



Pengaruh Susunan Konduktor pada SUTET

Nizar Rosyidi AS¹, Edy Supriyadi², Sugianto³

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Sains dan Teknologi Nasional Jl. Moh. Kahfi II, Bumi Srengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640, Indonesia.

Email: nizarrosyidias@yahoo.co.id, edy_syadi@istn.ac.id sugiantoistn13@gmail.com

Abstrak

Usaha untuk mengurangi atau meminimalkan medan listrik dan medan magnet, cara yang umum meninggikan jaringan transmisi karena merubah posisi konduktor. Akan tetapi peninggian menara transmisi memiliki batas tertentu karena faktor lingkungan seperti kecepatan angin dan biaya konstruksi yang menjadi lebih mahal. Salah satu pengaruh medan magnet dan kuat medan listrik adalah jarak antar fasanya. Bagaimana penurunan medan listrik dan medan magnet pada SUTET 500 kV dengan metoda perubahan konfigurasi konduktor. Dalam thesis ini dilakukan perhitungan medan listrik dan medan magnet pada konfigurasi horizontal, delta dan vertikal. Selanjutnya dilakukan simulasi dengan perubahan jarak antar fasanya pada ketiga konfigurasi tersebut. Dari hasil perhitungan memperlihatkan bahwa apabila dilakukan perubahan jarak antar fasa dari 12 meter menjadi ke 4,9 meter pada titik tinjau(0), maka kerapatan fluks magnet (B) nya menurun dari $6,83 \cdot 10^{-6}$ tesla menjadi $1,58 \cdot 10^{-6}$ tesla (Konfigurasi Horizontal), pada (konfigurasi Delta) penurunannya dari $5,9 \cdot 10^{-6}$ tesla menjadi $3,87 \cdot 10^{-6}$ tesla, dan untuk (konfigurasi vertikal) penurunannya dari $1,12 \cdot 10^{-5}$ tesla menjadi $6,8 \cdot 10^{-6}$ tesla. Sedangkan dari hasil perhitungan kuat medan listrik (E) dengan merubah jarak antar fasa dari 12 meter menjadi 4,9 meter pada titik tinjau (0), maka terjadi penurunan kuat medan listriknya dari 2,97 (kV/m) menjadi 1,87 (kV/m) dengan (konfigurasi horizontal), penurunan dari 1,82 (kV/m) menjadi 1,36 (kV/m) (konfigurasi vertikal). Begitu juga untuk konfigurasi delta apabila diperpendek jarak antar fasanya, maka nilai kuat medan listriknya menurun dari 0,949 (kV/m) menjadi 0,769 (kV/m). Metoda perhitungan regresi linier pada konfigurasi delta, konfigurasi vertikal, dan horizontal memiliki slope (+) artinya semakin besar jarak antar fasa nilai B dan E meningkat. Hasil plotting kerapatan fluks magnet dengan jarak antar fasa, nilai optimum jarak antar fasanya (δ) 6,7 meter dan kerapatan fluks magnet (B) $8,03 \cdot 10^{-6}$ (Tesla). Sedangkan kuat medan listriknya (E) 2,2 (kV/m). Metoda hasil perhitungan nilai optimum kuat medan listrik dan kerapatan fluks magnet memenuhi standar yang ditetapkan WHO.

Kata kunci: Kuat Medan Listrik, magnet fluks, Jarak antara fasa dan konfigurasi.

Abstract

An effort to reduce or minimise electric field and medan magnet, a common transmission network to turn up for the conductor. But the tower transmission have some extent for environmental factors such as wind speed and construction cost to be more expensive. One of the influence of the strong electric fields magnet and the gap between its phase. How is the field of electricity and medan magnet the sutet 500 kv with this method of change the configuration of a conductor. This thesis is in the field of electricity and the horizontal magnet on the configuration, delta and vertical. The simulation done by the gap between fasanya on the configuration. from the calculation shows that if the distance between the phase changes made from 12 meters to 4.9 meters at the point of the review (0), then the magnetic flux density (B) it decreased from $6.83 \cdot 10^{-6}$ be $1.58 \cdot 10^{-6}$ tesla (horizontal configuration), the (delta configuration) decline of $5.9 \cdot 10^{-6}$ be $3.87 \cdot 10^{-6}$ tesla tesla, and for (vertical configuration) penurunannya of $1.12 \cdot 10^{-5}$ be $6.8 \cdot 10^{-6}$ tesla. While the results of the calculation of the electric field strength (E) by changing the distance between the phase from 12 meters to 4.9 meters at the point of the review (0), then there is a decrease in the electric field strength of 2.97 (kV/m) to 1.87 (kV/m) with (horizontal configuration), a decrease of 1.82 (kV/m) to 1.36 (kV/m) (vertical configuration). Likewise for delta configuration when the shortened distance between its phase, then the value of the electric field strength decreases from 0.949 (kV/m) to 0.769 (kV/m). Methods for calculating the linear regression on the delta configuration, vertical configuration, and horizontal slope (+) means that the greater the distance between the phase value of B and E increases. The resulting plot of magnetic flux density with distance between phases, the optimum value of the distance between the phase (δ) of 6.7 meters and the magnetic flux density (B) $8.03 \cdot 10^{-6}$ (Tesla).

While the electric field strength (E) 2.2 (kV/m). Method optimum value calculation results of electric field strength and magnetic flux density meet the standards set by WHO.

Keywords: strong electric field, magnetic flux density, the distance between the phase and configuration

I. Pendahuluan

Negara Indonesia yang sangat luas menyebabkan jarak antara pusat pembangkit dan pusat beban yang satu dengan yang lain sangat jauh sehingga membutuhkan saluran transmisi yang sangat panjang. Apabila dikaji hal ini akan menjadi suatu masalah karena semakin panjang saluran transmisi yang digunakan untuk mentransmisikan daya listrik maka semakin besar pula rugi daya listrik ($I^2 R$) pada saluran tersebut. Dengan demikian daya yang sampai pada pusat beban telah berkurang sehingga menyebabkan efisiensi rendah dan regulasi tegangan saluran transmisi menjadi tinggi. Untuk menghindari hal tersebut maka salah satu cara yang dilakukan adalah menaikkan tegangan listrik pada saluran menjadi tegangan extra tinggi (EHV) atau tegangan ultra tinggi (UHV). Penggunaan saluran udara tegangan extra tinggi (SUTET) merupakan upaya untuk mengurangi besarnya rugi daya maupun jatuh tegangan dalam saluran transmisi daya listrik dari suatu pusat pembangkit ke pusat beban yang letaknya saling berjauhan, Dengan demikian menaikkan tegangan maka arus yang mengalir menjadi kecil, sehingga rugi karena adanya arus dan tahanan pun menjadi kecil. Akan tetapi selain meningkatkan efisiensi dan menurunkan regulasi tegangan saluran transmisi, penggunaan tegangan extra tinggi juga akan menimbulkan dampak terhadap lingkungan seperti kuat medan listrik dan medan magnet yang tinggi dihasilkan noise akibat corona yang memberikan gangguan komunikasi disekitar kawat konduktor saluran transmisi. Kuat medan listrik yang tinggi disekitar kawat konduktor ini dikhawatirkan akan menimbulkan suatu dampak terhadap kesehatan masyarakat yang berada disekitar saluran transmisi. Oleh karena itu perlu dilakukan usaha-usaha untuk mengurangi atau meminimalkan agar tetap berada dalam batas toleransi keselamatan,kenyamanan maupun

ekonomi. Cara yang dilakukan untuk meminimalkan kuat medan listrik adalah dengan meninggikan jaringan transmisi. Hal ini dapat terjadi karena terjadi perubahan posisi konduktor. Akan tetapi peninggian menara transmisi memiliki batas tertentu karena faktor lingkungan seperti kecepatan angin dan biaya konstruksi yang menjadi lebih mahal. Untuk itu perlu dilakukan penelitian tentang variasi konfigurasi konduktor maupun jarak antar fasanya.

