

Studi Kuat Medan Listrik Tower 213-214 Section Duri Bagan Batu

Juanda Tarigan¹, Usaha Situmeang², Monice³

1,2,3 Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning

Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324

Email: juanda.jtit@gmail.com¹, usaha@unilak.ac.id², monice@unilak.ac.id³

Submitted : 20 September 2021 Accepted: 1 Juni 2022*

DOI: 10.31849/sainetin.v6i2.7142

ABSTRAK

Pemakaian tegangan tinggi pada transmisi daya listrik selain dapat mengurangi rugi-rugi daya, juga menghasilkan kuat medan listrik yang tinggi di sekitar konduktor bertegangan. Kuat medan listrik dipengaruhi oleh jarak titik uji dari konduktor fasa. Semakin dekat jarak antara titik uji dengan konduktor fasa, maka kuat medan yang timbul juga semakin besar. Sebaliknya, semakin jauh titik uji dari konduktor fasa, maka medan listrik yang timbul akan berkurang. Dan hasil analisa manual dengan titik uji 1,7 meter berada dititik nol atau ditengah andongan antara tower 213-214 kuat medan listrik tertinggi dalam fungsi waktu $E_{\max} = 0,718$ kV/m pada $t = 0,020$ s dan kuat medan listrik total terendah dalam fungsi waktu $E_{\min} = 0,103$ kV/m di $t = 0,015$ s dengan kuat medan listrik efektif $E_{\text{eff}} = 0,495$ kV/m. Dari perhitungan Matlab diperoleh kuat medan listrik terendah di posisi titik uji 1 meter *vertikal*, 18 meter *horizontal* $E_{\min} = 0,386$ kV/m dan kuat medan listrik tertinggi di posisi titik uji 13 meter *vertikal*, 4 meter *horizontal* $E_{\max} = 5,357$ kV/m. Hal tersebut memperlihatkan bahwa ketinggian maksimum dari bangunan-bangunan yang berada di bawah saluran transmisi adalah 9 m, dan ruang bebas (*clearance*) saluran transmisi adalah 6 m.

Kata kunci : Ketinggian tower, besar kuat medan listrik, MatLab

ABSTRACT

*The use of high voltages in electrical power transmission can reduce power losses, but also results in high electric field strengths around voltage conductors. The electric field strength is influenced by the distance of the test point from the phase conductor. The closer the distance between the test point and the phase conductor, the greater the field strength that arises. Conversely, the farther the test point is from the phase conductor, the less electric field will arise. And the results of manual analysis with the 1.7 meter test point are at the zero point or in the middle of andongan between the 213-214 towers the highest electric field strength in the time function $E_{\max} = 0.718$ kV m at $t = 0.020$ s and the lowest total electric field strength in the time function $E_{\min} = 0.103$ kV m dit - 0.015s with effective electric field strength $E_{\text{eff}} = 0.495$ kV m. From the Matlab calculation, the lowest electric field strength is obtained at the test point position of 1 vertical meter, 18 meter horizontal tire - 0.386 kV m and the highest electric field strength at the test point position is 13 vertical meters. 4 meter horizontal $E_{\max} = 5,357$ kV m This shows that the maximum height of the buildings under the transmission line is 9 m. and the clearance (*clearance*) of the transmission line is 6 m.*

Keywords : *the height of tower, electric field strength, MatLab*

1. PENDAHULUAN

PT. PLN (Persero) adalah Perusahaan Milik Negara yang diberi wewenang untuk menangani sistem bahkan masalah kelistrikan di Indonesia, sehingga memegang peranan yang sangat penting dalam menjamin kualitas kelistrikan dan memberikan pelayanan terbaik, mulai dari penyediaan daya listrik, penyaluran dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban, sampai dengan

pendistribusiannya ke pihak pelanggan [1], [2]. Seiring dengan semakin meningkatnya permintaan akan pasokan daya listrik, maka pihak PLN mulai membangun beberapa pusat pembangkit untuk melayani permintaan tersebut [3].

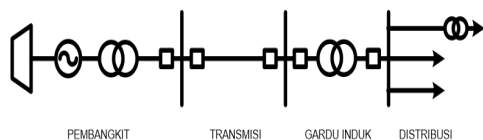
Selain membangun pusat-pusat pembangkit baru, PLN juga akan membangun saluran transmisi untuk menyalurkan daya listrik ke pusat beban. Pembangunan ini seringkali menimbulkan konflik antara pihak pemerintah, dalam hal ini PLN, dengan

masyarakat yang tinggal di dekat saluran transmisi terkait dampak merugikan yang ditimbulkannya [4], [5].

Dari hasil ukur dilapangan salah satu saluran transmisi yang ada di PLN adalah saluran transmisi dari Gardu Induk Duri ke Gardu Induk Bagan Batu dan di tower 213-214 memiliki kuat medan listrik mendekati standard yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil ukur tersebut, maka dilakukan suatu penelitian perhitungan kuat medan listrik di bawah saluran transmisi tower 213-214 section Duri-Bagan Batu.

