2.4 yaitu 100 kA dan minimal arus 16 kA.

c. Tower radar PSR-SSR

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

$$= 5 \times 5 + 6 \times 25(5 + 5) + 9 \times 3.14 \times 25^2$$



$$= 25 + 1500 + 17662.5$$

$$= 19187.5 \text{ m}^2$$

Pengaruh jarak bangunan generator

$$X_s = \frac{d + 3(hs - h)}{2}$$

$$= \frac{7 + 3(6 - 25)}{2}$$

$$= 32 \text{ m}^2$$

pengaruh jarak bangunan teknisi

$$X_s = \frac{5 + 3(9 - 25)}{2}$$

$$= 26.5 \text{ m}^2$$

pengaruh jarak bangunan ATC

$$X_s = \frac{9 + 3(15 - 25)}{2}$$

$$= 19.5 \text{ m}^2$$

pengaruh jarak tower MSSR Mode-S

$$X_s = \frac{14 + 3(28 - 25)}{2}$$

$$= 11.5 \text{ m}^2$$

$$X_s = \frac{14 + 3(28 - 25)}{2}$$

$$= 11.5 \text{ m}^2$$

$$X_s \text{ total} = 32 + 26.5 + 19.5 + 11.5 = 89.5 \text{ m}^2$$

$$A_e \text{ pada bangunan teknisi} = 19187.5 - 89.5$$

$$= 19098 \text{ m}^2$$

Berdasarkan hasil diatas maka frekuensi rata-rata sambaran petir ke bangunan peralatan / tahun berdasarkan persamaan 2.1 adalah :

$$Nd = Ng \times Ae \times 10^{-6}$$

$$= 12 \times 19098 \times 10^{-6}$$

$$= 0.229176$$

Karena nilai  $N_d \geq N_c$  maka diperlukan proteksi pada bangunan tersebut dengan efisiensi berdasarkan persamaan 2.4 yaitu :

$$E > 1 - \frac{N_c}{N_d}$$

$$E > 1 - \frac{0.1}{0.229176}$$

$$E > 0.5636$$

Maka berdasarkan Tabel 2.1 digunakan proteksi tingkat 4 dengan minimal efisiensi 80 %, maksimal arus puncak berdasarkan Tabel 2.4 yaitu 100 kA dan minimal arus 16 kA.

d. Tower radar MSSR MODE-S

$$\begin{aligned} A_e &= ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2 \\ &= 5 \times 5 + 6 \times 28(5 + 5) + 9 \times 3.14 \times 28^2 \\ &= 25 + 1680 + 2215584.84 \\ &= 23860.84 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

pengaruh jarak bangunan teknis

$$\begin{aligned} X_s &= \frac{d + 3(h_s - h)}{2} \\ &= \frac{3 + 3(9 - 28)}{2} \\ &= 33 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Pengaruh jarak bangunan ATC

$$X_s = \frac{1 + 3(15 - 28)}{2} = 8.5 \text{ m}^2$$

$$X_s \text{ total} = 33 + 8.5 = 41.5 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} A_e \text{ pada tower MSSR Mode-S} &= 23860.84 - 41.5 \\ &= 23819.34 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil diatas maka frekuensi rata-rata sambaran petir ke bangunan peralatan / tahun berdasarkan persamaan 2.1 adalah :

$$N_d = N_g \times A_e \times 10^{-6}$$

$$= 12 \times 23819.34 \times 10^{-6}$$

$$= 0.28583208$$

Karena nilai  $N_d \geq N_c$  maka diperlukan proteksi pada bangunan tersebut dengan efisiensi berdasarkan persamaan 2.4 yaitu :

$$E > 1 - \frac{N_c}{N_d}$$

$$E > 1 - \frac{0.1}{0.28583208}$$

$$E > 0.65$$

Maka berdasarkan Tabel 2.1 digunakan proteksi tingkat 4 dengan minimal efisiensi 80 % dan maksimal arus puncak berdasarkan Tabel 2.4 yaitu 100 kA dan minimal arus 16 kA.

