

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Fungsi utama suatu saluran transmisi adalah untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Untuk mengurangi rugi-rugi daya di sepanjang saluran transmisi, maka dipakailah tegangan tinggi. Pemakaian tegangan tinggi ini selain mengurangi rugi-rugi daya, juga menghasilkan medan listrik yang tinggi di sekitar kawat penghantar.

Medan listrik yang tinggi di sekitar kawat penghantar menimbulkan dampak merugikan bagi penduduk yang bertempat tinggal di dekat saluran transmisi. Misalnya: terinduksinya tegangan pada permukaan benda-benda logam, gangguan penerimaan siaran televisi maupun radio, maupun dampak pada kesehatan.

Seiring dengan semakin meningkatnya permintaan akan pasokan daya listrik, maka pihak PLN mulai membangun beberapa pusat pembangkit untuk melayani permintaan tersebut. Selain membangun pusat-pusat pembangkit baru, PLN juga akan membangun saluran transmisi untuk menyalurkan daya listrik ke pusat beban. Pembangunan ini seringkali menimbulkan konflik antara pihak pemerintah, dalam hal ini PLN, dengan masyarakat yang tinggal di dekat saluran transmisi terkait dampak merugikan yang ditimbulkannya. Oleh sebab itu, diperlukan pihak ketiga, yaitu Perguruan Tinggi, untuk melakukan suatu perhitungan kuat medan listrik di bawah saluran transmisi.

1.2. Perumusan Masalah

Dari uraian di atas tersebut, maka perumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Menghitung besarnya Kuat Medan Listrik dibawah saluran transmisi 150 KV Sibolga-Tarutung

1.3. Manfaat Penulisan Tugas Akhir

Adapun manfaat penulisan tugas akhir ini adalah :

Mengetahui kuat medan listrik di bawah saluran transmisi, maka dapat dimanfaatkan sebagai dasar pertanggungjawaban bila kelak timbul protes dari penduduk yang bertempat tinggal di dekat saluran transmisi terkait dampak merugikan dari medan listrik.

1.4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang menguraikan hal-hal dalam Tugas Akhir ini yaitu hanya membahas bagaimana menentukan kuat medan listrik dibawah saluran transmisi 150 KV Sibolga-Tarutung.

1.5. Metodologi Penulisan

Didalam memenuhi dan melengkapi data data yang diperlukan untuk memperkuat penulisan skripsi ini, penulis melakukan berbagai macam metode antar lain :

A. Studi Literatur

Beberapa studi keputusan dengan mempelajari buku-buku (teks book) yang terkait, baik yang bersumber dari media cetak, elektronik maupun internet.

B. Diskusi Interaktif

Melakukan diskusi dalam bentuk tanya jawab dengan pihak PT.PLN (Persero) Sibolga terkait hal-hal yang berkaitan dengan kuat medan listrik dibawah saluran transmisi 150 KV Sibolga-Tarutung.

C. Pengamatan lapangan langsung ke saluran transmisi Gardu Induk Sibolga-Tarutung

1.6.Sistematika Penulisan

Penulisan Tugas Akhir ini disajikan dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini merupakan pendahuluan yang berisikan tentang latar belakang masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, metode penulisan, dan sistematika penulisan.

BAB II KONSTRUKSI SALURAN TRANSMISI

Bagian ini berisikan tentang landasan teori yang mendukung dalam pembahasan bab selanjutnya.

BAB III MEDAN LISTRIK DI BAWAH SALURAN TRANSMISI

Bagian ini menjelaskan tentang kuat medan pada saluran transmisi serta rumus-rumus yang mendukung pada bab selanjutnya.

BAB IV STUDI ANALISA PERHITUNGAN KUAT MEDAN LISTRIK DIBAWAH SALURAN TRANSMISI 150 KV SIBOLGA - TARUTUNG

Bagian ini memaparkan tentang perhitungan kuat medan listrik pada transmisi 150 KV Sibolga-Tarutung. Pada bagian ini, perhitungan manual hanya dilakukan untuk satu titik contoh, sedangkan untuk sejumlah titik di sekitar penghantar transmisi, dilakukan dengan program.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bagian ini berisikan beberapa kesimpulan dan saran dari penulisan Tugas Akhir ini.

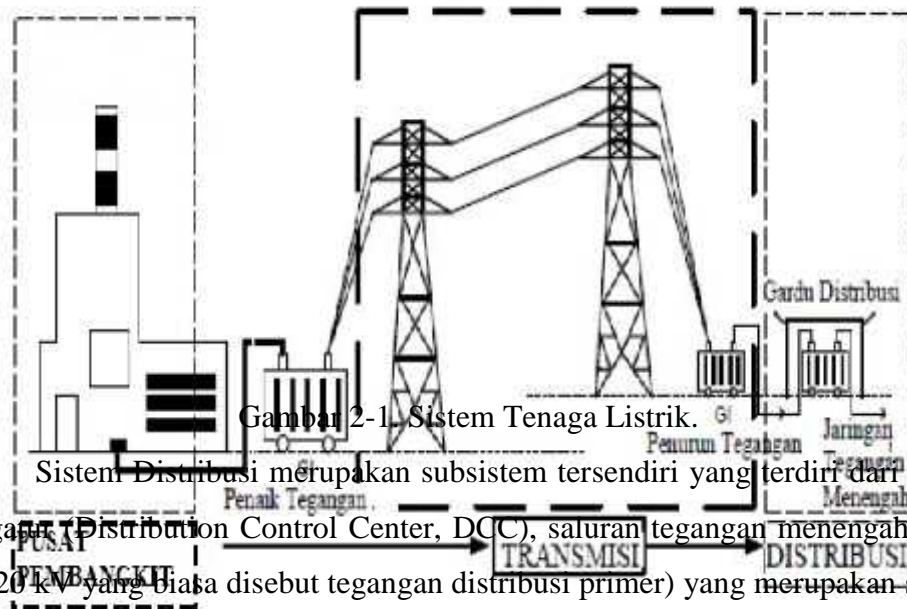
BAB II

KONSTRUKSI SALURAN TRANSMISI

2.1. Umum

Pusat Pembangkit Listrik (Power Plant) yaitu tempat energi listrik pertama kali dibangkitkan, dimana terdapat turbin sebagai penggerak mula (Prime Mover) dan generator yang membangkitkan listrik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-1. Biasanya di pusat pembangkit listrik juga terdapat gardu induk. Peralatan utama pada gardu induk antara lain : transformer, yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator (11,5kV) menjadi tegangan transmisi/tegangan tinggi (150kV) dan juga peralatan pengamanan dan pengatur.

