

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dikemukakan di atas, maka disusunlah rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana spesifikasi penyalur petir terpasang pada gedung Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Yogyakarta?
2. Bagaimana pemodelan sistem penyalur petir sehingga dapat dilakukan simulasi ATP/EMTP?
3. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, berapakah besar tegangan yang dialirkan ke pentanahan?
4. Berapakah besar nilai sambaran induksi pada sistem?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang akan dibahas adalah sebagai berikut:

1. Tinjauan spesifikasi sistem penyalur petir yang terpasang (*existing*).
2. Pemodelan dilakukan berdasarkan data spesifikasi terpasang.
3. Tugas akhir ini hanya membahas mengenai pemodelan sistem dan simulasi sambaran petir menggunakan perangkat lunak ATP/EMTP.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah membahas mengenai pemodelan sistem penyalur petir pada perangkat lunak ATP/EMTP lalu dilakukan simulasi pada model yang telah dibuat untuk mengetahui dampak sambaran induksi pada sistem tersebut.

1.5 Manfaat Penulisan

Manfaat dari karya tulis ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui fenomena terjadinya petir, mulai dari awal terbentuknya petir hingga efek dari sambaran petir pada objek yang disambar.
2. Memahami spesifikasi sistem penyalur petir terpasang pada gedung bertingkat.
3. Dapat melakukan pemodelan sistem penyalur petir.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Rujukan penelitian yang pernah dilakukan untuk mendukung penulisan tugas akhir ini antara lain:

1. Pada penelitian yang dilakukan oleh Riduwan Maliki (2009) yang berjudul "Studi Dampak Sambaran Petir Pada Peralatan Tegangan Rendah Rumah Tangga Menggunkakan Perangkat Lunak EMTP" membahas tentang dampak sambaran petir pada saluran tegangan rendah. Pengujian dampak sambaran petir dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ATP/EMTP dan didapat kesimpulan bahwa semakin jauh objek dari aliran arus petir maka tegangan induksi petir akan semakin kecil.
2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Asep Dadan Hermawan (2010) tentang "Optimalisasi Sistem Penangkal Petir Eksternal Menggunakan Jenis *Early Streamer* (Studi Kasus UPT LAAG BPPT). Penelitian tersebut dilakukan untuk mengetahui kinerja dari instalasi penyalur petir terpasang. Selain itu, penelitian tersebut juga membahas mengenai daerah lindungan penyalur petir apakah dapat melindungi wilayah yang diinginkan atau tidak.
3. Pada penelitian yang dilakukan oleh Jefanya Ginting (2012) yang berjudul "Analisa Efek Tegangan Induksi Karena Sambaran Petir pada Area Operasional PT X" membahas mengenai kinerja instalasi penangkal petir,

analisa resiko, serta penghitungan efek sambaran langsung dan sambaran induksi pada menara telekomunikasi.

4. Pada penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Ibrahim, dkk (2015) yang berjudul "Pengaruh Sambaran Petir Terhadap Sistem Proteksi pada Peralatan Telekomunikasi PT Telkom Pekanbaru" membahas mengenai penentuan kapasitas arus arester dengan cara melakukan simulasi pada model rangkaian proteksi petir di menara *Base Transceiver Station* (BTS). Hasilnya adalah didapat kapasitas arus arester yang sesuai dengan kebutuhan berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak EMTP.

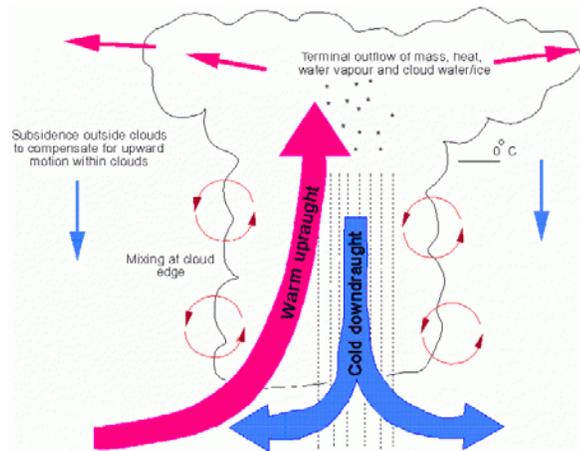
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Petir