2. METODE PENELITIAN

Sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama, yaitu pusat listrik, saluran transmisi dan sistem distribusi. Secara sederhana alur sistem tenaga listrik seperti pada Gambar 1 [6].



Gambar 1 Alur Sistem Tenaga Listrik

Pembangkit merupakan tempat energi listrik pertama kali dibangkitkan, dimana terdapat turbin penggerak mula (prime mover) dan generator yang membangkitkan listrik sering disebut pembangkit. Biasanya dipusat pembangkit listrik juga terdapat gardu induk. Peralatan utama pada gardu induk antara lain transformer, yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator (11,5 kV) menjadi tegangan transmisi tegangan tinggi (150 kV) dan juga peralatan pengaman dan pengatur. Jenis pusat pembangkit antara lain: Pembangkit Listrik Tenaga Air/PLTA, Pembangkit Listrik Tenaga Uap/PLTU, Pembangkit Listrik Tenaga Gas/PLTG, Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir/PLTN [6].

Transmisi dan Gardu Induk Merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik (*power plant*) hingga saluran distribusi tenaga listrik (*substation distribution*) sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik. Saluran transmisi adalah suatu sistem penyaluran energi listrik berskala besar dari pembangkit ke pusat-pusat beban. Pemakaian saluran transmisi didasarkan atas besarnya daya yang harus disalurkan dari pusat-pusat pembangkit ke pusat beban dengan jarak penyaluran yang cukup jauh antara pusat pembangkit dan pusat beban tersebut. Sistem transmisi menyalurkan daya dengan

tegangan tinggi digunakan untuk mengurangi adanya rugi-rugi transmisi akibat jatuh tegangan.[6]

Sistem Distribusi merupakan subsistem tersendiri yang terdiri dari Pusat Pengatur atau *Distribution Control Center (DCC)*, saluran tegangan menengah (6 kV dan 20 kV, yang juga 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 transformator sampai dengan panel-panel distribusi tegangan rendah (380V/220V) yang menghasilkan tegangan kerja/tegangan jala-jala untuk industri dan konsumen [7].

Tower 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 menara (*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 [8]. Namun perlu pengawasan yang instensif karena besi-besinya rawan terhadap pencurian.



Gambar 2. Menara Transmisi

Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas. Menurut konstruksi dan penggunaannya ada tiga jenis isolator [9], yaitu : Isolator jenis pasak, Isolator jenis pos saluran, 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.



Gambar 3 Jenis-Jenis Isolator

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). *All-Aluminium Conductor (AAC)* yaitu : kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium. b). *All-Aluminium-Alloy Conductor (AAAC)* yaitu : kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium. c). *Aluminium Conductor Steel Reinforced (ACSR)* yaitu : kawat penghantar aluminium berinti kawat baja. d). *Aluminium Conductor Alloy Reinforced (ACAR)* yaitu : kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran [10]–[13].

Pada umumnya saluran transmisi yang ada di Indonesia menggunakan jenis kawat penghantar jenis ACSR [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*).

Masalah Penerapan Tegangan Tinggi pada Transmisi

Meskipun peninggian tegangan transmisi akan mengurangi rugi-rugi daya, peninggian tegangan itu tetap ada batasnya karena tegangan tinggi menimbulkan beberapa masalah, antara lain [6]:

a. Tegangan transmisi dapat menimbulkan korona pada kawat transmisi. Korona ini

menimbulkan rugi-rugi daya dan dapat menimbulkan gangguan terhadap komunikasi radio.

- b. Jika tegangan transmisi semakin tinggi, maka peralatan transmisi dan gardu induk membutuhkan isolasi yang volumenya semakin banyak agar peralatan mampu memikul tegangan tinggi tersebut. Hal ini mengakibatkan kenaikan biaya investasi.
- c. Saat terjadi pemutusan dan penutupan rangkaian transmisi (*switching operation*), timbul tegangan lebih surja hubung sehingga peralatan sistem tenaga listrik harus dirancang mampu memikul tegangan lebih tersebut. Hal ini juga mengakibatkan kenaikan biaya investasi.
- d. Jika tegangan transmisi ditinggikan, menara transmisi harus semakin tinggi untuk menjamin keselamatan makhluk hidup di sekitar transmisi. Peninggian menara transmisi mengakibatkan transmisi mudah disambar petir. Sambaran petir pada transmisi akan menimbulkan tegangan lebih surja petir pada sistem tenaga listrik, sehingga peralatan listrik harus dirancang mampu memikul tegangan lebih tersebut.
- e. Peralatan sistem perlu dilengkapi dengan peralatan proteksi untuk menghindarkan kerusakan akibat adanya tegangan lebih surja hubung dan surja petir. Penambahan peralatan proteksi ini menambah biaya investasi dan perawatan.