Jenis pusat pembangkit yang umum antara lain : PLTA (Pusat Pembangkit Tenaga Air), PLTU (Pusat Pembangkit Tenaga Uap), PLTG (Pusat Pembangkit Tenaga Gas), PLTD (Pusat Pembangkit Tenaga Diesel), PLTN (Pusat Pembangkit Tenaga Nuklir). Proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik (Power Plant) hingga saluran distribusi listrik (Substation Distribution) sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik.



Gambar 2-1. Sistem Tenaga Listrik.

Sistem Distribusi merupakan subsistem tersendiri yang terdiri dari : Pusat Pengaturan (Distribution Control Center, DCC), saluran tegangan menengah (6 kV dan 20 kV yang biasa disebut tegangan distribusi primer) yang merupakan saluran udara atau kabel tanah, gardu distribusi tegangan menengah yang terdiri dari panel-panel pengatur tegangan menengah dan trafo sampai dengan panel-panel distribusi tegangan rendah (380V, 220V) yang menghasilkan tegangan kerja/tegangan jala-jala untuk industri dan konsumen.

2.2.Saluran Transmisi

Saluran transmisi merupakan media yang digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik dari pusat pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi hingga pusat beban (konsumen). Tenaga listrik ditransmisikan oleh suatu bahan konduktor yang disebut dengan saluran transmisi listrik. Penyaluran tenaga listrik pada transmisi menggunakan arus bolak-balik (AC) ataupun juga dengan arus searah (DC). Penggunaan arus bolak-balik yaitu dengan sistem tiga-fasa. Saluran transmisi dengan menggunakan sistem arus bolak-balik tiga-fasa merupakan sistem yang banyak digunakan, mengingat kelebihanannya sebagai berikut :

- A. Mudah pembangkitannya.
- B. Mudah merubah tegangannya.
- C. Dapat menghasilkan medan magnet putar.
- D. Dengan sistem tiga fasa, daya yang disalurkan lebih besar dan nilai sesaatnya konstan.

2.3. Kategori Saluran Transmisi

2.3.1. Saluran Udara

Saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada isolator antara menara atau tiang transmisi disebut saluran udara (Overhead Lines), seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-2. Adapun kelebihan dan kekurangan dari saluran udara antara lain :

Kelebihan :

- a. Mudah dalam perbaikan.
- b. Mudah dalam perawatan.
- c. Mudah mengetahui letak gangguan.
- d. Lebih murah (ekonomis).

Kekurangan :

- a. Karena berada diruang yang terbuka, maka cuaca sangat berpengaruh terhadap keandalannya. Dengan kata lain mudah terjadi gangguan dari luar seperti gangguan hubung singkat, gangguan tegangan bila tersambar petir dan lain sebagainya.
- b. Dari segi estetika/keindahan, saluran udara merusak pandangan sehingga bukan pilihan yang ideal untuk didalam kota.



Gambar 2-2. Saluran udara (Overhead Lines).

2.3.2. Saluran Kabel Bawah Tanah

Saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang ditanam didalam tanah (Underground Cable), seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-3. Kategori saluran kabel bawah tanah ini favorit untuk pemasangan didalam kota, karena berada didalam tanah maka tidak mengganggu keindahan dan juga tidak mudah terjadi gangguan akibat cuaca namun tetap memiliki kekurangan, antara lain : mahal dalam instalasi dan investasi serta sulitnya menentukan titik gangguan dan perbaikannya.



Gambar 2-3. Saluran Kabel Bawah Tanah (Underground Cable).

2.4. Klasifikasi Saluran Transmisi Berdasarkan Tegangan

Adapun besaran tegangan saluran transmisi adalah Tegangan Ultra Tinggi (UHV), Tegangan Ekstra Tinggi (EHV), Tegangan Tinggi (HV), Tegangan Menengah (MHV) dan Tegangan Rendah (LV). Standard tegangan tinggi di Indonesia adalah 30 kV, 70 kV dan 150 kV.

Ditinjau dari klasifikasi tegangannya, transmisi listrik dibagi menjadi :

A. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 275 kV – 500 kV

Adapun tujuannya agar drop tegangan dari penampang kawat dapat direduksi secara maksimal, sehingga diperoleh operasional yang efektif dan efisien. Akan tetapi terdapat permasalahan mendasar dalam pembangunan SUTET ialah konstruksi menara atau tower listrik yang besar dan tinggi, memerlukan tanah yang luas, memerlukan isolator yang banyak, sehingga memerlukan biaya besar. Masalah lain yang timbul dalam pembangunan SUTET adalah masalah sosial, yang akhirnya berdampak pada masalah pembiayaan.

B. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 75 kV – 150 kV

Adapun jarak terjauh yang paling efektif dari saluran transmisi (SUTT) ialah 100 km. Jika lebih dari 100 km maka tegangan jatuh (drop voltage) terlalu besar, sehingga tegangan di ujung transmisi menjadi rendah.

2.5. Komponen-Komponen Utama Saluran Transmisi

2.5.1. Menara Transmisi

Pada suatu sistem tenaga listrik, energi listrik yang dibangkitkan dari pusat pembangkit listrik ditransmisikan ke pusat-pusat pengatur beban melalui suatu saluran transmisi. Saluran transmisi dapat berupa saluran udara dan saluran bawah tanah namun pada umumnya berupa saluran udara. Energi listrik yang disalurkan lewat saluran transmisi udara pada umumnya menggunakan kawat telanjang sehingga mengandalkan udara sebagai media isolasi antara kawat penghantar tersebut dengan benda sekelilingnya dan untuk menyanggah/merentang kawat penghantar dengan ketinggian dan jarak yang aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya, kawat-kawat penghantar tersebut dipasang pada suatu konstruksi bangunan yang kokoh, yang biasa disebut menara/tower. Antara menara/tower listrik dan kawat penghantar disekat oleh isolator.