II. Saluran Transmisi

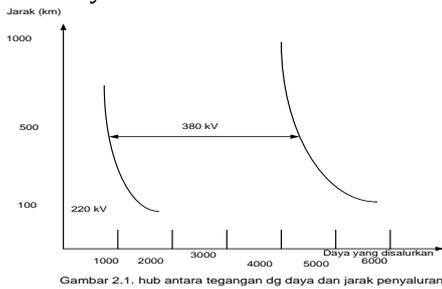
Ada dua jenis saluran transmisi dilihat dari cara penyalurannya yaitu saluran udara dan saluran bawah tanah. Saluran transmisi udara terdiri dari penghantar yang digantung pada tiang-tiang transmisi, dengan perantara isolator-isolator dan kawat pelindung. Disamping saluran tunggal dan saluran ganda. Dalam saluran transmisi udara, dikenal beberapa macam bentuk konfigurasi saluran yaitu: saluran dengan konfigurasi horizontal, saluran dengan konfigurasi vertikal dan saluran dengan konfigurasi delta.

Saluran bawah tanah yang terdiri hanya kabel-kabel yang berisolasi XLPE. Kedua cara penyaluran tersebut mempunyai keuntungan dan kerugian masing-masing. Dibandingkan dengan saluran udara, saluran bawah tanah disamping lebih estetik karena tidak terlihat juga tidak terpengaruh cuaca, putting beliung, hujan, angin dan petir. Namun kerugiannya adalah harganya yang jauh lebih mahal dibanding saluran udara bisa mencapai 3-5 kali lipat dan penanganan terhadap gangguan lebih sulit.[2,4,14].

Pemilihan saluran udara tegangan tinggi pada saluran transmisi dipilih berdasarkan daya yang akan ditransmisikan dan panjang saluran transmisinya. Tingkat-tingkat tegangan yang dipergunakan distandarisasi dimana satu negara berbeda dengan negara lain.

Gambar 2.1 memberikan perkiraan daerah tegangan 220 kV, 380 kV dan 700

kV dikaitkan dengan besarnya daya yang disalurkan dan panjang jarak penyalurannya.



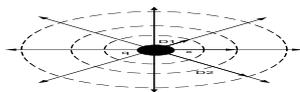
Gambar 1. Perkiraan Daerah Tegangan 220 Kv, 380 Kv Dan 700Kv

II.1. Kapasitansi Saluran Transmisi [2,4,8,14]

Kapasitansi suatu saluran transmisi adalah akibat beda potensial antar penghantar. kapasitansi menyebabkan penghantar tersebut bermuatan sebagaimana terjadi pada pelat kapasitor bila terjadi beda potensial diantaranya. Kapasitansi saluran transmisi muncul karena perbedaan tegangan diantara penghantar-penghantar saluran. Nilai kapasitansi antar penghantar ditentukan oleh ukuran, spacing dan ketinggian diatas tanah.

$$C = \frac{q}{V} \dots \dots \dots (2.1)$$

Pada gambar dibawah penghantar bulat dengan jari-jari r membawa muatan sebesar q coulomb per meter seperti Gambar 2



Gambar 2. Garis Fluk Pada Penghantar Silinder Bulat.

Adapun kerapatan fluks listrik D pada radius sejauh x adalah ditetapkan dengan rumus 2.2 :

$$D = \frac{q}{A} = \frac{q}{2\pi x} (C/m^2) \dots \dots \dots (2.2)$$

Intensitas medan listrik E yang ditimbulkan adalah ;

$$E = \frac{D}{\epsilon_0} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 x} V/m \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana ϵ_0 adalah permisivitas ruang hampa = $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Beda potensial diantara jari-jari D_1 dan jari- jari D_2 adalah

$$V_{12} = \int_{D_1}^{D_2} E dx = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 x} dx$$

$$= \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_2}{D_1} \dots \dots \dots (2.4)$$

II.2. Kapasitansi Saluran Satu Fasa

Saluran satu fasa yang terdiri dari 2 penghantar masing-masing dengan radius r dan berjarak D, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Saluran Satu Fasa 2 Penghantar

Pada gambar 3 memperlihatkan konfigurasi saluran fasa satu dengan 2 penghantar. Jika penghantar 1 bermuatan q_1 dan penghantar 2 bermuatan q_2 maka beda potensial yang dibangkitkan pada penghantar q_2 terhadap q_1 adalah :

$$V_{21(q2)} = \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$V_{12(q2)} = V_{21(q2)} = \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{D} \dots \dots \dots (2.6)$$

Berdasarkan prinsip super posisi maka besar beda potensial menjadi :

$$V_{12} = V_{12(q1)} + V_{12(q2)} = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{D} \dots \dots \dots (2.7)$$

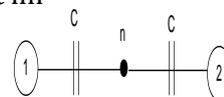
Jika $q_2 = -q_1 = -q$, maka

$$V_{12} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} \dots \dots \dots (2.8)$$

sehingga besar nilai Kapasitansi sebesar

$$C_{12} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} (F/m) \dots \dots \dots (2.9)$$

Untuk pemodelan saluran transmisi, diperlukan juga kapasitansi saluran ke tanah, seperti diperlihatkan pada Gambar 4 berikut ini



Gambar 4. Saluran Satu Fasa Dua Penghantar Teg Thd Netral

Tegangan ke netral pada penghantar fasa satu diatas adalah setengah dari V_{12} . maka besar kapasitansi ke netral adalah

$$C_{12} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \text{ (}\mu\text{F/m)} \dots\dots\dots(2.10)$$

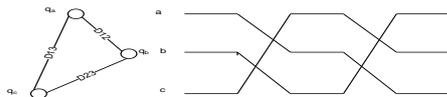
Beda potensial pada konfigurasi multi konduktor dengan anggapan $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = 0$, maka berdasarkan superposisi penentuan beda potensial antara penghantar i dan j didalam susunan multi konduktor tersebut adalah:

$$V_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=i}^n q_k \ln \frac{D_{kj}}{D_{ki}} \dots\dots\dots(2.11)$$

Ketika $k = i$, D_{ii} adalah jarak antara permukaan penghantar dan pusatnya atau biasa disebut radius r .