Medan Listrik di Sekitar Konduktor Silinder

1. 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 [14] :

$$\Delta P_r = 3I^2 R \quad (1)$$

Dimana :

- 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:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3V} \cdot \cos \varphi} \quad (2)$$

Dimana :

P = Daya beban pada ujung penerima transmisi [Watt]
 V_r = Tegangan fasa ke fasa ujung penerima transmisi [Volt]
 $\cos\phi$ = Faktor daya beban

Jika Persamaan (1) disubstitusikan ke Persamaan (2), maka rugi-rugi daya transmisi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta P = \frac{P^2 R}{V_r^2 \cos^2 \phi} \quad (3)$$

Dari Persamaan (3) di atas dapat dilihat bahwa rugi-rugi daya transmisi dapat dikurangi dengan cara meninggikan tegangan transmisi, memperkecil tahanan konduktor, dan memperbesar faktor daya beban. Tetapi cara yang cenderung dilakukan adalah meninggikan tegangan transmisi dengan dasar pertimbangan sebagai berikut:

- Memperkecil tahanan konduktor dilakukan dengan memperbesar luas penampangnya. Tetapi, cara ini memiliki keterbatasan karena penambahan luas penampang konduktor juga ada batasnya.
- Perbaikan faktor daya dilakukan dengan menambahkan kapasitor kompensasi (*shunt capacitor*). Tetapi, perbaikan yang diperoleh juga ada batasnya.
- Dari Persamaan (3) di atas terlihat bahwa rugi-rugi daya transmisi berbanding terbalik dengan kuadrat tegangan transmisi, sehingga pengurangan rugi-rugi yang diperoleh karena peninggian tegangan transmisi jauh lebih besar daripada pengurangan rugi-rugi daya karena pengurangan tahanan konduktor.

Hukum Coulomb

Eksperimen elektrostatis 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 negatif, nol (tidak terdapat muatan atau jumlah satuan muatan positif dan negatif sama) dan positif. 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 berasal dari atau menuju darinya.

Gaya listrik adalah gaya yang dialami oleh objek 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 [15].

Gaya listrik, sebagaimana umumnya gaya, dilambangkan dengan huruf F atau biasa diberi indeks kecil di bawah E (electric) atau L (listrik) [15].

$$F = qE \quad (4)$$

Dimana :

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 : a)

- Garis Medan listrik keluar dari muatan positif menuju ke muatan negatif.
- 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.

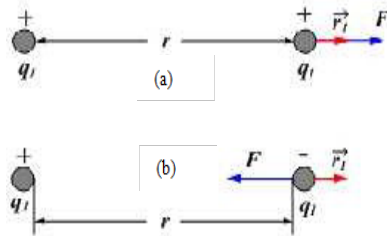
Ada dua jenis muatan listrik yang diberi nama positif dan negatif. Muatan listrik selalu merupakan kelipatan bulat dari satuan muatan dasar e . Muatan dari elektron adalah $-e$ dan proton $+e$. Benda menjadi bermuatan akibat adanya perpindahan muatan dari satu benda ke benda lainnya, biasanya dalam bentuk elektron. Muatan bersifat kekal, 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 muatan-muatan

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 4(a), gaya mengarah ke luar (gaya tolak) jika kedua muatan sejenis (tandanya sama), tetapi seperti yang tergambar pada Gambar 4(b), gaya mengarah ke dalam (gaya tarik), jika kedua muatan berbeda jenis [15].



Gambar 4. Gaya pada muatan uji akibat muatan titik

Dalam Sistem Internasional (SI), nilai konstanta k [15]:

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon} \quad (5)$$

Dimana ϵ merupakan permitivitas medium di sekitar muatan. Satuan SI untuk permitivitas adalah Farad per meter (Fm^{-1}). Permitivitas ruang hampa adalah :

$$\epsilon = 8,85 \times 10^{-12} Fm^{-1} = 8,85 pFm^{-1} \quad (6)$$

$$\approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-1} Fm^{-1} = \frac{1}{36\pi} pFm^{-1} \quad (7)$$

Permitivitas udara nilainya mendekati permitivitas ruang hampa. Gaya merupakan besaran vektor, oleh sebab itu, gaya memiliki besar dan arah. Jika Persamaan (4) ditulis sebagai persamaan vektor dengan mensubstitusikan nilai k , maka diperoleh :

$$F = \frac{\hat{r}(Q_1Q_2)}{4\pi\epsilon r^2} \quad (8)$$

Dimana :

- F = Gaya (N)
- \hat{r} = Vektor satuan yang searah dengan garis yang menghubungkan kedua muatan
- Q_1 = Muatan 1
- Q_2 = Muatan 2
- 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.