Konstruksi tower besi baja merupakan jenis konstruksi saluran transmisi tegangan tinggi (SUTT) ataupun saluran transmisi tegangan ekstra tinggi (SUTET) yang paling banyak digunakan di jaringan PLN karena mudah dirakit terutama untuk pemasangan di daerah pegunungan dan jauh dari jalan raya, harganya relatif lebih murah dibandingkan dengan penggunaan saluran bawah tanah serta pemeliharaannya yang mudah. Namun perlu pengawasan yang intensif karena besi-besinya rawan terhadap pencurian.

Suatu menara/tower listrik harus kuat terhadap beban yang bekerja padanya, antara lain :

- A. Gaya berat tower dan kawat penghantar (gaya tekan).
- B. Gaya tarik akibat rentangan kawat.
- C. Gaya angin akibat terpaan angin pada kawat maupun badan tower.

Adapun dalam Tabel

2-1

diberikan ketentuan jarak antar tiang atau menara transmisi pada SUTT dan SUTET.

Tabel 2-1. Ketentuan Jarak Antar Tiang atau Menara Pada SUTT dan SUTET.

| Saluran Udara | Jarak Antar Tiang atau Menara |
|---------------|-------------------------------|
| | |

| | (m) |
|------------------------------|-------|
| SUTT 66 kV Tiang Baja | 160 |
| SUTT 66 kV Tiang Beton | 60 |
| SUTT 66 kV Menara | 300 |
| SUTT 150 kV Tiang Baja | 200 |
| SUTT 150 kV Tiang Beton | 80 |
| SUTT 150 kV Menara | 350 |
| SUTET 275 kV Sirkuit Ganda | 400 |
| SUTET 500 kV Sirkuit Tunggal | 450 |
| SUTET 500 kV Sirkuit Ganda | 450 |

2.5.1.1. Jenis – Jenis Menara Transmisi

Menurut bentuk konstruksinya (ditunjukkan pada gambar 2-4), jenis-jenis menara/tower listrik dibagi atas 4 macam :



B. Tubular steel pole.



C. Concrete pole.



D. Wooden pole.

Gambar 2-4. Jenis-Jenis Menara Transmisi.

Menurut fungsinya, menara/tower listrik dibagi atas 7 macam yaitu :

1. Dead end tower, yaitu tiang akhir yang berlokasi di dekat gardu induk. Tower ini hampir sepenuhnya menanggung gaya tarik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-5.



Gambar 2-5. Dead End Tower.

2. Section tower, yaitu tiang penyekat antara sejumlah tower penyangga dengan sejumlah tower penyangga lainnya karena alasan kemudahan saat pembangunan (penarikan kawat), umumnya mempunyai sudut belokan yang kecil, seperti ditunjukkan pada gambar 2-6.



3. Suspension tower, yaitu tiang yang sepenuhnya menanggung beban kawat di belokan, seperti ditunjukkan pada gambar 2-7.

sepenuhnya
di belokan,

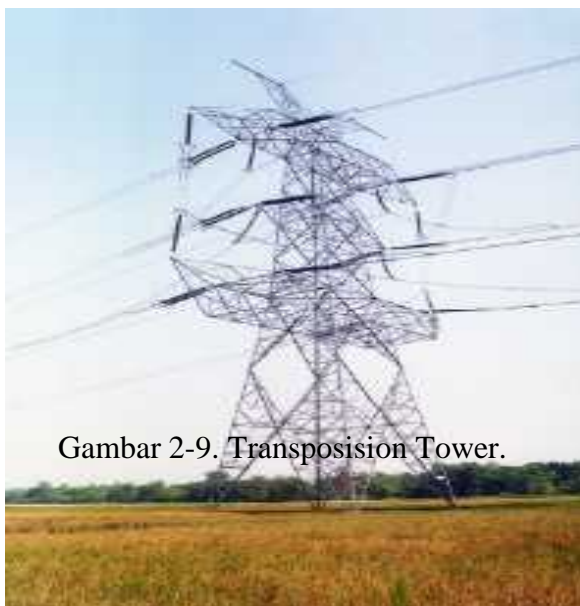


Gambar 2-7. Suspension Tower.

4. Tension tower, yaitu tower penegang. Tower ini menanggung gaya tarik yang lebih besar daripada gaya berat, umumnya mempunyai sudut belokan, seperti ditunjukkan pada gambar 2-8.



5. Transposisi tower, yaitu tower sebagai tempat melakukan pemertukaran fase transmisi, seperti ditunjukkan pada gambar 2-9.



Gambar 2-9. Transposisi Tower.

6. Gantry tower, yaitu tower berbentuk portal yang digunakan pada persilangan antara dua saluran transmisi. Tiang ini dibangun di bawah saluran transmisi existing, seperti ditunjukkan pada gambar 2-10.



Gambar 2-10. Gantry Tower.

7. Combined tower, yaitu tower yang digunakan oleh dua buah saluran transmisi yang berbeda tegangan operasinya, seperti ditunjukkan pada gambar 2-11.



Gambar 2-11. Combined Tower.

2.5.1.2. Konfigurasi Kawat Fasa Menara Transmisi

Menurut konfigurasi, kawat fasa menara/tower terdiri dari 4 jenis, yaitu :

1. Jenis delta, digunakan pada konfigurasi horizontal/mendatar.
2. Jenis piramida, digunakan pada konfigurasi vertikal/tegak.
3. Jenis zig-zag, yaitu kawat fasa tidak berada pada satu sisi lengan.