#### 4. Lampiran Perhitungan Sistem Terminasi Udara

Arus maksimal atau arus puncak saat radius 60 m

$$R (m) = I^{0.75}$$

$$60 = I^{0.75}$$

$$I = \sqrt[0.75]{60}$$

$$I = 234.89206 \text{ kA}$$

Besar sudut lindung pada radius 60 m

$$a^0 = \sin^{-1} \left( 1 - \frac{31}{60} \right)$$

$$a^0 = 28.9$$

Arus puncak saat radius proteksi menjadi 80 m

$$R (m) = I^{0.75}$$

$$80 = I^{0.75}$$

$$I = \sqrt[0.75]{80}$$

$$I = 344.7095504 \text{ kA}$$

Besarnya sudut lindung pada radius 80 m

$$a^0 = \sin^{-1}\left(1 - \frac{31}{80}\right)$$

$$a^0 = 37.77$$

Arus puncak saat radius proteksi menjadi 120 m

$$R (m) = I^{0.75}$$

$$120 = I^{0.75}$$

$$I = \sqrt[0.75]{120}$$

$$I = 591.891 \text{ kA}$$

Besarnya sudut lindung pada radius 120 m

$$a^0 = \sin^{-1}\left(1 - \frac{31}{120}\right)$$

$$a^0 = 47.873$$

Arus puncak saat radius proteksi menjadi 150 m

$$R (m) = I^{0.75}$$

$$150 = I^{0.75}$$

$$I = \sqrt[0.75]{150}$$

$$I = 796.9939269 \text{ kA}$$

Besarnya sudut lindung pada radius 150 m

$$a^0 = \sin^{-1}\left(1 - \frac{31}{150}\right)$$

$$a^0 = 52.498$$

## 5. Lampiran Perhitungan Kabel Konduktor

Luas penampang kabel konduktor

$$A = I \sqrt{\frac{8.5 \times 10^{-6} S}{\log_{10}\left(\frac{T}{274}+1\right)}}$$

$$A = 796.9939269 \times 10^3 \times \sqrt{\frac{8.5 \times 10^{-6} \times 0.001}{\log_{10}\left(\frac{1000}{274}+1\right)}}$$

$$A = 796993.9269 \times 4.27562915 \times 10^{-5}$$

$$A = 34.0765 \text{ mm}^2$$

$$A = 34.1 \text{ mm}^2$$

## 6. Sistem Terminasi Bumi

Data tahanan jenis tanah pada elektroda tunggal

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

$$43.1 = \frac{\rho}{2 \times 3.14 \times 6} \left( \ln \frac{4 \times 6}{0.015} - 1 \right)$$

$$43.1 = \frac{\rho}{37.68} (7.377758908 - 1)$$

$$\rho = \frac{43.1}{0.169261117}$$

$$\rho = 254.6361541 \text{ } \Omega\text{-m}$$

### a. Perancangan Sistem Grounding Metode Elektroda Tunggal

Nilai tahanan jenis tanah yang dibutuhkan untuk memperoleh tahanan pentanahan 5  $\Omega$  dengan panjang elektroda 10 m.

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

$$5 = \frac{\rho}{2 \times 3.14 \times 10} \left( \ln \frac{4 \times 10}{0.015} - 1 \right)$$

$$5 = \frac{\rho}{62.8} (6.888584532)$$

$$\rho = 45.588265904 \Omega\text{-m}$$

b. Perancangan Sistem Grounding Metode Multiple Rod

- Dengan pengolahan tanah menjadi tanah liat, panjang elektroda 8 m sebanyak 3 buah :

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

$$R_p = \frac{100}{2 \times 3.14 \times 8} \left( \ln \frac{4 \times 8}{0.015} - 1 \right) \times 1.29$$

$$R_p = 6.56 \Omega$$

- Dengan pengolahan tanah menjadi tanah liat, panjang elektroda 10 m sebanyak 3 buah :

$$R_p = \frac{100}{2 \times 3.14 \times 10} \left( \ln \frac{4 \times 10}{0.015} - 1 \right) \times 1.29$$

$$R_p = \frac{1.592356688 \times 6.888584532}{3} \times 1.29$$

$$R_p = 4.7167 \Omega$$