Prinsip Superposisi Medan Listrik

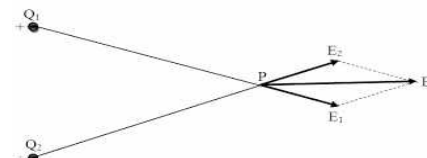
Untuk mencari intensitas medan listrik E yang dihasilkan oleh sekumpulan muatan titik: a). Hitunglah E_n yang dihasilkan oleh setiap muatan pada titik yang diberikan dengan menganggap seakan-akan tiap muatan tersebut adalah satu-satunya muatan yang hadir. b). Tambahkanlah secara vektor medan-medan yang dihitung secara terpisah ini untuk mencari resultan medan E pada titik tersebut, dalam bentuk persamaan : [15]

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots = \sum E_n \quad (9)$$

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 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 5 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 :

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon r^2} \quad (10)$$

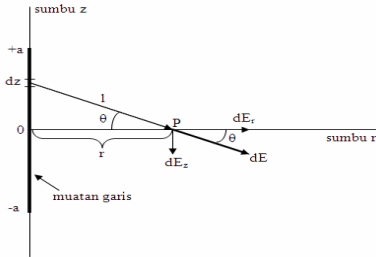
dimana r adalah jarak dari elemen muatan dq ke titik P. Medan resultan pada P kemudian dicari dari prinsip-prinsip superposisi dengan menambahkan (yakni, dengan mengintegalkan) kontribusi-kontribusi medan yang ditimbulkan oleh semua elemen muatan, atau :

$$E = \int dE \quad (11)$$

Integrasi tersebut adalah sebuah operasi vektor.

2. Perhitungan Medan Listrik Di Sekitar Konduktor Silinder

Untuk memperhitungkan medan listrik yang timbul di sekitar konduktor, terlebih dahulu diperhitungkan kuat medan yang dihasilkan oleh suatu muatan garis. Misalkan suatu muatan sebesar Q terdistribusi secara merata di garis tipis sepanjang $2a$ dengan titik tengahnya berada di titik pusat [16], seperti tergambar pada Gambar 6



Gambar 6 Muatan garis sepanjang $2a$

Kerapatan muatan ρ_L (muatan per satuan panjang) dirumuskan dengan :

$$\rho_L = \frac{Q}{2a} \quad (12)$$

dimana ρ_L dalam satuan Coulomb per meter ketika Q dalam Coulomb dan a dalam meter.

Pada titik P di sumbu r , medan listrik dE akibat sebagian kecil dari muatan garis dz dirumuskan dengan [16] :

$$dE = \frac{I(\rho_L dz)}{4\pi\epsilon l^2} \quad (13)$$

dimana $l = \sqrt{r^2 + z^2}$ dan \hat{l} merupakan vektor satuan ke arah l .

Karena sumbu z pada Gambar 6 merupakan sumbu simetri, medan hanya memiliki komponen z dan r . Sehingga :

$$dE_r = dE \cos \theta = dE \frac{r}{l} \quad (14)$$

dan

$$dE_z = dE \sin \theta = dE \frac{z}{l} \quad (15)$$

Resultan atau total komponen E_r pada sumbu r diperoleh dengan cara mengintegrasikan Persamaan (10) sepanjang keseluruhan garis, maka :

$$E_r = \frac{\rho_L r}{4\pi\epsilon} \int_{-a}^{+a} \frac{dz}{l^3} = \frac{\rho_L r}{4\pi\epsilon} \int_{-a}^{+a} \frac{dz}{(r^2 + z^2)^{3/2}} \quad (16)$$

dan hasilnya adalah :

$$E_r = \frac{\rho_L a}{2\pi\epsilon r \sqrt{r^2 + a^2}} \quad (17)$$

Secara simetri, resultan dari komponen E_z pada suatu titik di sumbu r nilainya nol. Maka, total

medan E pada titik di sumbu r arahnya radial dan besarnya :

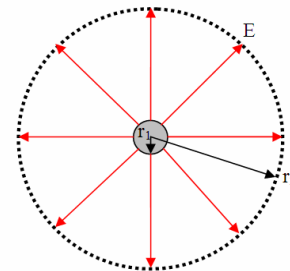
$$|E| = E_r = \frac{\rho_L a}{2\pi\epsilon r \sqrt{r^2 + a^2}} \quad (18)$$

Persamaan ini menyatakan medan sebagai fungsi r pada suatu titik di sumbu r untuk muatan garis sepanjang $2a$ dan kerapatan muatan ρ_L yang *uniform*.