II.3. Kapasitansi Saluran Tiga Fasa

Saluran tiga fasa dengan penghantar a,b dan c sepanjang satu meter yang disusun seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Superposisi

Pada sistem tiga fasa seimbang, maka penjumlahan $q_a + q_b + q_c = 0$

Karena saluran ditransposisikan, maka nilai rata-rata V_{ab} adalah :

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left\{ q_a \ln \frac{(D_{12}D_{23}D_{13})^{1/3}}{r} + q_b \ln \frac{r}{(D_{12}D_{23}D_{13})^{1/3}} \right\} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$GMD = \sqrt[3]{(D_{12}D_{23}D_{13})}$$

Maka

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left\{ q_a \ln \frac{GMD}{r} + q_b \ln \frac{r}{GMD} \right\} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dengan cara yang sama

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left\{ q_a \ln \frac{GMD}{r} + q_c \ln \frac{r}{GMD} \right\} \dots\dots\dots(2.14)$$

Apabila 2 persamaan terakhir dijumlahkan, dan subsitusikan $q_a + q_b = -q_c$ maka :

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left\{ 2q_a \ln \frac{GMD}{r} - q_a \ln \frac{r}{GMD} \right\} = \frac{3q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{GMD}{r} \dots\dots\dots(2.15)$$

Pada sistem tiga fasa seimbang,

$$V_{ab} = V_{an} \ 0^\circ - V_{bn} \ -120^\circ$$

$$V_{ac} = V_{an} \ 0^\circ - V_{cn} \ -240^\circ$$

Berarti $V_{ab} + V_{ac} = 3 V_{an}$ atau $V_{an} = \frac{V_{ab} + V_{ac}}{3} = \frac{q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{GMD}{r}$

$$C = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r}} \text{ (F/m)} \dots\dots\dots(2.16)$$

Maka kapasitansi ke netral perfasa adalah

$$C = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r}} \text{ (F/m)} \dots\dots\dots(2.16)$$

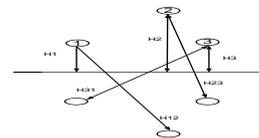
II.4. Pengaruh Konduktor Bundel

Kapasitansi penghantar untuk bundel dinyatakan dengan persamaan diatas (persamaan 2.16) dengan cara merubah r menjadi radius ekivalent berkas GMR, adapun jumlah susunan berkas disesuaikan dengan susunan berkas 2 penghantar 3 atau 4.

II.5. Pengaruh Bumi terhadap Kapasitansi Saluran

Pada konduktor yang membawa muatan terisolasi garis-garis fluks listrik akan radial dan ortogonal terhadap permukaan silindris disekitar. Namun bila penghantar berada diatas permukaan bumi, maka distribusi garis fluks listrik tersebut akan berubah, yang pada gilirannya akan berubah kapasitansi efektif saluran. Dengan menggunakan metoda muatan bayangan seperti terlihat pada Gambar 6 besar kapasitansi perfasa ke netral adalah:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r} - \ln \left\{ \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{H_1H_2H_3}} \right\}} \dots\dots\dots(2.17)$$



Gambar 6. Metode Muatan Bayangan

Jarak konduktor 1 terhadap bumi adalah H_1 , sedangkan jarak konduktor 1 terhadap bayangan adalah H_1^1 . H_2 Jarak konduktor 2 terhadap bumi, H_2^1 jarak konduktor 2 terhadap bayangannya dan H_3 Jarak konduktor 3 terhadap bumi, H_3^1 jarak konduktor 3 terhadap bayangannya. H_{12} adalah jarak konduktor 1 terhadap

bayangan konduktor 2, H_{23} jarak konduktor 2 terhadap bayangan konduktor 3 dan H_{31} adalah jarak konduktor 1 terhadap bayangan konduktor 3.

II.6. Jarak Antar Konduktor.

Jarak antar konduktor dipengaruhi beberapa hal, mekanis dari konduktor, material dan diameter konduktor harus diperhatikan dalam perhitungan karena untuk konduktor yang kecil dengan span yang panjang, khusus yang terbuat dari almunium, memiliki berat lebih ringan, sehingga jika terdapat angin akan lebih mengayun secara vertikal dibandingkan dengan konduktor luas penampang yang lebih besar dan berat. Ukuran konduktor dan andongan maksimum pada titik tengah span adalah faktor yang harus diperhitungkan dalam menentukan jarak antar konduktor.

Ada beberapa rumus empiris yang akan digunakan untuk menghitung jarak minimum antar kawat konduktor, diantaranya adalah perhitungan menurut Voorschricften Voor den Aan leg van Buitenleidingen (VAB) rumusnya adalah :

$$\delta = k \sqrt{b + l_k} + \frac{U_n}{150} \dots\dots\dots(2.18)$$

Verbandes Deutscher Electrotechnicher (VDE) .rumusnya adalah :

$$\delta = \frac{6D}{g} b + \frac{U_n}{150} \dots\dots\dots (2.19)$$

Midlands Electric (ME) rumusnya adalah :

$$\delta = 0,65 \times d \dots\dots\dots(2.20)$$

National Electric Safety Code (NESC) rumusnya adalah :

$$\delta = 0,3/kV + 8 \times \sqrt{\frac{d}{12}} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana :

δ = jarak antar kawat konduktor di andongan terendah (m)

k = faktor ayun tergantung angin dan diameter kawat u/datar 0,7 -0,6; untuk vertikal 0,95 - 0,7.

b = panjang andongan (m)

l_k = panjang renteng isolator (m)

U_n = tegangan nominal antar kawat (kV)

D = diameter kawat

g = berat konduktor.

II.7. Konduktor Berkas

Pada tegangan ekstra tinggi yaitu tegangan diatas 230 kV, akan terjadi corona yang akibatnya yaitu berupa rugi-rugi daya dan timbulnya interferensi dengan saluran komunikasi akan menjadi sangat berlebihan, jika rangkaiannya saluran hanya mempunyai penghantar per fasa. Dengan menggunakan dua penghantar atau lebih perfasa yang disusun berdekatan dibandingkan dengan jarak pemisah antara fasa-fasanya, maka gradient tegangan tinggi pada penghantar dalam daerah EHV dapat banyak dikurangi. Saluran semacam ini dikatakan sebagai tersusun dari Konduktor berkas (bundled conductors). Berkas ini dapat terdiri dari dua, tiga atau empat penghantar. Berkas tiga penghantar biasanya menempatkan penghantar- penghantarnya pada sudut-sudut suatu segi tiga sama sisi. Sedangkan berkas empat penghantar menempatkan penghantar-penghantarnya pada sudut-sudut suatu bujur sangkar dengan jarak d. Dimana d merupakan jarak antar sub konduktor. Gambar 9. menunjukkan susunan-susunan semacam itu



Gambar 9. Susunan Berkas Penghantar (A) Dua Penghantar (B) Tiga Penghantar (C) Empat Penghantar

Arus tidak akan terbagi rata dengan tepat antara penghantar-penghantar dalam berkas, jika tidak dilakukan transposisi penghantar-penghantar. Metode GMD sudah cukup teliti untuk perhitungan-perhitungan.