Dilihat dari tipe menara/tower listrik (seperti ditunjukkan pada tabel 2-1) dapat dibagi atas beberapa tipe :

Tabel 2-2. Tipe Menara Transmisi 150 kV

| TIPE TOWER | FUNGSI | SUDUT |
|------------|-----------------|---------------------------|
| Aa | Suspension | $0^{\circ} - 3^{\circ}$ |
| Bb | Tension/Section | $3^{\circ} - 20^{\circ}$ |
| Cc | Tension | $20^{\circ} - 60^{\circ}$ |
| Dd | Tension | $60^{\circ} - 90^{\circ}$ |
| Ee | Tension | $>90^{\circ}$ |
| Ff | Tension | $>90^{\circ}$ |
| Gg | Transposisi | |

2.5.1.3. Komponen-Komponen Menara Transmisi

Secara umum komponen-komponen menara/tower listrik terdiri atas :

1. Pondasi, yaitu suatu konstruksi beton bertulang untuk mengikat kaki tower (stub) dengan bumi.
2. Stub, yaitu bagian paling bawah dari kaki tower, dipasang bersamaan dengan pemasangan pondasi dan diikat menyatu dengan pondasi.
3. Leg, yaitu kaki tower yang terhubung antara stub dengan body tower. Pada tanah yang tidak rata perlu dilakukan penambahan atau pengurangan tinggi leg sedangkan body harus tetap sama tinggi permukaannya.
4. Common body, badan tower bagian bawah yang terhubung antara leg dengan badan tower bagian atas (super structure). Kebutuhan tinggi tower dapat dilakukan dengan pengaturan tinggi common body dengan cara penambahan atau pengurangan.
5. Super structure, badan tower bagian atas yang terhubung dengan common body dan cross arm kawat fasa maupun kawat petir. Pada tower jenis delta tidak dikenal istilah super structure namun digantikan dengan "K" frame dan brigde.
6. Cross arm, bagian tower yang berfungsi untuk tempat menggantungkan atau mengaitkan isolator kawat fasa serta clamp kawat petir. Pada

umumnya cross arm berbentuk segitiga kecuali tower jenis tension yang mempunyai sudut belokan besar berbentuk segi empat.

7. “K” frame bagian tower yang terhubung antara common body dengan brigde maupun cross arm. “K” frame terdiri atas sisi kiri dan kanan yang simetri. “K” frame tidak dikenal di tower jenis piramida.
8. Brigde, yaitu penghubung antara cross arm kiri dan cross arm tengah. Pada tengah-tengah brigde terdapat kawat penghantar fasa tengah. Brigde tidak dikenal di tower jenis piramida.
9. Rambu tanda bahaya, berfungsi untuk member peringatan bahwa instalasi SUTT/SUTET mempunyai resiko bahaya. Rambu ini bergambar petir dan tulisan “AWAS BERBAHAYA TEGANGAN TINGGI”. Rambu ini dipasang di kaki tower lebih kurang 5 meter diatas tanah sebanyak dua buah, dipasang disisi yang menghadap tower nomor kecil dan sisi yang menghadap nomor besar.
10. Rambu identifikasi tower dan penghantar berfungsi untuk memberitahukan identitas tower seperti : nomor tower, urutan fasa, penhantar/jalur dan nilai tahanan pentanahan kaki tower.
11. Anti Climbing Device (ACD), berfungsi untuk menghalangi orang yang tidak berkepentingan untuk naik ke tower. ACD dibuat runcing berjarak 10 cm dengan yang lainnya dan dipasang di setiap kaki tower dibawah rambu tanda bahaya..
12. Step bolt, yaitu baut panjang yang dipasang dari atas ACD ke sepanjang badan tower hingga super structure dan arm kawat petir. Berfungsi untuk pijakat petugas sewaktu naik maupun turun tower.
13. Halaman tower, daerah tapak tower yang luasnya diukur dari proyeksi keatas tanah galian pondasi. Biasanya antara 3 sampai 8 meter di luar stub tergantung pada jenis tower.

2.5.2. Isolator

2.5.2.1. Jenis – Jenis Isolator

Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas. Menurut kontruksi dan penggunaannya dapat dikenal tiga jenis isolator, yaitu :

- A. Isolator jenis pasak.
- B. Isolator jenis pos saluran.
- C. Isolator gantung.

Isolator jenis pasak dan pos saluran digunakan pada saluran transmisi dengan tegangan kerja relatif rendah (kurang dari 22 – 33 kV) sedangkan isolator gantung dapat digandeng menjadi rentengan isolator yang jumlahnya disesuaikan dengan kebutuhan. Jenis-jenis isolator ini dapat dilihat seperti ditunjukkan pada gambar 2-12.



A. Isolator pasak



C



Beberapa persyaratan yang perlu diperhatikan pada isolator adalah sebagai berikut:

- a. Memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi.

- b. Mempunyai nilai resistivitas yang tinggi untuk memperkecil arus bocor yang terjadi.
- c. Tahan terhadap masuknya gas-gas ataupun cairan-cairan ke dalam bahan isolator.
- d. Tidak dipengaruhi oleh perubahan suhu.

2.5.2.2. Fungsi Isolator

Adapun fungsi dari isolator terdiri dari dua aspek, yaitu :

1. Fungsi isolator dari aspek listrik
 - a. Mengisolasi antar kawat fasadengan tanah.
 - b. Mengisolasi antar kawat fasadengan kawat fasa.
2. Fungsi isolator dari aspek mekanik
 - a. Menahan berat kawat dari kawat penghantar.
 - b. Mengatur jarak dan sudut antar kawat dan kawat.
 - c. Menahan adanya perubahan kawat akibat perbedaan temperatur dan angin.

2.5.3. Kawat Penghantar

Jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (CU 100%), tembaga dengan konduktivitas 97% (CU 97%) dan aluminium dengan konduktivitas 61% (AL 61%). Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut :

- A. AAC (All-Aluminium Conductor) yaitu : kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.
- B. AAAC (All-Aluminium-Alloy Conductor) yaitu : kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.
- C. ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) yaitu : kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.
- D. ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced) yaitu : kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Pada umumnya saluran transmisi yang ada di Indonesia menggunakan jenis kawat penghantar jenis ACSR, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-13.

Karena kawat tembaga mempunyai tahanan yang sama besar, berat dan harga yang lebih mahal dari aluminium. Untuk memperbesar tarik dari aluminium maka digunakan campuran aluminium (*Aluminium Alloy*).



Gambar 2-13. Kabel ACSR.