Kasus berikutnya adalah jika muatan garis pada Gambar 4 diperpanjang sampai tak terhingga ke arah positif dan negatif dari sumbu z . Jika pembilang dan penyebut dibagi dengan a dan nilai tak berhingga disubstitusikan ke a , maka diperoleh intensitas medan listrik akibat muatan garis yang panjangnya tak berhingga, yaitu :

$$|E| = E_r = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon r} \quad (19)$$

Selanjutnya, jika muatan terdistribusi secara merata di sepanjang silinder dengan radius r_1 seperti terlihat pada Gambar 7 (misalkan pada konduktor silinder), maka medan listrik di luar silinder diberikan oleh Persamaan (19) untuk $r_2 > r_1$



Gambar 7 Medan listrik pada konduktor silinder

Beda potensial V_{21} antara dua titik pada jarak r_2 dan r_1 dari muatan garis tak berhingga ini merupakan energi yang diperlukan per satuan muatan untuk memindahkan sebuah muatan uji dari r_2 menuju r_1 . Misalkan $r_2 > r_1$, maka beda potensial ini merupakan integral garis E_r dari r_2 menuju r_1 . Potensial di r_1 akan lebih tinggi daripada potensial di r_2 , jika muatan garisnya positif.

$$V_{21} = -\int_2^1 E_r dr = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon} \int_1^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (20)$$

atau

$$V_{21} = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon} [\ln r]_1^{r_2} = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (21)$$

Beda potensial antara silinder dengan sebuah titik di luar silinder dapat dihitung menggunakan Persamaan (21), dimana $r_2 > r_1$ dan ρ_L adalah muatan per satuan panjang dari silinder. Di dalam silinder, potensialnya sama dengan potensial pada permukaan ($r = r_1$).

Untuk memperoleh persamaan yang menyatakan hubungan antara kuat medan listrik dengan tegangan pada konduktor silinder, maka Persamaan (19) dan (21) disubstitusikan. Persamaan (19) menyatakan bahwa:

$$E_r = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon r} \quad (22)$$

maka

$$\frac{\rho_L}{2\pi\epsilon r} = E_r \cdot r \quad (23)$$

Misalkan titik uji berada pada jarak x dari pusat lingkaran, maka persamaan di atas menjadi:

$$\frac{\rho_L}{2\pi\epsilon r} = E_x \cdot x \quad (24)$$

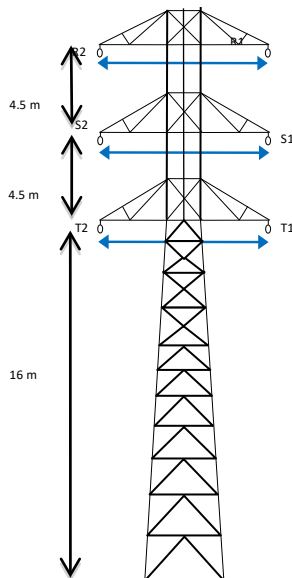
Persamaan (24) ini kemudian disubstitusikan ke Persamaan (21), sehingga diperoleh:

$$V_{21} = E_x \cdot x \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (25)$$

$$E_x = \frac{V_{21}}{x \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (26)$$

Persamaan (26) inilah yang akan digunakan untuk menghitung kuat medan listrik di sekitar konduktor silinder.

Data yang dibutuhkan, antara lain adalah Ketinggian dan Kontruksi Menara sebagaimana terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Konstruksi Menara Transmisi

Data Konduktor Transmisinya adalah : Menara Tipe Saluran ganda, Konduktor Fasa yang digunakan adalah 1 x 240 mm² ACSR (Hawk), dengan GMR sebesar 0,0289 ft (0,0088 m). Sementara konduktor Tanah yang digunakan adalah 1 x 50 mm² GSW, dengan diameter 0,0262 ft (0,008

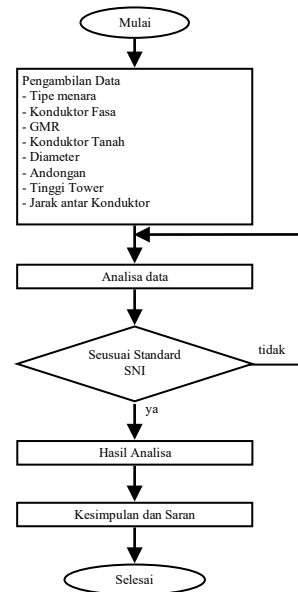
m) dan andongan sebesar 3,5 m. Sedangkan panjang *Cross Arm* nya adalah 6 m, dan ketinggian *Bottom Cross Arm* sebesar 21 m. Jarak antar cros arm adalah 4,5 m. serta panjang rantai isolator 2,5 m.

Selanjutnya, alat Ukur ETS-Lindgren (EMCO) HI-3604 ELF Survey Meter, sebagaimana terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Alat Ukur ETS-Lindgren (EMCO) HI-3604 ELF Survey Meter

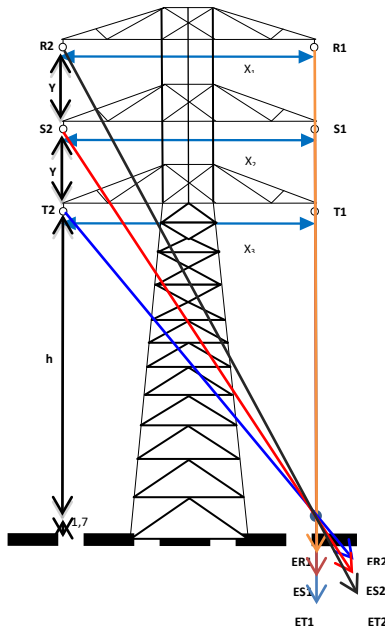
Diagram Alir dari penelitian ini adalah sebagai mana terlihat pada Gambar 10



Gambar 10 Diagram alir

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menghitung kuat medan listrik diasumsikan kedua menara transmisi yang menopang kawat penghantar memiliki ketinggian yang sama serta permukaan tanah di bawah saluran transmisi memiliki kontur yang rata. Sesuai dengan asumsi tersebut, maka titik kritis berada di tengah-tengah saluran (di antara kedua menara).