Keuntungan lain yang sama pentingnya diperoleh dari pemberkasan ialah penurunan reaktansi. Peningkatan jumlah penghantar dalam suatu berkas mengurangi efek corona dan mengurangi efek reaktansi. Pengurangan reaktansi disebabkan oleh kenaikan GMR berkas yang bersangkutan. Perhitungan GMR sudah tentu tepat sama dengan perhitungan untuk penghantar berupa lilitan. Masing-masing penghantar pada berkas dua penghantar dapat diperlakukan sebagai sebuah serat atau lilitan suatu penghantar dua lilitan. GMR dari suatu konduktor berkas dimana sub

konduktor mempunyai jarak- jarak yang sama dan terletak pada suatu lingkaran dengan radius r, dapat diturunkan sebagai berikut.

- a. Bila jumlah sub konduktor 2 jadi n = 2

$$\text{GMR atau } D_s^b = \sqrt[4]{(r \times d)^2} = \sqrt{r \times d} \dots\dots\dots(2.22)$$

- b. Bila jumlah sub konduktor 3 jadi n = 3

$$\text{GMR atau } D_s^b = \sqrt[9]{(r \times d \times d)^3} \dots\dots\dots(2.23)$$

- c. Bila jumlah sub konduktor 4 jadi n = 4

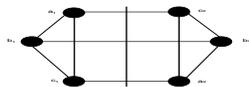
$$\text{GMR atau } D_s^b = \sqrt[16]{(r \times d \times d \times d \times d \times 2^{\frac{1}{2}})^4} = 1,09 \sqrt[4]{r \times d^3} \dots\dots\dots(2.24)$$

Dimana r merupakan jari -jari konduktor dan d jarak antar sub konduktor

II.8. Saluran Tiga – Fasa Rangkaian Paralel

II.8.1.GMD dan GMR Sirkuit ganda

Tinjauan sebuah rangkaian tiga fasa sistim sirkit ganda dengan konfigurasi seperti Gambar 10 dibawah ini



Gambar 10. Sirkuit Ganda Transposisi

Rangkaian beroperasi dengan konfigurasi a₁-a₂, b₁-b₂ dan c₁- c₂ paralel, susunan rangkaian konfigurasi geometris tidak simetris, maka dilakukan transposisi masing-masing kawat fasa dalam kelompoknya. Untuk GMD dan GMD ekuivalent perfasa adalah :

GMD ekuivalent sirkuit adalah :

$$\text{GMD} = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ac}}$$

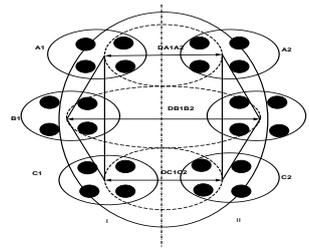
Untuk radius efektif (GMR) untuk masing masing kawat fasa D_s, maka GMR untuk masing fasa

GMR ekuivalent :

$$\text{GMR} = \sqrt[3]{D_{sa}D_{sb}D_{sc}}$$

II.9. GMD & GMR untuk Sirkuit Ganda dengan 4 Bundel Konduktor.

Dalam perhitungan GMD dan GMR untuk rangkaian tiga fasa sirkuit ganda dengan 4 bundel konduktor seperti Gambar 11 dibawah.



Gambar 11. Konfigurasi Konduktor Bundel Sirkuit Ganda

Rangkaian beroper 121asi dengan konfigurasi A1-A2, B1-B2 dan C1-C2 paralel. Susunan rangkaian konfigurasi geometri tidak simetris, maka dilakukan transposisi masing-masing kawat fasa dalam kelompoknya. Untuk melakukan perhitungan GMD dan GMR pada sirkuit ganda dengan konduktor 4 bandel berkas diasumsikan bahwa :

GMR fasa = D_{sa1}^b = D_{sa2}^b = D_{sb1}^b = D_{sb2}^b = D_{sc1}^b = D_{sc2}^b, dinamakan D_s^b sedangkan jarak antara konduktor berkas D_{A1A2} = D_{A2A1} , D_{B1B2} = D_{B2B1} dan D_{C1C2} = D_{C2C1}, masing-masing menjadi D_a, D_b dan D_c maka GMR ekuivalent masing-masing fasa, dapat diturunkan sebagai berikut :

Maka GMR ekuivalent :

$$D_e^b = \sqrt[3]{D_s A^b \cdot D_s B^b \cdot D_s C^b}$$

GMD ekuivalent perfasa adalah :

Maka GMD ekuivalent sirkuit :

$$\text{GMD} = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{AC}}$$

III. Medan Listrik dan Medan Magnit di Permukaan Tanah

Medan listrik dan medan magnit merupakan dua masalah yang sangat penting karena langsung berkaitan dengan keselamatan dan kesehatan mahluk hidup yang ada dipermukaan tanah dibawah saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET). Sebelum suatu saluran transmisi dirancang, haruslah diyakinkan terlebih dahulu bahwa radiasi medan listrik dan medan magnit serta rapat arus dipermukaan tanah tidak melebihi batas yang bisa mengganggu kesehatan mahluk hidup dibawahnya. Batas aman dari medan listrik dan medan maknit serta rapat arus bagi mahluk hidup diberikan

oleh organisasi kesehatan dunia WHO ditunjukkan pada tabel 3.1. Dalam tabel ini dibedakan antara pekerja yang

mungkin hanya sebentar terpapar radiasi dan masyarakat umum terutama yang bertempat tinggal dibawahnya.

Tabel 1. Standar Medan Listrik dan Medan Magnet

No	Klasifikasi	Medan Listrik(kV/m)	Medan magnet (μT)	Rapat Arus (I)(mA/m ²)
1	Lingkungan Kerja :Sepanjang hari kerja.dan waktu singkat s/d 2 jam perhari	10	500	10
2	Lingkungan Umum : Sampai 24 jam per hari	5	100	2

III.1 Medan Listrik.