Petir merupakan suatu fenomena yang disebabkan oleh proses ionisasi yang memicu terjadinya loncatan muatan listrik dari atmosfer ke bumi atau sebaliknya. Petir bersumber dari awan *cummulonimbus* atau awan guruh yang berbentuk gumpalan dengan ukuran vertikal lebih besar dari ukuran horizontalnya. Ukuran vertikalnya mencapai 14 Km dan ukuran horizontalnya berkisar 1,5 sampai 7,5 Km. Karena ketinggian antara batas atas dan batas bawah ukuran vertikalnya, maka awan ini memiliki perbedaan temperatur yang berselisih jauh. Pada bagian bawah temperatur dapat mencapai 5°C sedangkan pada bagian awan yang tertinggi, temperatur mencapai titik terendah yaitu -60°C. (Ibrahim, dkk: 2015).

Pada bagian tertinggi di awan *cummulonimbus*, suhu yang sangat rendah membuat uap air berubah menjadi kristal es. Karena di dalam awan terdapat angin

yang bergerak ke segala arah, maka kristal-kristal es tersebut saling bertumbukan dan bergesekan sehingga terpisahkan antara muatan positif dengan muatan negatif. Pemisahan muatan inilah yang menjadi sebab utama terjadinya sambaran petir.



Gambar 2. 1 Proses pembentukan awan *cummolonimbus*
(Sumber: <http://assets.kompasiana.com>)

Fenomena petir telah diketahui jauh pada saat masa prasejarah dimana orang-orang pada masa itu mengaitkan fenomena petir dengan aktifitas supranatural. Penelitian mengenai fenomena petir diawali dengan hasil temuan Benjamin Franklin mengenai hubungan antara listrik dan petir. Franklin menemukan adanya kesamaan antara percikan kecil listrik dengan sambaran yang dihasilkan petir. Kedua percikan tersebut menghasilkan cahaya dan suara tertentu dan juga keduanya menjalar melalui jalur zig-zag.

2.2.2 Mekanisme Terjadinya Petir

Unsur utama pembentukan udara di atmosfer bumi antara lain nitrogen (78%), oksigen (20%), gas mulia (1%), karbon dioksida (0,97%), uap air (0,03%) dan gas lainnya. Karena ionisasi udara oleh radiasi energi tinggi dari sinar kosmik

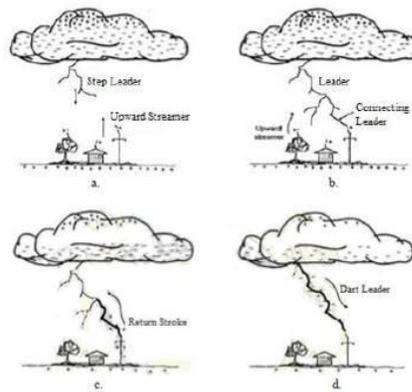
dan gas radioaktif yang dihasilkan bumi, maka setiap sentimeter kubik udara pada permukaan tanah terdapat kurang lebih 10 elektron bebas. Secara umum, udara merupakan insulator yang baik dan dapat mempertahankan sifatnya tersebut sampai pada batas nilai 3×10^6 V/m pada kondisi atmosfer standar ($T = 293$ K dan $P = 1$ atm). Saat medan listrik melampaui batas tersebut, udara berubah sifat menjadi media konduktor sehingga arus listrik dapat mengalir dalam bentuk percikan. (Cooray: 2015)

Pada kondisi awan bermuatan, awan dan bumi bersifat seperti suatu kapasitor. Saat medan listrik yang terjadi melebihi mabang batas insulator udara, maka udara akan berubah sifat menjadi konduktor dan terjadi pelepasan muatan. Terjadinya pelepasan muatan inilah yang disebut sebagai petir.