Gambar 11 Resultan Kuat Medan Listrik pada Tower

- $X_1 = X_2 = X_3 = 6$ m
- $Y = 4,5$ m
- Titik Uji : 1,7 m
- $H =$ (ketinggian bottom cross arm-panjang rantai isolator-andongan-titik uji)
 $= 21$ m - 2,5 m - 3,5 m - 1,7 m = 13,3 m

Karena konstruksi menara yang dipakai adalah tipe ganda, maka ketinggian tiap fasa dari permukaan tanah tidak sama, sehingga :

$$H_R = h + 1,7 = 13,3 + 1,7 = 15 \text{ meter}$$

$$H_S = h + Y + 1 = 13,3 + 4,5 + 1,7 = 19,5 \text{ meter}$$

$$H_T = h + 2Y + 1 = 13,3 + (2 \cdot 4,5) + 1,7 = 24 \text{ meter}$$

Dengan menggunakan persamaan untuk menghitung kuat medan listrik di sekitar konduktor silinder yang telah diturunkan pada bab sebelumnya, maka dapat dihitung kuat medan listrik yang ditimbulkan oleh masing-masing kawat penghantar.

$$V_T = 122,47 \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$V_S = 122,47 \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$V_R = 122,47 \sin(\omega t - 120^\circ)$$

maka :

$$E_{T1} = 1,119 \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$E_{S1} = 0,81 \sin(\omega t)$$

$$E_{R1} = 0,631 \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$E_{T2} = 1,02 \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$E_{S2} = 0,768 \sin(\omega t)$$

$$E_{R2} = 0,61 \sin(\omega t - 120^\circ)$$

Setelah diperoleh komponen kuat medan listrik di sumbu x dan sumbu y, maka masing-masing nilai tersebut dapat dijumlahkan secara aljabar.

$$E(x) = -0,044 \sin \omega t + 0,226 \cos \omega t$$

$$E(y) = -0,096 \sin \omega t + 0,718 \cos \omega t$$

Dengan mengetahui komponen kuat medan listrik di sumbu x dan y, maka kuat medan listrik total di titik P dapat dihitung dengan menjumlahkan kedua komponen kuat medan listrik secara vektoris, yaitu :

$$(E_{tot}) = \sqrt{0,011 \sin^2 \omega t - 0,079 \sin 2\omega t + 0,515 \cos^2 \omega t}$$

$$(E_{tot}) = 0,718$$

Dengan $f = 50$ Hz, $\omega = 2 \pi f$, $t = 0$

Kuat medan listrik total (E_{tot}) yang diperoleh di atas, merupakan fungsi waktu untuk hitungan pada $t = 0$ didapat hasil $E_{tot} = 0,718$. Oleh karena itu, perlu dilakukan pemetaan untuk mengetahui nilai maksimum E_{tot} tersebut. Hal ini dapat dilakukan dengan memanfaatkan program Microsoft Excel.

Tabel 1 Hasil pemetaan E_{tot} terhadap waktu (t)

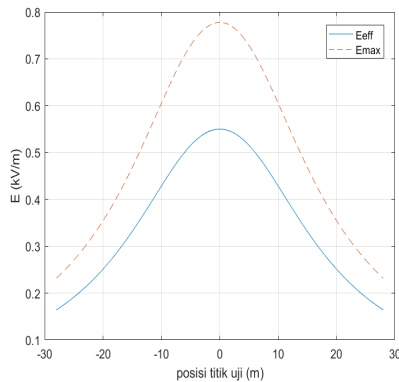
t	E_{tot}
0	0,718
0,001	0,648
0,002	0,515
0,003	0,331
0,004	0,113
0,005	0,104
0,006	0,324
0,007	0,509
0,008	0,644
0,009	0,716
0,010	0,718
0,011	0,649
0,012	0,516
0,013	0,333
0,014	0,114
0,015	0,103
0,016	0,323
0,017	0,509
0,018	0,644
0,019	0,716
0,02	0,718

Dari Tabel 1, kuat medan listrik maksimum (E_{max}) di titik P besarnya adalah 0,718 kV/m. Selain kuat medan listrik maksimum maksimum (E_{max}), diperoleh nilai efektif dari kuat medan listrik di titik P dengan pengintegralan. Sebagai batas integral, dipilih dari nilai 0 sampai 0,02. Hasil pengintegralannya adalah

$$E_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (E_{tot})^2 dt}$$

$$E_{eff} = 0,495 \frac{kV}{m}$$

Perhitungan selengkapnya untuk titik-titik lainnya pada ketinggian 1,7 m dari permukaan tanah dilakukan dengan program MatLab.