Menurut hukum coulomb, suatu muatan listrik akan menghasilkan medan listrik di titik-titik sekitarnya. Medan listrik merupakan besarnya gaya yang akan dialami oleh setiap coulomb muatan yang ditempatkan dititik tersebut. Untuk muatan titik, besar medan listrik akan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dari muatan penyebabnya. Sedangkan untuk muatan garis dengan rapat muatan persatuan panjang ρL seperti pada kawat transmisi, besar medan listrik pada jarak R dari muatan dirumuskan sebagai berikut :

$$E_R = \frac{\rho l}{2\pi\epsilon_0 R} a_R \dots \dots \dots (3.1)$$

Dengan ε₀ adalah permisivitas ruang hampa atau udara. a_R vektor satuan. Nilai rapat muatan per satuan panjang dapat diperoleh jika diketahui kapasitansi saluran panjang C dan tegangan saluran ke tanah V_{LN}, yaitu melalui hubungan

$$\rho L = C V \dots \dots \dots (3.2)$$

Untuk saluran transmisi 3 fasa dengan konduktor tunggal, nilai kapasitansi ke tanah dihitung dengan rumus :

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right)} \dots \dots \dots (3.3)$$

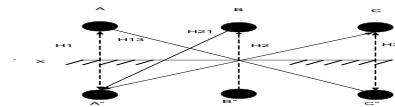
Dengan D_{eq} adalah jarak antar konduktor fasa ekivalent

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$$

Dengan D_{ij} adalah jarak antar fasa untuk konduktor berkas, nilai jari-jari r dirubah dengan D_b. Untuk berkas dengan 4 sub konduktor D_b = 1,09⁴rd₃, maka untuk memperhitungkan pengaruh tanah terhadap kapasitansi, persamaan menjadi

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) - \ln\left(\frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{32}}}{\sqrt[3]{H_1H_2H_3}}\right)} \dots \dots \dots (3.4)$$

Dengan H_{ij} adalah jarak kawat fasa i kebayangan fasa ke j seperti ditunjukkan pada Gambar 3 berikut :



Gambar 12. Saluran Tiga Fasa Dengan Bayangan

Perhitungan medan listrik dipermukaan tanah menggunakan persamaan 3.1 akan menghasilkan arah medan yang tidak tegak lurus dengan tanah, padahal permukaan tanah merupakan bidang equipotensial yang memberikan konsekwensi tegak lurusnya arah medan listrik. Untuk memperhitungkan hal tersebut diterapkan metode cermin yang menghilangkan komponen horizontal medan listrik dan mengalikan dua komponen vertikalnya. Jadi besar kuat medan dipermukaan tanah adalah sebesar dua kali komponen vertikalnya.

III.2 Medan Magnit

Medan magnet timbul dari gerakan muatan listrik seperti arus listrik. Medan magnet dipengaruhi gerakan dari perpindahan muatan. kekuatannya diukur dalam satuan amper per meter (A/m) tetapi dinyatakan dalam istilah yang sama dengan induksi magnetik yang terukur dalam satuan tesla (T), milli tesla (mT) atau mikro tesla (μT). Di beberapa negara dinyatakan dalam gauss (G) untuk menyatakan induksi magnetik, (10.000 G) = 1 T ; 1 G = 100 μT ; 1mT = 10 G ; 1 μT = 10 mG). Peralatan yang dihubungkan dengan saluran listrik, ketika peralatan dinyalakan dan ada arus mengalir, akan mempunyai sekawan medan magnet yang sebanding dengan arus yang mengalir dari sumber menuju

peralatan yang terhubung. Medan magnet terbesar terletak dekat dengan peralatan dan akan berkurang sesuai dengan jarak. Medan magnet tidak bisa terhalang oleh material biasa karena dapat melewati material tersebut dengan mudah. Secara alamiah tigitatan medan listrik dan medan magnet mempunyai frekuensi 50-60 Hz adalah sangat rendah, masing –masing antara 0,0001 V/m dan 0,00001 μT. Tempat yang tidak terlindungi oleh medan ELF yang terutama adalah yang berhubungan pembangkitan, transmisi dan penggunaan energi listrik. Sumber dan batas medan ELF yang lebih tinggi ditemukan dalam lingkungan masyarakat. Energi listrik dari pusat pembangkit didistribusikan kemasyarakat melalui saluran transmisi tegangan tinggi. Saluran udara tegangan ekstra tinggi perlu diperhatikan sebelum dioperasikan agar tidak melampaui standard World Health Organization (WHO) yang telah menetapkan batas kuat medan magnet yang diizinkan. Kuat medan magnet yang diizinkan WHO adalah sebesar 500 μT untuk lingkungan kerja sepanjang hari kerja dan 100 μT bagi masyarakat umum yang menetap tinggal dibawah saluran udara tegangan ekstra tinggi.

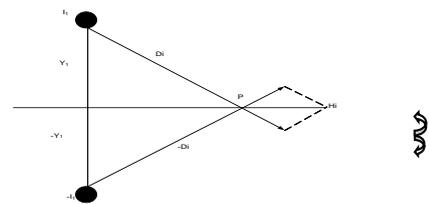
III.3. Intensitas Medan Magnet dengan Metoda Bayangan.

Perhitungan Intensitas dan kerapatan fluks magnet dapat dihitung melalui metoda bayangan. Bumi akan berpengaruh terhadap intensitas medan magnet yang dihasilkan oleh saluran transmisi. Apabila suatu penghantar diatas permukaan bumi dialiri arus listrik, maka akan dibangkitkan medan magnet pada penghantar tersebut . Dalam hal ini bumi merupakan penghantar, medan listrik tegak lurus permukaan penghantar dan medan magnet berpotongan saling tegak lurus terhadap medan listrik. Jika bumi dimisalkan sebagai suatu plat penghantar yang luasnya tak terhingga, maka medan magnet akan dipaksa menyesuaikan dengan bumi. Suatu penghantar khayal yang identik dengan penghantar aslinya dan mempunyai jarak yang sama dengan penghantar asli terhadap bumi. Akan tetapi letak penghantar khayal tersebut dipihak yang

berlawanan dengan penghantar asli. Jadi untuk perhitungan intensitas medan magnet disekitar saluran transmisi, bumi dapat digantikan dengan penghantar khayal yang mempunyai muatan berlawanan.

Pada Gambar 13. Terdapat penghantar dan bumi yang digantikan dengan penghantar khayal. Jarak penghantar asli terhadap bumi adalah Y_i begitu juga jarak penghantar khayal terhadap bumi adalah $-Y_i$. Kemudian terdapat titik P yang berjarak (D_i) terhadap penghantar asli dan berjarak ($-D_i$) terhadap penghantar khayal. Maka intensitas medan magnet pada titik P adalah jumlah intensitas medan magnet yang ditimbulkan oleh masing-masing arus pada penghantar asli dan penghantar khayal. Jika arus pada penghantar asli adalah I_i dan arus pada penghantar khayal adalah $-I_i$, maka intensitas medan magnet di titik P adalah :

$$H_{res} = \frac{I_i}{2\pi D_i} + \frac{(-I_i)}{2\pi D_i} \dots\dots\dots(3.1)$$



Gambar 13. Medan Magnet Yang Ditimbulkan Arus (I_i) Dan Bayangan

Dengan I_i adalah arus untuk penghantar ke $-i$. Untuk arus tiga fasa adalah arus pada tiap penghantar fasanya, bila besar arus dilambangkan dengan I dan masing – masing mempunyai perbedaan sudut fasa 120° , maka masing – masing I akan sesuai dengan persamaan :

$$I = I (\cos \theta + j \sin \theta) \dots\dots\dots(3.2)$$

Sehingga :

$$I_A = I \ 0^\circ \dots\dots\dots(3.3)$$

$$I_B = I \ 120^\circ \dots\dots\dots(3.4)$$

$$I_C = I \ 240^\circ \dots\dots\dots(3.5)$$

Dari gambar diatas dapat diketahui bahwa jarak titik P terhadap penghantar asli adalah D_i yaitu :

$$D_i^2 = X_i^2 + Y_i^2 \dots\dots\dots(3.6)$$

Sehingga medan magnet akibat penghantar asli :

$$H_i = \left(\frac{Ii}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{Di}\right) (J) \dots\dots\dots(3.7)$$

$$H_i = \left(\frac{Ii}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{Di}\right) (-J)(\cos \theta + j \sin \theta) \dots\dots(3.8)$$

$$H_i = \left(\frac{Ii}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{Di}\right) (-J \cos \theta + \sin \theta) \dots\dots\dots(3.9)$$