Petir muncul ketika massa udara hangat yang mengandung kelembaban yang cukup terangkat dan berpindah ke ketinggian tertentu karena massa jenis udara hangat yang lebih kecil daripada udara dingin. Terangkatnya udara hangat diawali ketika permukaan tanah yang mendapatkan panas sehingga meningkatkan suhu udara di permukaan tana dan menyebabkan udara dingin terdorong ke bawah.

Aktivitas tersebut membentuk awan *cummolonimbus* yang kemudian terjadi proses pemisahan muatan elektrostatik dikarenakan gesekan antara tetesan air dan partikel es dalam awan. Partikel dengan muatan positif berkumpul di bagian atas awan dan partikel dengan muatan negatif berkumpul di bagian bawah. Sebagai tambahan, terdapat sedikit muatan positif di bagian bawah awan. Hal ini disebabkan oleh pelepasan korona yang mana berasal dari objek dengan ujung yang tajam pada

permukaan bumi di bawah awan petir dan menyalurkan muatan ke atas melalui media angin.



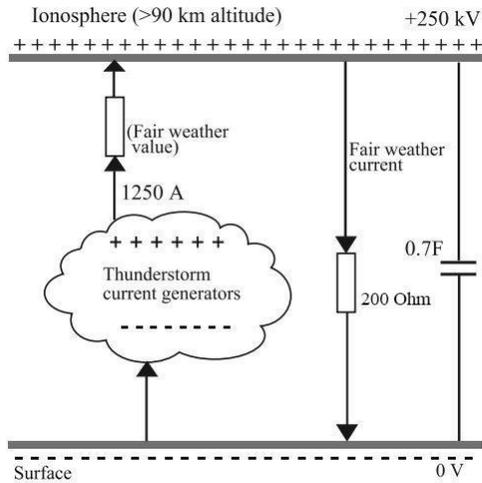
Gambar 2. 2 Proses terjadinya petir
(Sumber: <https://1.bp.blogspot.com/>)

Jika tingkat kepadatan muatan meningkat, yang mana terjadi di dalam awan petir, hal ini akan menghasilkan medan lokal dengan kekuatan setara 100 kV/m. Setelah muatan terkumpul, maka terjadi loncatan muatan yang akan memicu terjadinya pelepasan petir. Kilatan dari awan dari awan ke awan (*cloud-to-cloud*) yang dihasilkan dari aktivitas penetralisasian antara muatan positif dan negatif di pusat awan dan tidak menyambar objek di permukaan bumi secara langsung.

Kilatan yang menyambar bumi dihasilkan dari proses penetralisasian muatan antara awan dan muatan elektrostatis di permukaan bumi. Terdapat dua jenis sambaran petir ke bumi, yaitu *downward flash* dan *upward flas*.

2.2.3 Rangkaian Equivalen Kelistrikan Atmosfer

Pengaruh bagai petir pada skala global dapat ditampilkan oleh rangkaian equivalen yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. 3 Rangkaian equivalen atmosfer
(Sumber: Cooray: 2015)

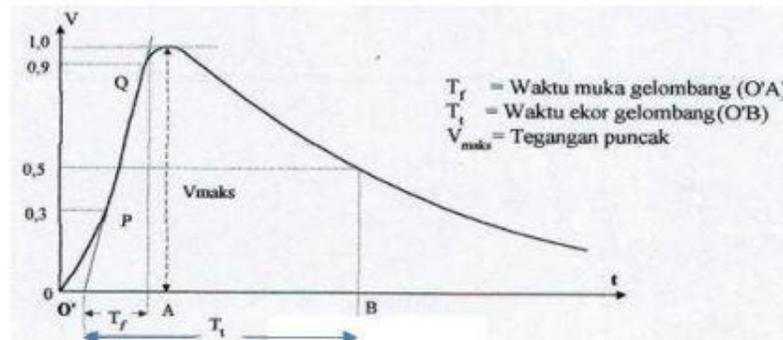
Gambar tersebut menunjukkan awan yang berperan sebagai pembangkit arus pada bagai petir. Badai petir dapat menghasilkan arus berkisar 1.250 A. Tahanan antara *ionosphere* dan tanah diperkirakan 200Ω dan kapasitansi antara *ionosphere* dan tanah adalah 0,7 F. (Cooray: 2015)