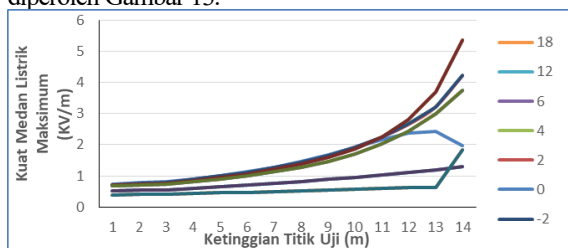
Gambar 12 Kuat medan listrik pada ketinggian titik uji 1,7 m

Dengan memasukkan beberapa koordinat perhitungan sesuai dengan koordinat pengukuran dan parameter-parameter saluran transmisi 150 kV ke dalam program yang telah dibuat maka hasil perhitungan kuat medan listrik untuk Tower 213-214 saluran transmisi Bagan Batu-Duri di sekitar pemukiman rapat penduduk dan dari grafik kuat medan listrik di bawah saluran transmisi untuk ketinggian titik uji yang bervariasi diperoleh Tabel 2.

Tabel 2 Kuat Medan Listrik Berdasarkan Perhitungan di Tower 213-214 dengan MatLab

		Posisi Titik Uji										
		-18	-12	-6	-4	-2	0	2	4	6	12	18
Ketinggian Titik Uji	1	0,386	0,5129	0,666	0,693	0,717	0,724	0,717	0,693	0,666	0,5129	0,386
	1,7	0,4	0,544	0,709	0,742	0,77	0,777	0,77	0,742	0,709	0,544	0,4
	2	0,406	0,556	0,73	0,764	0,794	0,802	0,794	0,764	0,73	0,556	0,406
	3	0,428	0,599	0,806	0,848	0,883	0,893	0,883	0,848	0,806	0,599	0,428
	4	0,45	0,646	0,896	0,946	0,988	1	0,988	0,946	0,896	0,646	0,45
	5	0,473	0,698	1,001	1,063	1,114	1,127	1,114	1,063	1,001	0,698	0,473
	6	0,498	0,755	1,127	1,204	1,263	1,277	1,263	1,204	1,127	0,755	0,498
	7	0,522	0,818	1,28	1,376	1,442	1,456	1,442	1,376	1,28	0,818	0,522
	8	0,548	0,887	1,469	1,591	1,66	1,666	1,66	1,591	1,469	0,887	0,548
	9	0,573	0,96	1,707	1,869	1,924	1,906	1,924	1,869	1,707	0,96	0,573
	10	0,598	1,039	2,018	2,247	2,249	2,163	2,249	2,247	2,018	1,039	0,598
	11	0,622	1,121	2,434	2,799	2,658	2,383	2,658	2,799	2,434	1,121	0,622
	12	0,611	1,2	3	3,697	3,219	2,42	3,219	3,697	3	1,2	0,611
13	18,38	1,284	3,759	5,357	4,223	1,968	4,223	5,357	3,759	1,284	18,38	

Tabel 2 di atas jika digambarkan ke dalam grafik akan diperoleh Gambar 13.



Gambar 13 Kuat medan listrik maksimum di bawah saluran transmisi untuk berbagai ketinggian titik uji

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kuat medan listrik maksimum di bawah saluran transmisi berbeda-beda nilainya tergantung pada : a). Ketinggian titik uji, semakin tinggi titik uji dari permukaan tanah, maka kuat medan listrik maksimumnya akan bertambah besar. Hal ini disebabkan karena jika titik uji semakin tinggi, maka jarak penghantar ke titik uji semakin dekat. Sehingga sesuai dengan rumus untuk menghitung kuat medan listrik yang menyatakan bahwa jarak berbanding terbalik dengan kuat medan listrik, maka semakin dekat jaraknya, kuat medan listriknya semakin besar. b). Posisi titik uji, selain dipengaruhi oleh ketinggian titik uji, kuat medan listrik maksimum di bawah saluran transmisi juga dipengaruhi oleh posisi titik uji. Pada ketinggian titik uji ≤ 13 m, grafik kuat medan listrik menunjukkan bahwa kuat medan listrik berada di sumbu transmisi. Sedangkan pada ketinggian titik uji > 13 m, kuat medan listrik maksimum terjadi pada posisi yang tepat berada di bawah konduktor fasa terluar.