Komponen horizontal :

$$H_i = \left(\frac{Ii}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{Di}\right) (\sin \theta) \dots\dots\dots(3.10)$$

Sedangkan jarak titik P terhadap penghantar khayal sesuai dengan persamaan :

$$D_i'^2 = X_i^2 + (-Y_i) \dots\dots\dots(3.11)$$

Maka medan magnet akibat penghantar khayal :

$$H_i' = \left(\frac{-Ii}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{Di'}\right) (-J) \dots\dots\dots(3.12)$$

$$H_i' = \left(\frac{Ii}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{Di'}\right) (J)(\cos \theta' + J \sin \theta') \dots\dots(3.13)$$

$$H_i' = \left(\frac{Ii}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{Di'}\right) (J \cos \theta' - \sin \theta') \dots\dots(3.14)$$

Komponen horizontal :

$$H_i' = \left(\frac{Ii}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{Di'}\right) (\sin \theta') \dots\dots\dots(3.15)$$

Jadi, Intensitas medan magnet akibat penghantar asli dan penghantar khayal didapat :

$$H_i \text{ hor} = \left(\frac{Ii}{2\pi}\right) \left[\frac{1}{Di} \sin \theta - \frac{1}{Di'} \sin \theta'\right] \dots\dots(3.16)$$

$$H_i \text{ hor} = \left(\frac{Ii}{2\pi}\right) \left[\frac{Yi}{Di \cdot Di} - \frac{(-Yi)}{Di' \cdot Di'}\right] \dots\dots\dots(3.17)$$

$$H_i \text{ hor} = \left(\frac{Ii}{2\pi}\right) \left[\frac{Yi}{Di^2} + \frac{Yi}{Di'^2}\right] \dots\dots\dots(3.18)$$

Sesuai dengan persamaan (3.6) dan (3.11) bahwa :

$$D_i^2 = X_i^2 + Y_i^2$$

$$D_i'^2 = X_i^2 + (-Y_i)^2$$

Maka persamaan (3.18) diatas menjadi :

$$H_i = \left(\frac{Ii}{2\pi}\right) \left[\frac{Yi}{X_i^2 + Y_i^2} + \frac{Yi}{X_i^2 + (-Y_i)^2}\right] \dots\dots(3.19)$$

Dengan demikian untuk menghitung Intensitas medan magnet diatas permukaan tanah dapat digunakan persamaan :

$$H_i = \left(\frac{Ii}{2\pi}\right) \left[\frac{2Yi}{X_i^2 + Y_i^2}\right] \dots\dots\dots(3.20)$$

Dengan :

H = Intensitas Medan Magnet (A/m)

i = penghantar

Y = Jarak penghantar dari permukaan tanah (m)

X = Jarak penghantar terhadap titik acuan (m)

Intensitas medan magnet total dapat diperoleh dengan menjumlahkan medan magnet yang ditimbulkan oleh masing-masing fasanya yaitu :

$$H_{\text{total}} : H_1 + H_2 + H_3 \dots\dots\dots(3.21)$$

H_{total} merupakan bilangan kompleks yang terdiri dari bilangan riil dan imajiner.

$$H_{\text{total}} : H + jH \dots\dots\dots(3.22)$$

$$H = \sqrt{H^2 + j H^2} \dots\dots\dots(3.23)$$

Dan kerapatan fluxs magnet (B) pada titik tersebut dapat dihitung sebagai berikut :

$$B = \mu_0 \cdot H \cdot 10^{-3} \text{ (m tesla)} \dots\dots\dots(3.24)$$

Dengan :

$$\mu_0 = \text{konstanta permeabilitas} = 4\pi\epsilon_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (T m/A)}$$

H = Intensitas medan magnet (A/m)

IV. Perhitungan Medan Listrik dan Magnet serta Analisa

Untuk menganalisa pengaruh konfigurasi saluran udara tegangan ekstra tinggi terhadap medan listrik dan medan magnet akan dilakukan perhitungan dibawah saluran udara transmisi tegangan ekstra tinggi pada permukaan tanah yang telah ditetapkan setiap titik tinjauannya. Selanjutnya hasil perhitungan dianalisa dan dibandingkan dengan standar nilai batas yang telah ditetapkan oleh World Health Organization (WHO). Sedangkan perhitungannya menggunakan persamaan persamaan rumus yang telah ditulis pada bab sebelumnya.

Untuk mempermudah perhitungan kuat medan listrik (E) dan kerapatan fluks magnet (B) dibuat suatu rancangan simulasi. Secara sederhana urutan proses perhitungan dapat dijabarkan sebagai berikut :

Tahap pertama adalah proses perhitungan andongan dan jarak antar fasa konduktor dengan empat formula yaitu Voorschfricten Voor den Aan leg van

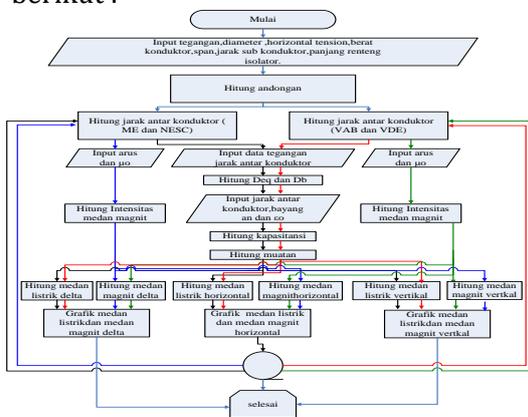
Buitenleidingen (VAB), Verbandes Deutscher Electrotechnicher (VDE), Midlands Electric (ME) dan National Electric Safety Code (NESC) serta ditambah tiga perubahan jarak antar fasa, sehingga menjadi 7 jenis variasi perubahan jarak antar fasanya.

Tahap kedua merupakan inti yaitu perhitungan kuat medan listrik dan kerapatan fluxs magnet.

Tahap ketiga membandingkan hasil perhitungan dengan berbagai konfigurasi konduktor dan dengan melakukan perubahan jarak antar fasa nya.

Tahap ke empat sebagai tujuan penelitian diteliti pada thesis ini dengan analisa dari berbagai macam konfigurasi konduktor serta dengan melakukan perubahan jarak antar fasanya, sehingga dapat dipilih konfigurasi konduktor yang dapat menurunkan medan listrik dan medan magnet .