2.2.4 Gelombang Arus Petir

Bentuk gelombang yang dihasilkan oleh arus petir menggambarkan besarnya arus, kecuraman (kenaikan arus) dan lamanya kejadian (durasi gelombang) yang dinyatakan dengan waktu ekor. (Ginting: 2012)

Pada praktiknya, bentuk gelombang yang dihasilkan oleh setiap sambaran petir tidak sama satu dengan sambaran lainnya. Bentuk gelombang arus petir dinyatakan dalam dua besaran, yaitu waktu muka (T_f) yang menyatakan lamanya muka gelombang dan kecuraman arus dan waktu ekor (T_t).

Dalam pemodelan waktu arus petir, terdapat dua standar yang umum digunakan, yaitu standar dengan waktu $1,2/50 \mu\text{s}$ (IEC 61000-4-5) dan standar dengan waktu sebesar $8/20 \mu\text{s}$ (IEC 61643-11).

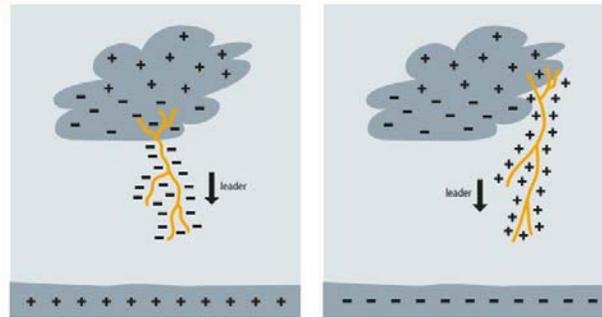


Gambar 2. 4 Bentuk gelombang impuls petir standar
(Sumber: Ginting 2012)

2.2.5 Downward Leader

Dalam kasus sambaran dari awan ke bumi, loncatan muatan pertama (*leader discharges*) yang mengarah ke tanah menjadi pembuka jalur sambaran petir dari awan ke bumi. Sambaran seperti itu biasa muncul di wilayah dengan permukaan datar dan objek dekat bangunan rendah. Sambaran awan ke bumi dapat dikenali dari percabangan sambarannya yang mengarah ke tanah.

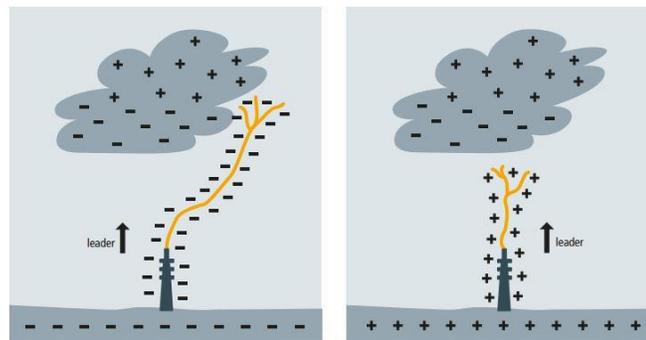
Tipe sambaran petir yang paling umum adalah sambaran *negative downward* dimana loncatan petir diisi oleh muatan negatif awan yang menyambar ke bumi. Ketika pucuk sambaran tertarik mendekati bumi (radius 100 m sampai 10 m), hal ini menyebabkan kekuatan dari medan listrik pada objek di permukaan bumi di area dekat *leader* meningkat. Peningkatan itu sangat besar hingga melampaui kekuatan dielektrik udara. Sehingga menghasilkan lidah-lidah petir yang turun menuju permukaan bumi.



Gambar 2. 5 Downward leader
(Sumber: Dehn, *Lightning Protection Guide*, 2014)

2.2.6 Upward Leader

Kilatan petir dengan muatan positif dapat muncul dari bagian terbawah area pada suatu awan petir. Rasio polaritas tersebut sekitar 90% petir negatif dan 10% petir positif. Rasio tersebut bergantung dari lokasi geografis suatu daerah.