Gambar 2-13 memperlihatkan penampang dari suatu kawat penghantar ACSR yang banyak digunakan. Penghantar tersebut terdiri dari 7 serat baja/*steel* (*St*) yang membentuk inti tengah sedangkan di sekelilingnya terdapat dua lapis serat aluminium (*Al*) dengan 24 serat. Kawat penghantar semacam ini dispefikan sebagai $24Al/7St$ atau $24/7$.

2.5.4. Kawat Tanah

Kawat tanah atau ground wires juga disebut dengan kawat pelindung (*shield wire*) gunanya untuk melindungi kawat-kawat penghantar atau kawat fasa terhadap sambaran petir. Jadi kawat tanah ini dipasang di atas kawat fasa. Sebahagian kawat tanah umumnya dipakai kawat baja (*steel wires*) yang lebih murah tetapi tidak jarang digunakan ACSR.

BAB III

KUAT MEDAN LISTRIK

3.1. Hukum Coulomb

Eksperimen elektrostatik dasar pertama sekali dilaporkan oleh Charles Augustin Coulomb (1736-1806) pada tahun 1785, menggunakan bola-bola kecil bermuatan yang dapat dianggap sebagai muatan titik. Hasil dari percobaan ini diberikan dalam Hukum Coulomb, yang menyatakan bahwa gaya F antara dua buah muatan titik Q_1 dan Q_2 besarnya sebanding dengan hasil kali kedua muatan. Muatan listrik dapat bernilai positif, nol (tidak terdapat muatan atau jumlah satuan muatan positif dan negatif sama) dan negatif. Nilai muatan ini akan memengaruhi perhitungan medan listrik dalam hal tandanya, yaitu positif atau negatif (atau nol). Apabila pada setiap titik di sekitar sebuah (atau beberapa) muatan dihitung medan listriknya dan digambarkan vektor-vektornya, akan terlihat garis-garis yang saling berhubungan, yang disebut sebagai garis-garis medan listrik. Tanda muatan menentukan apakah garis-garis medan listrik yang disebabkan berawal darinya atau menuju darinya. Telah ditentukan (berdasarkan gaya yang dialami oleh muatan uji positif), bahwa:

Gaya listrik adalah gaya yang dialami oleh obyek bermuatan yang berada dalam medan listrik. Rumusan gaya listrik kadang sering dipertukarkan dengan hukum Coulomb, padahal gaya listrik bersifat lebih umum ketimbang hukum tersebut, yang hanya berlaku untuk dua buah muatan titik. Jadi suatu titik dikatakan berada dalam medan listrik apabila suatu benda yang bermuatan listrik ditempatkan pada titik tersebut akan mengalami gaya listrik.

Gaya listrik, sebagaimana umumnya gaya, dilambangkan dengan huruf F atau biasa diberi indeks kecil di bawah E (electric) atau L (listrik).

$$F = qE$$

Dengan :

q = muatan listrik (coulomb)

E = medan listrik (N/C)

Medan Listrik sering juga di pakai istilah kuat medan listrik atau intensitas medan listrik. Kuat medan listrik di suatu titik adalah gaya yang diderita oleh

suatu muatan percobaan yang diletakkan dititi itu dibagi oleh besar muatan percobaan.

Adanya medan gaya listrik digambarkan oleh Garis Medan Listrik (Lines of Force) yang mempunyai sifat:

1. Garis Medan listrik keluar dari muatan positif menuju ke muatan negatif
2. Garis medan listrik antara dua muatan tidak pernah berpotongan

Jika medan listrik di daerah itu kuat, maka garis medan listriknya rapat dan sebaliknya. Medan ada dua macam yaitu :

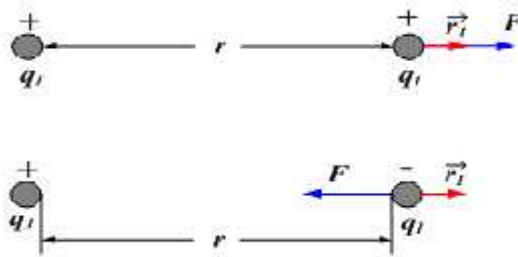
Medan vektor, misalnya medan listrik dan medan magnet

Ada dua jenis muatan listrik yang diberi nama positif dan negatif. Muatan listrik selalu merupakan kelipatan bulat dari satuan muatan dasar e . Muatan dari elektron adalah $-e$ dan proton $+e$. Benda menjadi bermuatan akibat adanya perpindahan muatan dari satu benda ke benda lainnya, biasanya dalam bentuk elektron. Muatan bersifat kekal. Muatan tidak diciptakan maupun dimusnahkan pada proses pemberian muatan, tetapi hanya berpindah tempat.

Gaya yang dilakukan oleh satu muatan kepada muatan lainnya bekerja sepanjang garis yang menghubungkan muatan-muatan. besarnya gaya berbanding lurus dengan hasil kali muatanmuatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya. Gaya akan tolak menolak jika muatanmuatan mempunyai tanda yang sama dan akan tarik menarik jika mempunyai tanda yang tidak sama.

Sebuah muatan listrik dikatakan memiliki medan listrik di sekitarnya. Medan listrik adalah daerah di sekitar benda bermuatan *listrik* yang masih mengalami gaya listrik. Jika muatan lain berada di dalam medan listrik dari sebuah benda bermuatan listrik, muatan tersebut akan mengalami gaya listrik berupa gaya tarik atau gaya tolak.

Nilai k pada persamaan di atas merupakan suatu konstanta. Gaya yang timbul mengikuti arah garis yang menghubungkan kedua muatan tersebut. Seperti yang tergambar pada Gambar 2.1(a), gaya mengarah ke luar (gaya tolak) jika kedua muatan sejenis (tandanya sama), tetapi, seperti yang tergambar pada Gambar 2.1(b), gaya mengarah ke dalam (gaya tarik), jika kedua muatan berbeda jenis (berlawanan tanda).