Sebelum membuat rancangan simulasi terlebih dahulu dibuat algoritma dan flowchart agar alur program perhitungan menjadi lebih jelas dan terstruktur dengan baik. Algoritma program untuk berbagai konfigurasi konduktor diperlihatkan pada Gambar 14 berikut :



Gambar 14. Diagram Alir perhitungan Medan Listrik dan Madan Magnet

Adapun langkah-langkahnya sebagai berikut :

1. Mulai,
2. Pemasukkan data tegangan, diameter dan panjang konduktor, horizontal tension, berat konduktor, panjang renteng isolator faktor ayunan,
3. Perhitungan andongan (d),

4. Perhitungan jarak konduktor menurut ME, NESC, VAB dan VDE,
5. Masukkan data tegangan,
6. Perhitungam deq,
7. Perhitungan D_b berkas atau GMR,
8. Pemasukkan data jarak antar konduktor dengan bayangan dan nilai ϵ_0 ,
9. Perhitung kapasitansi,
10. Perhitungan muatan,
11. Perhitungan medan listrik pada permukaan tanah sebanyak 16 titik ke kiri dan 16 titik kekanan (0) sebagai titik koordinat dengan konfigurasi horizontal, delta dan vertikal,
12. Pemasukkan nilai arus, nilai μ_0 ,
13. Perhitungan Intensitas medan magnet (H),
14. Perhitungan kerapatan fluxs magnet,
15. Kembali ke point 4 menghitung medan listrik, intensitas medan magnet dan kerapatan fluxs magnet konfigurasi delta dan vertikal,
16. Penggambaran grafik medan listrik dan medan magnet
17. Selesai.

IV.1. Perhitungan Kerapatan Fluxs Magnet (B) dan Kuat Medan Listrik (E)

Sebelum menghitung kerapatan fluxs magnet (B) akan dihitung terlebih dahulu besarnya intensitas medan magnet (H) dan kuat medan listrik (E) pada permukaan tanah dibawah saluran udara tegangan ekstra tinggi 500 kV. Adapun jenis konfigurasi yang akan dihitung adalah konfigurasi sirkit tunggal horizontal, delta dan vertikal. Ketiga konfigurasi konduktor tersebut yang umum digunakan, dengan susunan empat berkas konduktor. Dalam perhitungan ini diambil asumsi-asumsi bahwa tanah dianggap datar dan jaringan dianggap beroperasi normal .

IV.2 Pada Konfigurasi Konduktor Horizontal.

Sebelum melakukan perhitungan sebagai ilustrasi berikut ini diberikan suatu jaringan transmisi udara tegangan ekstra tinggi 500 kV dengan konfigurasi horizontal seperti Gambar 15. Sirkit tunggal digunakan empat berkas

konduktor setiap fasanya dengan data-data saluran sebagai berikut :

- ❖ Tegangan fasa ke fasa = 500 kV
- ❖ Arus yang mengalir pada konduktor 1000 Amper
- ❖ Jarak konduktor terendah ke permukaan tanah = 18 meter
- ❖ Jenis conductor Alluminium Conductor Steel Reinforce (ACSR)
- ❖ Diameter = 25,76 mm
- ❖ Horizontal tension = 2372,3 Kg/cm²
- ❖ Jarak antar tiang transmisi = 450 m
- ❖ Panjang isolator = 5,5 m
- ❖ Jarak antar sub konduktor = 0,25 m

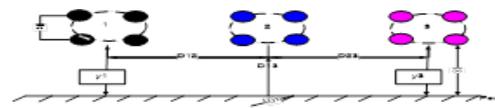
Jenis ACSR merupakan salah satu rekomendasi standart IEC maupun ANSI, karena mempunyai daya hantar listrik yang sangat baik, berat jenis sangat ringan dibandingkan dengan konduktor lain, mempunyai kekuatan tarik mekanik yang baik dan biaya lebih murah bila dibandingkan tembaga.

Pada perhitungan kerapatan fluks magnet (B) dan kuat medan listrik (E) dengan konfigurasi horizontal sirkuit tunggal, sebelum melakukan perhitungan kerapatan fluks magnet (B) dan kuat medan listrik (E) akan dilakukan perhitungan jarak antar fasanya dengan menggunakan persamaan (2.18), (2.19), (2.20) dan (2.21) yang hasilnya masing-masing untuk (Midlands Electric =9,765 meter), (NESC = 8,952 meter), (VAB = 6,5 meter) dan (VDE = 4,9 meter). Pada penelitian ini selain perhitungan jarak antar fasanya dengan menggunakan persamaan tersebut diatas, akan dilakukan perubahan jarak antar fasanya menjadi 12 meter, 11 meter dan 10 meter, sehingga variasi perubahan jarak antar fasanya menjadi 7 jenis jarak antar fasanya.

Salah satu hasil perhitungan jarak antar fasanya menurut formula Midlands Electric (ME), maka jarak tiap penghantar fasa 1, fasa 2 dan fasa 3 ke permukaan tanah adalah sama yaitu masing-masing $Y_1 = Y_2 = Y_3 = 18$ m.

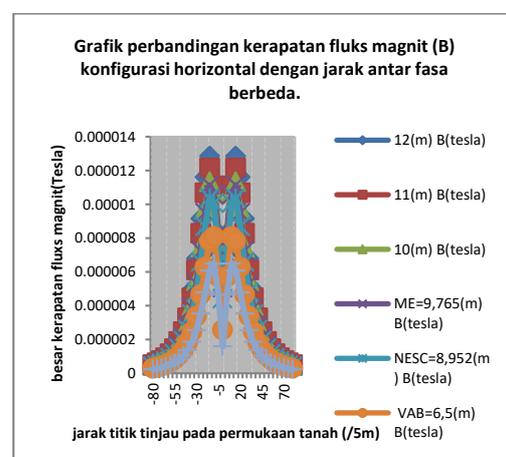
Titik nol diambil tepat dibawah fasa 2. Bila akan menghitung jarak antara fasa menggunakan formula Midlands Electric (ME), maka jarak fasa 1 dengan fasa 2 dan fasa 2 dengan fasa 3 masing-masing 9,765 meter. Dengan mengingat bahwa arus yang mengalir adalah arus tiga fasa

bolak-balik (AC), maka arus yang mengalir tiap fasa adalah sebagai berikut : $I_1 = 1000$ A, $I_2 = (-500+866,025403784439i)$ A dan $I_3 = (-500-866,025403784439i)$



Gambar 15. Konfigurasi Horizontal

Dari data-data tersebut diatas, maka untuk menghitung Intensitas medan magnet (H) pada permukaan tanah digunakan persamaan 3.23 kemudian disubsitusikan ke persamaan 3.24 untuk dihitung besar kerapatan fluks magnet (B) pada setiap titik yang ditentukan. Adapun jarak setiap titik yang akan dihitung kerapatan fluks magnet nya (B) masing-masing lima meter .Sedangkan perhitungan akan dilakukan sebanyak 16 titik ke kiri dengan iterasi 5 m (80 meter) dan 16 titik ke kanan dengan iterasi 5 m (80 meter) . Sedangkan untuk menghitung medan listrik (E) diambil data yang sama, dalam perhitungan digunakan persamaan (3.1). Perhitungan akan dilakukan dengan bantuan program Microsoft Excel . Adapun hasil perhitungan dapat digambarkan berikut ini. Gambar grafik besarnya kerapatan fluks magnet(B) sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 16 dibawah ini

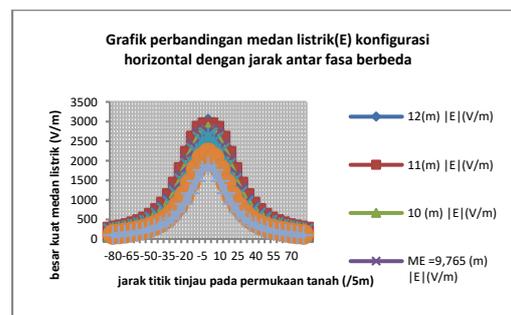


Gambar 16. Fluks Magnet Konfigurasi Horizontal.