Gambar 2. 6 Upward leader
(Sumber: Dehn, *Lightning Protection Guide*, 2014)

Pada objek dengan ketinggian yang terekspos seperti menara telekomunikasi, turbin angin, gedung bertingkat atau puncak gunung, sambaran *upward* dapat terjadi. Hal ini dapat dikenali dengan cabang dari lidah petir yang mengarah ke atas.

Dalam kasus sambaran *upward*, kekuatan medan listrik dibutuhkan untuk memicu *leader* yang tidak dihasilkan oleh awan, melainkan oleh distorsi medan listrik pada objek terekspos. Dari objek tersebut, *leader* dan kanal muatannya menyebar ke arah awan bermuatan.

2.2.7 Efek Sambaran Petir

Bagian yang menimbulkan kerusakan dari sambaran petir adalah sambaran balik (*return stroke*). Pada bagian ini, besar arus yang mengalir berkisar antara 2.000 A sampai 200 kA.

Secara umum efek sambaran petir dibagi menjadi dua, yaitu efek sambaran langsung dan sambaran tidak langsung.

1. Efek sambaran langsung

Pada sambaran langsung, petir akan menghasilkan efek termal pada objek yang tersambar seperti pelelehan atau kebakaran yang disebabkan oleh busur listrik

2. Efek sambaran tidak langsung

Pada sambaran tidak langsung, efek yang dihasilkan adalah tegangan sentuh dan tegangan langkah. Selain itu, efek sambaran tidak langsung juga dapat merusak peralatan listrik yang disebut sambaran induksi yang dihasilkan oleh perambatan arus petir.

2.2.8 Efek Sambaran Petir Terhadap Saluran Tegangan Rendah

Sambaran petir pada lauran tegangan rendah terjadi karena petir yang disalurkan melalui penghantar baik itu pada sistem penyalur petir atau jaringan

listrik menghasilkan transient arus dan tegangan. Hal tersebut dapat merusak peralatan tegangan rendah ketika transien arus dan tegangan mengalir kedalam sistem.

Selain melalui saluran tegangan rendah, efek sambaran petir juga dapat mengalir melalui sistem pentanahan. Hal ini terjadi ketika sambaran petir yang menginduksi peralatan elektronik melalui peningkatan tegangan tanah (*ground potential rise*) sehingga terjadi kenaikan tegangan pentanahan.

2.2.9 Sistem Proteksi Petir

Peralatan penyalur petir pertama kali dikembangkan oleh Benjamin Franklin yang bertujuan sebagai peilindung bangunan dari sambaran petir. Prinsip kerja penyalur petir adalah dengan menyediakan jalur dengan resistansi serendah mungkin sehingga arus petir dapat disalurkan ke bumi tanpa merusak bangunan atau peralatan disekitarnya.

Berdasarkan letak instalasinya, sistem proteksi petir dibagi menjadi dua, yaitu sistem proteksi petir eksternal dan sistem proteksi petir internal.

2.2.10 Sistem Proteksi Petir Eksternal

Sistem proteksi eksternal merupakan sebuah sistem proteksi petir yang dipasang di luar bangunan. Secara umum, proteksi petir eksternal terdiri dari terminasi udara, *downconductor* dan sistem pentanahan.

1. Sistem Terminasi Udara

Sistem terminasi udara merupakan sistem proteksi petir eksternal yang pertama kali kontak dengan petir. Sistem ini berupa batang tegak yang disebut finial

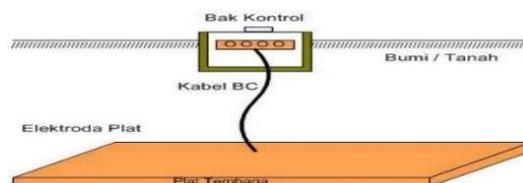
atau *splitzer*. Sistem terminasi udara dapat terdiri dari kombinasi batang vertikal. Batang terminasi udara tunggal terhubung bersama-sama pada bagian paling tinggi suatu bangunan untuk memperluas area proteksi. (Sinaga, dkk: 2015)