Gambar 3.1 Gaya pada muatan uji akibat muatan titik

Dalam Sistem Internasional (SI), nilai konstanta k diberikan oleh:

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon} \quad (2.2)$$

dimana ϵ merupakan permitivitas medium di sekitar muatan. Satuan SI untuk permitivitas adalah Farad per meter (Fm⁻¹). Permitivitas ruang hampa adalah:

$$\epsilon_u = 8,85 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1} = 8,85 \text{pFm}^{-1}$$

$$\frac{1}{36\pi} \times 10^{-1} \text{Fm}^{-1} = \frac{1}{36\pi} \text{nFm}^{-1} \quad (2.3)$$

Permitivitas udara nilainya mendekati permitivitas ruang hampa.

Gaya merupakan besaran vektor, oleh sebab itu, gaya memiliki besar dan arah. Jika Persamaan (2.1) ditulis sebagai persamaan vektor dengan mensubstitusikan nilai k, maka diperoleh:

$$\vec{F} = \frac{\hat{r}(Q_1Q_2)}{4\pi\epsilon r^2} \quad (2.4)$$

Dimana:

\vec{F} = Gaya (N)

\hat{r} = Vektor satuan yang searah dengan garis yang menghubungkan kedua muatan

Q_1 = muatan 1 (C)

Q_2 =muatan 2 (C)

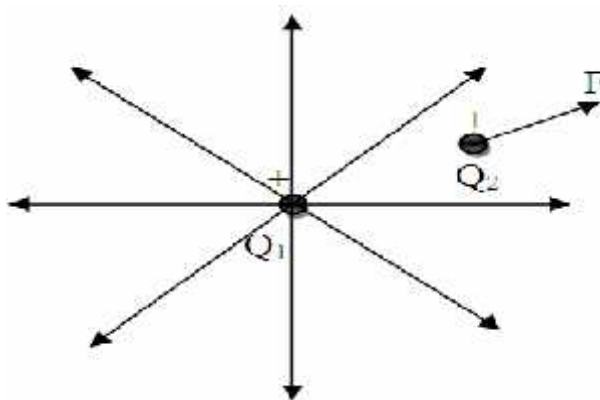
ϵ = Permitivitas medium di sekitar muatan (Fm⁻¹)

r = Jarak di antara kedua muatan (m)

Rumus di atas merupakan ekspresi vektoris Hukum Coulomb secara lengkap dalam satuan SI.

3.2. Intensitas Medan Listrik

Misalkan terdapat sebuah muatan titik positif Q_1 dalam kedudukan tetap. Kemudian terdapat muatan lainnya, misalkan Q_2 , yang mengelilingi muatan Q_1 tersebut. Ternyata, dimanapun posisi muatan Q_2 , selalu ada gaya yang bereaksi pada muatan tersebut. Dengan kata lain, menunjukkan adanya suatu medan gaya di sekitar muatan Q_1 . Sifat medan gaya ini ditunjukkan oleh gambar di bawah:



Gambar 3.2 Vektor medan gaya suatu muatan titik

Besarnya gaya yang dialami oleh muatan Q_2 akibat Q_1 , diberikan oleh Persamaan (2.3), yaitu:

$$F = \frac{r(Q_1 Q_2)}{4\pi\epsilon r^2}$$

Dari persamaan di atas, diperoleh gaya per satuan muatan yang didefinisikan sebagai intensitas medan listrik, yaitu:

$$E = \frac{F}{Q_2} = \frac{rQ_1}{4\pi\epsilon r^2} \quad (2.4)$$

Dimana Q_2 merupakan muatan uji positif.

Satuan SI untuk intensitas medan listrik adalah Newton per Coulomb (NC-1). Satuan lain yang sering digunakan untuk menyatakan intensitas medan listrik adalah Volt per meter (Vm-1).

Berdasarkan Persamaan (2.4), muatan titik Q_1 dikelilingi oleh suatu medan listrik dengan intensitas sebesar E yang sebanding dengan besar Q_1 dan

berbanding terbalik terhadap kuadrat jarak (r^2). Intensitas medan listrik E merupakan sebuah vektor yang memiliki arah yang sama dengan arah gaya F tetapi berbeda dimensi dan besarnya (magnitude).

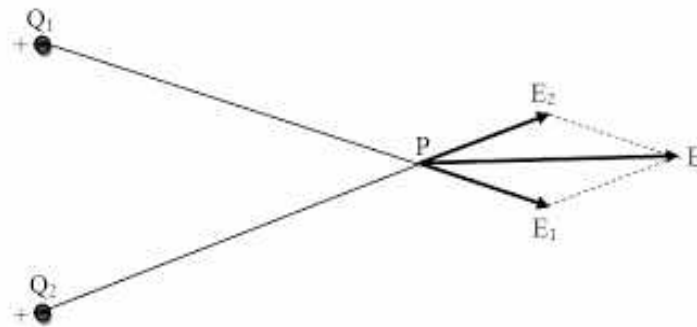
3.3. Prinsip Superposisi Medan Listrik

Untuk mencari intensitas medan listrik E yang dihasilkan oleh sekumpulan muatan titik: (a) Hitunglah E_n yang dihasilkan oleh setiap muatan pada titik yang diberikan dengan menganggap seakan-akan tiap muatan tersebut adalah satu-satunya muatan yang hadir. (b) Tambahkanlah secara vektor medan-medan yang dihitung secara terpisah ini untuk mencari resultan medan E pada titik tersebut. Di dalam bentuk persamaan:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots = \sum E_n \quad (2.5)$$

Dimana $n = 1, 2, 3, \dots$

Persamaan di atas merupakan rumusan aplikasi prinsip superposisi dalam medan listrik yang dapat dinyatakan sebagai berikut: total atau resultan medan pada suatu titik adalah penjumlahan vektoris dari tiap-tiap komponen medan pada titik tersebut. Maka, berdasarkan Gambar 2.3, intensitas medan listrik pada titik P akibat muatan Q_1 adalah E_1 dan akibat muatan Q_2 adalah E_2 . Total medan listrik pada titik P akibat kedua muatan titik merupakan penjumlahan vektoris dari E_1 dan E_2 , atau E .