Berdasarkan SNI 04-6950-2003, batas pajanan medan listrik maksimum selama 24 jam/hari untuk masyarakat umum adalah sebesar 5 kV/m. Nilai ini akan terlewati pada ketinggian titik uji 13 m. Oleh karena itu, batas ketinggian maksimum di bawah saluran transmisi adalah < 13 m, misalkan ditentukan 9 m. Artinya, jika di bawah saluran transmisi terdapat bangunan, maka ketinggiannya tidak boleh lebih dari 9 m.

Dari nilai batas ketinggian maksimum ini, dapat dihitung ruang bebas (clearance) vertikal dari saluran transmisi. Caranya adalah: 1). Ketinggian bottom cross arm = 21 m, 2). Panjang rantai isolator = 2,5 m, 3). Andongan maksimum = 3,5 m. Maka jarak konduktor terdekat ke permukaan bumi adalah: $h = 21 - 2,5 - 3,5 = 15$ m. Jika batas ketinggian maksimum ditetapkan adalah 9 m, maka ruang bebas vertikal dari saluran transmisi adalah: $c = h - 9 = 15 - 9 = 6$ m

4. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa kuat medan listrik terendah di posisi titik uji 1 meter vertikal, 18 meter horizontal $E_{min} = 0,386$ kV/m dan kuat medan listrik tertinggi di posisi titik uji 13 meter vertikal, 4 meter horizontal $E_{max} = 5,357$ kV/m, kuat medan listrik maksimum berada di bawah konduktor fasa terluar. Ketinggian maksimum bangunan 9 m dan diperoleh ruang

bebas vertikal (clearance) dari saluran transmisi adalah sebesar 6 m.

Berdasarkan analisa perhitungan tinggi tower 30 meter harus ditambah ketinggiannya menjadi setinggi 32,5 meter agar sesuai standard SNI 04-6918-2002 dengan jarak minimum ruang bebas (clearance) 8,5 meter

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Eteruddin, M. Mutamalikin, and A. Arlenny, "Perencanaan Sistem Distribusi 20 kV Di Sungai Guntung Kabupaten Indragiri Hilir-Riau," *Jurnal Inovasi Penelitian*, vol. 2, no. 6, pp. 1863–1872, 2021.
- [2] H. Eteruddin, D. Setiawan, and P. P. P. Hutagalung, "Evaluasi Jaringan Tegangan Menengah 20 kV Pada Feeder 7 Peranap PT. PLN Persero Rayon Taluk Kuantan," in *Seminar Nasional Pakar*, 2020, pp. 1.4.1-1.4.6.
- [3] A. D. Riva *et al.*, *Riau Regional Energy Outlook 2019*. Jakarta: Kalaka, 2021.
- [4] I. Gunawan, H. Eteruddin, and U. Situmeang, "Analisis Transien Pada Sistem Transmisi 150 kV Riau Setelah Beroperasinya PLTU Tenayan Raya Menggunakan Powerworld Simulator," *Jurnal Teknik*, vol. 14, no. 2, pp. 223–231, 2020.
- [5] H. Hendry, H. Eteruddin, and A. Atmam, "Analysis of Voltage Sag Due to Short Circuit on the Sub System in Central Sumatera," *International Journal of Electrical, Energy and Power System Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 1–5, 2018.
- [6] SK Dir PLN 520, *Buku Pedoman Pemeliharaan Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi (SUTT/SUTET)*. Jakarta: PT. PLN (Persero), 2010.
- [7] H. M. Setiawan and P. A. Yohana, "Metode Pengoperasian Kubikel 24 kV Tipe SM6 Pada Laboratorium Proteksi Dan Distribusi Di Politeknik Negeri Banjarmasin," *Integrated Lab Journal*, vol. 07, no. 02, pp. 68–79, 2019.
- [8] Aslimeri, Ganefri, and Z. Hamdi, *Teknik Transmisi Tenaga Listrik Jilid 2 untuk SMK*. Jakarta: Direktur Pembinaan SMK, 2008.
- [9] A. Arismundar and S. Kuwahara, *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid II: Saluran Transmisi*. Jakarta: Pradnya Paramita, 2004.
- [10] SNI 04-6950, *Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) - Nilai Ambang Batas Medan Listrik dan Medan Magnet*. Jakarta: BSN, 2003.
- [11] W. D. Stevenson Jr, "Analisis Sistem Tenaga Listrik." p. 405, 1994.
- [12] T. S. Hutaauruk, *Transmisi Daya Listrik*. Jakarta: Erlangga, 1985.
- [13] W. Octary, H. Eteruddin, and A. Tanjung, "Susut Tegangan pada Penghantar ACCC di Saluran Transmisi 150 kV di PT. PLN (Persero) Unit Pelayanan Transmisi Pekanbaru," *SainETIn*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2020.
- [14] T. Bonggas, *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 2003.
- [15] J. D. Kraus and K. R. Carver, *Electromagnetics*, 2nd ed. Meksiko: McGraw-Hill, 1981.
- [16] J. Wiliam. Hayt, *Elektromagnetika Teknologi*, 4th ed. Jakarta: Erlangga, 2000.