2. Konduktor Penyalur (*Downconductor*)

Konduktor penyalur adalah bagian kedua dari sistem proteksi eksternal. Ketika petir menyambar terminasi udara, konduktor penyalur akan menyediakan jalur dengan nilai resistansi yang rendah sehingga petir dapat mengalir menuju bumi tanpa merusak area yang dilaluinya. (Sinaga, dkk: 2015)

3. Sistem Pentanahan (*Grounding*)

Sistem pentanahan merupakan bagian yang vital bagi sistem proteksi petir eksternal. Tujuan dari sistem pentanahan adalah untuk membuang arus petir ke tanah tanpa membahayakan orang atau perangkat lainnya di dalam struktu yang harus dilindungi. Sistem pentanahan dilakukan dengan menanam satu atau lebih elektroda ke dalam tanah dengan cara tertentu untuk mendapatkan nilai tahanan pentanahan yang diinginkan. Besarnya nilai tahanan pentanahan tergantung dari jenis tanah dan kedalaman elektroda pentanahan yang ditanam.



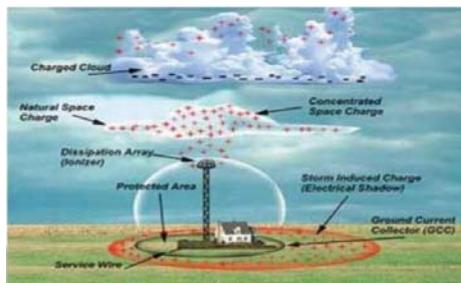
Gambar 2. 7 Elektroda pentanahan
(Sumber: Suprijono, 2014)

2.2.11 Sistem Proteksi Petir Internal

Sistem proteksi internal merupakan sistem perlindungan terhadap perangkat elektronika di dalam suatu bangunan/gedung terhadap sambaran petir tak langsung yang dihasilkan oleh induksi elektromagnetik petir. Meskipun suatu bangunan telah dilindungi oleh sistem proteksi petir eksternal, tetapi efek dari sambaran induksi masih dapat merusak peralatan elektronik yang disebabkan oleh masuknya surja impuls petir melalui kabel listrik dan kabel telekomunikasi atau mengalirnya arus impuls petir ketika terjadi sambaran petir.

2.2.14 Terminasi Udara Jenis *Early Streamer Emission*

Prinsip kerja terminasi udara jenis *early streamer emission* adalah dengan menghasilkan *upward leader* buatan yang berasal dari ion-ion yang dihasilkan pada ujung terminasi udara tersebut. Dengan dibangkitkannya *upward leader* buatan, maka arah sambaran petir dapat lebih terprediksi dan meminimalisir terjadinya sambaran pada daerah yang minim perlindungan.



Gambar 2. 8 Prinsip kerja early streamer emission
(Sumber: flashvectron.com)

Kelebihan dari terminasi udara jenis ini adalah area proteksi yang lebih luas dibandingkan dengan jenis terminasi udara konvensional. Karena area proteksi

yang luas, maka dapat meminimalisir jumlah terminasi udara sehingga dapat menekan biaya instalasi.

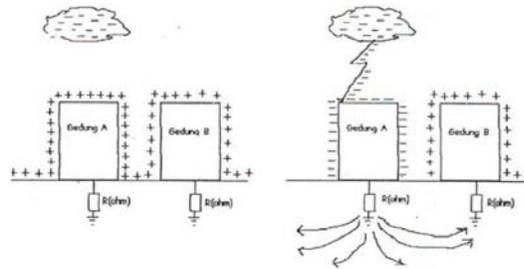
2.2.15 Kerusakan Akibat Sambaran Tidak Langsung

Kerusakan jenis ini terjadi karena petir menyambar suatu titik lokasi misalnya pada suatu menara telekomunikasi, kemudian terjadi hantaran secara induksi melalui kabel yang berbahan metal yang bersifat konduktif sampai jarak tertentu yang tanpa disadar telah merusak peralatan elektronik yang jaraknya jauh dari lokasi semula. (Ibrahim, dkk: 2015)