Gambar 3.3 Prinsip superposisi pada medan listrik

Jika distribusi muatan tersebut adalah suatu distribusi yang kontinu, maka medan yang ditimbulkannya pada titik P dapat dihitung dengan membagi muatan menjadi elemen-elemen yang sangat kecil dq . Medan dE yang ditimbulkan oleh setiap elemen pada titik di mana akan dicari kemudian dihitung, dengan

memperlakukan elemen- elemen sebagai muatan-muatan titik. Besarnya dE diberikan oleh:

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon r^2} \quad (2.6)$$

dimana r adalah jarak dari elemen muatan dq ke titik P . Medan resultan pada P kemudian dicari dari prinsip-prinsip superposisi dengan menambahkan (yakni, dengan mengintegalkan) kontribusi-kontribusi medan yang ditimbulkan oleh semua elemen muatan, atau:

$$E = \int dE \quad (2.7)$$

3.4. Tegangan Transmisi dan Rugi-Rugi Daya

Transmisi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berperan menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit ke gardu induk. Saat sistem beroperasi, pada saluran transmisi terjadi rugi-rugi daya. Jika tegangan transmisi adalah tegangan bolak-balik tiga fasa, maka besarnya rugi-rugi daya yang timbul adalah sebagai berikut:

$$\Delta P_r = 3I^2R \text{ Watt} \quad (3.1)$$

di mana:

ΔP = Rugi-rugi daya [watt]

I = Arus jala-jala transmisi [Ampere]

R = Tahanan kawat transmisi per fasa [Ohm]

Arus pada jala-jala suatu transmisi arus bolak-balik tiga fasa adalah:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V_r \cos \varphi} \quad (3.2)$$

di mana:

P = Daya beban pada ujung penerima transmisi [Watt]

V_r = Tegangan fasa ke fasa ujung penerima transmisi [Volt]

\cos = Faktor daya beban

Jika Persamaan (3.2) disubstitusikan ke Persamaan (3.1), maka rugi-rugi daya transmisi dapat dituliskan sebagai berikut:

di mana:

$$\Delta P_r = \frac{P^2 R}{V_r^2 \cos^2 \varphi} \quad (3.3)$$

3.5. Kuat Medan Listrik di Bawah Saluran Transmisi

Tegangan tinggi yang diterapkan pada transmisi daya listrik menghasilkan medan listrik yang kuat pula. Untuk menghitung kuat medan listrik di bawah saluran transmisi, terlebih dahulu harus diketahui:

- Harga x , yaitu jarak pemisah horizontal antar konduktor penghantar transmisi,
- Harga y , yaitu ketinggian konduktor penghantar dari titik yang ditinjau,
- Harga r , yaitu jari-jari konduktor yang dipakai,

$$E = \frac{V}{x \ln \frac{H}{r}} \quad (3.16)$$

dimana:

E = kuat medan listrik di sekitar konduktor silinder,

V = tegangan fasa ke netral,

H = ketinggian penghantar dari permukaan tanah,

x = jarak konduktor ke titik yang diamati,

r = jari-jari konduktor.

Kuat medan listrik masing-masing fasa adalah:

$$E_R = \frac{V_R}{r_R \ln \frac{H}{r}} \quad (3.16)$$

$$E_S = \frac{V_S}{r_S \ln \frac{H}{r}} \quad (3.17)$$

$$E_T = \frac{V_T}{r_T \ln \frac{H}{r}} \quad (3.18)$$

3.6. Metode tidak langsung

Metode tidak langsung dimulai dengan konfigurasi sederhana dimana garis ekopotensial dapat dihitung. Kemudian beberapa garis ekopotensial yang sesuai dapat digantikan oleh elektroda dan kekuatan medan pada elektroda dapat dihitung menggunakan distribusi medan asli. Biasanya, perhitungan dimulai dengan poin saluran atau garis saluran. Dalam kasus dua silinder paralel :

1. Diambil garis muatan yang menyebabkan bidang silinder

2. maka dua bidang garis dapat dihitung dengan melapiskan bidang kedua bidang ini. Tampaknya bidang gabungan terdiri dari silinder ekopotensi.
3. Salah satu dari silinder ini digantikan oleh elektroda silinder dengan jari jari r dan kekuatan medan pada permukaan silinder dapat dihitung

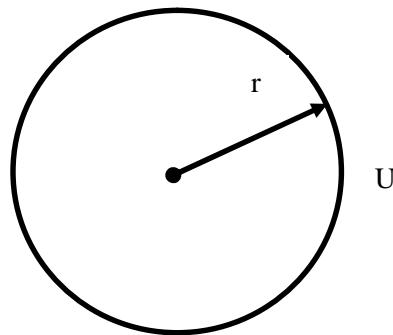
3.6.1. Langkah pertama

pada gambar 2.9 dipertimbangkan garis muatan coulomb per meter. karena simetri

$$D_n dA = \epsilon E 2\pi r = \rho$$

Sehingga

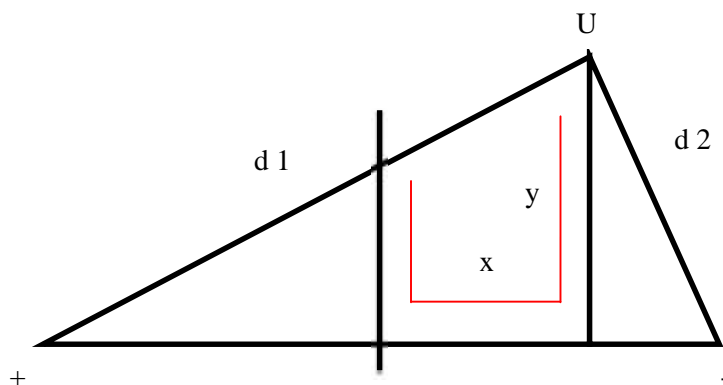
$$U = \int_0^r E dr = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \ln r$$



gambar3.4Bidang dua silinder paralel, bidang mengelilingi muatan garis

3.6.2. Langkah kedua

dua muatan garis + dan- sekarang digabungkan, lihat gambar 2.10



Gambar 3.5 Medan listrik pada dua silinder paralel.