Sambaran tidak langsung ini menimbulkan efek yang cukup merusak karena gelombang surja petir yang terjadi dapat menginduksi atau merambat ke dalam sistem bertegangan rendah akibat adanya perangkai (*coupling*) yang dapat dibedakan menjadi *coupling resistive*, *coupling inductive*, dan *coupling capacitive*. (Ibrahim, dkk: 2015)

1. Coupling Resistive

Merupakan kopling yang terjadi akibat adanya perbedaan tegangan antara dua bangunan pada saat petir menyambar. Perbedaan tegangan terjadi karena tahanan pembumian pada bangunan tidak saling terhubung. Akibatnya akan berpengaruh pada sistem pentanahan bangunan dimana pada sistem pentanahan yang berbeda akan memiliki nilai potensial yang berbeda pula sehingga akan dimungkinkan mengalirnya tegangan balik melalui sistem tenaga listrik yang ada pada bangunan tersebut yang tentu saja menimbulkan kerusakan sepanjang jalur yang dilaluinya. (Ibrahim, dkk: 2015)

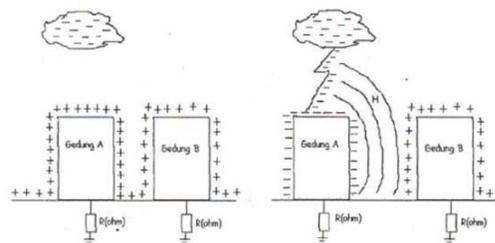


Gambar 2. 9 Mekanisme *coupling resistive*
(Sumber: Ibrahim, dkk: 2015)

Pada gambar di atas dapat dilihat bahwa saat gedung A dialiri arus petir, maka akan terdapat tegangan pada pembumian gedung B akibat tahanan pembumian yang dimiliki gedung tersebut sehingga arus dapat mengalir pada gedung B. (Ibrahim, dkk: 2015)

2. *Coupling Inductive*

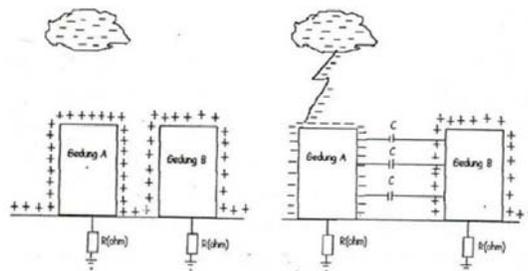
Merupakan kopling yang terjadi akibat mengalirnya arus petir melalui suatu objek (bangunan A) sehingga timbul medan magnet akibat arus petir tadi karena adanya induktansi pada penghantar dari gedung A (Gambar 2. 9). Akibatnya gedung B akan merasakan induksi magnetik dimana konduktor yang terdapat pada gedung B yang berdekatan dengan gedung A akan bertegangan. (Ibrahim, dkk: 2015)



Gambar 2. 10 Mekanisme *coupling inductive*
(Sumber: Ibrahim, dkk: 2015)

3. *Coupling Capacitive*

Akibat konsentrasi muatan pada awan petir, maka permukaan bumi akan terinduksi (Gambar 2. 10). Setelah arus petir menyambar gedung A, maka muatan-muatan negatif akan terdistribusi pada gedung tersebut. Akibatnya terdapat beda potensial antarkonduktor pada gedung A dan gedung B, sehingga udara diantara konduktor-konduktor tersebut akan membentuk susunan kapasitor. (Ibrahim, dkk: 2015)

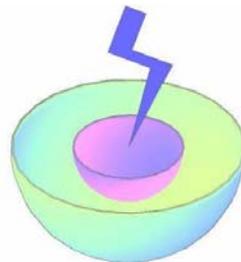


Gambar 2. 11 Mekanisme coupling capacitive
(Sumber: Ibrahim, dkk: 2015)

2.2.16 Perhitungan Kenaikan Tegangan Tanah (*Ground Potential Rise-GPR*)

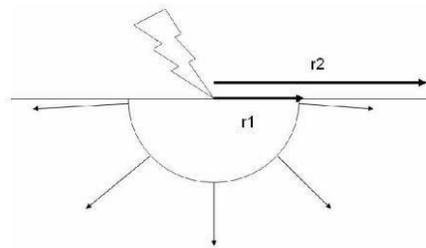
Akibat Sambaran Petir

Pada *Ground Potential Rise* (kenaikan tegangan tanah) arus petir yang menyambar suatu objek terdistribusi secara radial di dalam tanah. (Maliki, 2010)



Gambar 2. 12 Distribusi tegangan petir pada elektroda di dalam tanah
(Sumber: Maliki, 2010)

Ilustrasi di atas merupakan gambaran distribusi tegangan petir di dalam tanah. Distribusi tegangan petir tampak seperti luasan setengah bola. Pada lapisan yang berwarna ungu memiliki besar tegangan puncak yang berbeda dengan lapisan yang berwarna hijau. Sehingga akan ada faktor jarak dari sambaran atau elektroda yang terkena sambaran petir terhadap besar tegangan puncak pada lapisan permukaan setengah bola tersebut. (Maliki: 2010)



Gambar 2. 13 Distribusi tegangan petir elektroda rod di dalam tanah
(Sumber: Maliki, 2010)

Bila arus I (arus petir) masuk ke tanah lewat suatu elektroda dan mengenai elektroda yang lain yang cukup jauh. Arus yang masuk ke tanah mengalir secara radial dari elektroda. Pada gambar di atas dimisalkan arah arus dalam tanah dari elektroda dengan jari-jari r_1 yang tersambar petir ke elektroda yang tidak tersambar petir sejauh r_2 , sehingga luasannya adalah setengah bola ($A = 2\pi r^2$), maka besarnya resistansi pada jarak r_2 adalah, sebagai berikut.

$$R_h = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

R_h = resistansi antara 2 elektroda dengan jarak r_2 (Ω)

ρ = tahanan jenis tanah (Ωm)

r_1 = jari-jari elektroda (m)

r_2 = jarak elektroda (m)

2.2.17 Perhitungan Tegangan Induksi Akibat Sambaran Petir

Tegangan induksi yang terjadi merupakan tegangan akibat adanya fenomena kopling induktif. Diasumsikan bahwa objek sambaran petir adalah bidang yang berada pada sumbu y yang tegak lurus terhadap sumbu x yang berupa penghantar. Tegangan induksi yang terjadi adalah akibat medan magnetik dan medan listrik akibat arus petir yang mengalir pada penghantar tersebut. (Maliki: 2010)

Pada suatu kabel penghantar yang dialiri arus petir, daerah pada sekeliling kabel penghantar akan mengalami induksi elektromagnetik yang menginduksi peralatan listrik bertegangan rendah. Induksi ini dapat merusak komponen peralatan listrik. Tegangan tinggi yang diinduksikan juga dapat merusak sistem isolasi dari peralatan yang tersambar. (Maliki: 2010)

Besarnya nilai induksi elektromagnetik pada suatu kabel penghantar terhadap peralatan listrik dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$M = 0,2 \times b \times \ln \frac{c}{a} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:

M = induksi elektromagnetik (H)

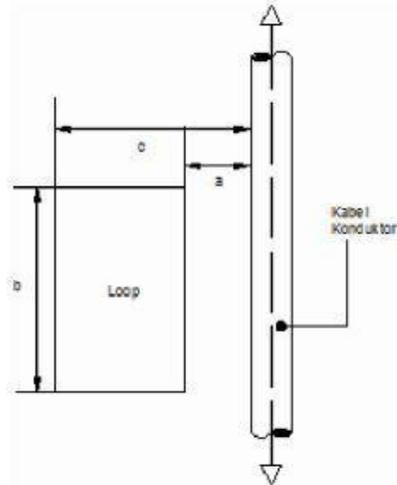
a = jarak antar kabel konduktor dengan loop dalam (m)

b = besar loop (m)

c = jarak antar kabel konduktor dengan loop luar (m)

Nilai tegangan induksi yang terjadi akibat dari kopling induktif yaitu

$$U_{maks} = M \left(\frac{di}{dt} \right)_{maks} \dots \dots \dots (2.3)$$



Gambar 2. 14 Loop berada di samping kabel konduktor
(Sumber: Maliki, 2010)