Potensi medan dilapangan berubah ubah terus maka,

$$U = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \ln d_1 - \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \ln d_2$$

$$U = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \ln \left(\frac{d_1}{d_2} \right)$$

dalam bidang ekopotensial U adalah konstan U_c , sehingga ekopotensial ditentukan oleh :

$$\ln \left(\frac{d_1}{d_2} \right) = \frac{2\pi\epsilon}{\rho} U_c$$

Atau

$$\frac{d_1}{d_2} = \exp \frac{2\pi\epsilon}{\rho} U_c = k_1$$

Dengan menggunakan teorema pythagoras maka di dapat :

$$d_1^2 = a^2 + x^2 + y^2$$

$$d_2^2 = a^2 - x^2 + y^2$$

Dan mulai

$$d_1 = k d_2$$

Setelah melalui beberapa perhitungan

$$x^2 - 2a \frac{k^2 + 1}{k^2 - 1} x + y^2 = -a^2$$

Dapat ditulis dengan

$$x - \frac{a}{k}^2 + y^2 = r^2$$

Dimana,

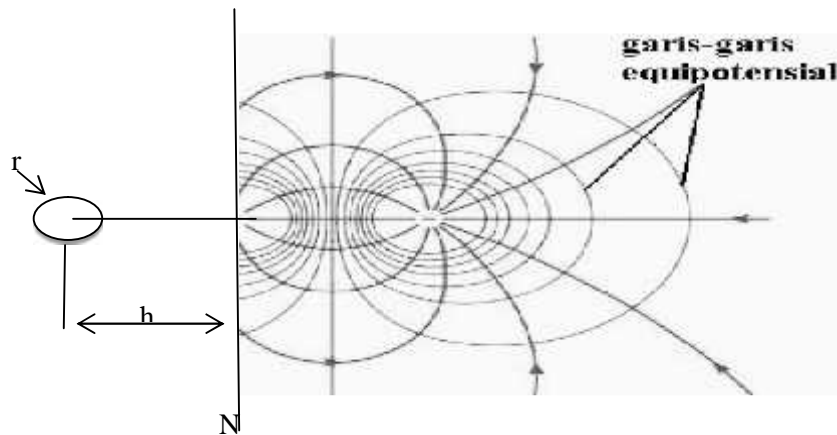
$$k = \frac{a}{r} + \frac{a^2}{k^2} - 1$$

And

$$a^2 = \frac{a^2}{k^2} - r^2$$

Ini adalah konklusi penting. Dimana garis ekopotensial adalah lingkaran pusat.

Pusat lingkaran ini terletak pada jarak h dan titik tengah. lihat gambar 2.11



Gambar 3.6 Dua lingkaran yang diganti oleh elektroda bidang antara elektroda tetap tidak berubah.

Semakin besar lingkaran ini, semakin jauh pusat garis nol. Dalam kasus ini lingkaran itu sangat besar dan memiliki titik pusat pada jarak yang sangat jauh. membentuk garis netral ditengah lapangan.

3.6.3. Langkah ketiga

Kita tau mencocokkan dua silinder logam r kedua lingkaran ekopotensial dengan ukuran yang sama. Jarak antara r2 dan pusat adalah 2 jam. Ue potensial pada silinder ini adalah seperti yang telah lihat sebelumnya.

$$U_c = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_1}{d_2}$$

Dimana $\frac{d_1}{d_2}$ sama dengan k

Jika nilai k di atas di masukkan

$$U_c = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2}{r} + \frac{2^2}{r^2} - 1$$

Dan jika jarak 2h antara pusat besar dibandingkan dengan jari-jari r :

$$U_c \approx \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \ln 2 \frac{2}{r}$$

Bidang antara silinder yang baru diperkenalkan ini masih sama dan diberikan oleh superposisi potensi seperti yang di tunjukkan pada gambar 2.10 sebagai bidang

tertinggi yang diharapkan sepanjang sumbu x, potensi pada sumbu ini berasal dari gambar 2.10

$$U_x = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \ln a + x - \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \ln a - x$$

$$= \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \ln \frac{a + x}{a - x}$$

kekuatan medan di sepanjang sumbu x adalah

$$E_x = - \frac{dU_x}{dx} = - \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \frac{2a}{a^2 - x^2}$$

kekuatan medan maksimal terjadi pada permukaan silinder logam

di mana $x = \sqrt{h^2 - r^2}$

$$E_{max} = - \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \frac{2a}{a^2 - (h - r)^2}$$

Dan menggunakan $a^2 = h^2 - r^2$

$$E_{max} = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \frac{\sqrt{h^2 - r^2}}{r^2 - \sqrt{h^2 - r^2}}$$

Jika $h^2 \gg r^2$

$$|E_{max}| = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \frac{1}{r}$$

Dari langkah ketiga kita mendapatkan

$$\frac{\rho}{2\pi\epsilon} = \frac{U_c}{r \ln(2 \frac{h}{r})}$$

Maka,

$$E_{max} = \frac{U_c}{r \ln 2 \frac{h}{r}} \text{ for } h \gg r$$

3.6.4 Implikasi praktis

Formula di atas memberikan perkiraan yang baik dan kekuatan medan antara dua garis tegangan tinggi dengan diameter $2r$ menggantung bagian $2h$ dan dengan perbedaan potensial $2U_c$. Jika bidang ekopotensial netral (N dalam gambar 2.11) digantikan oleh permukaan bumi dan angka tersebut di ubah oleh 90° , konfigurasi berubah menjadi garis tegangan tinggi dengan diameter $2r$,

tergantung h di atas bumi dan diberi energi pada tegangan rumus yang sama berlaku untuk kekuatan bidang di garis.

Pada langkah 3, U_c kapasitansi garis seperti itu ke bumi dapat diturunkan

$$C = \frac{\rho l}{U} = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(2\frac{h}{r})}$$

Besar medan listrik yang ditimbulkan dapat di ukur dan di hitung agar nilai medan listrik tersebut tetap di bawah nilai standart ambang batas yang telah ditentukan oleh BSN(Badan Standardisasi Nasional) yang diacu oleh PT. PLN (persero) sebesar 5 kv / m dan standar yang dikeluarkan oleh WHO (World Health Organization) sebesar 10 kv / m.