Untuk menguraikan karakteristik kerapatan fluks magnet (B) pada konfigurasi horizontal dengan berbagai macam jarak antar fasa yang berbeda disetiap jarak titik tinjau. Dari gambar tersebut diatas terlihat bahwa karakteristik fluks magnet dengan berbagai macam jarak antar fasa yang berbeda-beda pada susunan konfigurasi Horizontal terlihat memiliki karakteristik yang sama. Sedangkan yang membedakannya adalah besarnya nilai-nilai kerapatan fluks magnetnya pada setiap titik tinjau. Perbedaan tersebut terlihat bahwa apabila jarak antar fasanya dirubah, maka nilai kerapatan fluks magnetnya pada titik tinjau yang sama akan berlainan nilai kerapatan fluks magnetnya. Hasil perhitungan kerapatan fluks dengan susunan konfigurasi Horizontal dan gambar 4.3 diatas terlihat bahwa pada titik tinjau yang sama dipermukaan tanah pada titik uji ke 3 (± 15 m) nilai kerapatan fluks magnet nya (B) tertinggi adalah masing-masing sebesar $1,28 \cdot 10^{-5}$ tesla dengan (jarak antar fasa 12 meter), $1,21 \cdot 10^{-5}$ tesla (jarak antar fasa 11 meter), $1,13 \cdot 10^{-5}$ tesla (jarak antar fasa 10 meter), $1,11 \cdot 10^{-5}$ tesla (jarak antar fasa 9,765 meter), $1,03 \cdot 10^{-5}$ tesla (jarak antar fasa 8,952meter). Sedangkan pada koordinat (± 10 m) nilai kerapatan fluks magnetnya $8,1 \cdot 10^{-6}$ tesla dengan (jarak antar fasa 6,5 meter) dan $6,5 \cdot 10^{-6}$ tesla (jarak antar fasa 4,9 meter). Nilai kerapatan fluks magnet yang tertinggi adalah pada jarak antar fasanya 12 meter dan kerapatan fluks magnetnya terendah adalah pada jarak antar fasanya 4,9 meter. Hal tersebut menunjukkan bahwa memperpendek jarak antar fasanya dapat mengurangi kerapatan fluks magnetnya.

Hasil perhitungan kuat medan listrik (E) pada permukaan tanah untuk konfigurasi Horizontal dengan jarak antar fasa diubah-ubah dengan gambar sebagai berikut :

Hasil plotting memperlihatkan grafik kuat medan listrik sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 17 berikut ini :



Gambar 17. Medan Listrik Konfigurasi Horizontal.

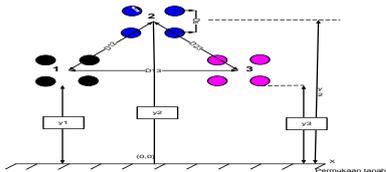
Dari grafik tersebut terlihat karakteristik medan listrik untuk berbagai macam jarak antar fasa yang berbeda-beda dengan susunan konfigurasi Horizontal terlihat memiliki karakteristik yang sama, namun yang membedakannya adalah besarnya nilai kuat medan listrik pada setiap titik tinjau. Perbedaan tersebut terlihat bahwa apabila jarak antar fasanya dirubah, maka nilai kuat medan listriknya pada titik tinjau yang sama akan berlainan besarnya nilai kuat medan listriknya. Hasil perhitungan kuat medan listrik dan gambar 4.4 diatas dengan susunan konfigurasi Horizontal terlihat bahwa pada titik tinjau di permukaan tanah koordinat (0), nilai kuat medan listrik (E) tertingginya adalah masing-masing sebesar 2,92 (kV/m) dengan (jarak antar fasa 12 meter), 2,84 (kV/m) (jarak antar fasa 11 meter), 2,73 (kV/m) (jarak antar fasa 10 meter), 2,70 (kV/m) (jarak antar fasa 9,765 meter), 2,60 (kV/m) (jarak antar fasa 8,952meter), 2,19 (kV/m) (jarak antar fasa 6,5 meter) dan 1,87 (kV/m) (jarak antar fasa 4,9 meter). Nilai kuat medan listrik (E) tertinggi pada konfigurasi horizontal adalah pada jarak antar fasanya 12 meter dan besarnya nilai medan listrik(E) terendah pada jarak antar 4,9 meter. Hal tersebut menunjukkan bahwa apabila jarak antar fasanya diperpendek, maka akan mengurangi nilai besarnya kuat medan listrik (E).

IV.3 Konfigurasi Konduktor Delta

Pada perhitungan kerapatan fluks magnet (B) dan kuat medan listrik (E) dengan konfigurasi delta sirkuit tunggal ini, sebelum melakukan perhitungan kerapatan fluks magnet (B) dan kuat medan listrik (E) akan dilakukan perhitungan jarak antar fasanya dengan

menggunakan persamaan dan data pada konfigurasi Horizontal, sedangkan jarak penghantar fasa1 dan fasa 3 kepermukaan tanah adalah sama yaitu $Y_1 = Y_3 = 18$ m dan jarak penghantar fasa 2 yaitu $Y_2 = 26,456$ m.

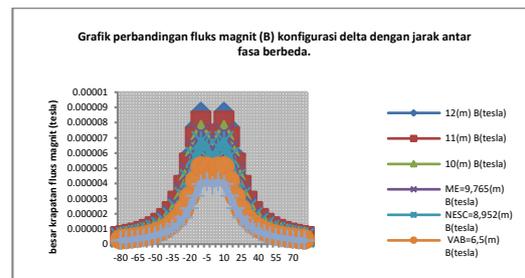
Sebagai ilustrasi Saluran Udara Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi tiga fasa dengan konfigurasi delta seperti Gambar 18 dibawah ini .



Gambar 18. Konfigurasi Delta

Dengan mengingat bahwa arus yang mengalir adalah arus tiga fasa bolak-balik (AC), maka arus yang mengalir tiap fasa adalah sebagai berikut :

$I_1 = 1000$ A, $I_2 = (-500+866,025403784439i)$ A dan $I_3 = (-500-866,025403784439i)$. Dari data-data tersebut diatas, maka untuk menghitung Intensitas medan magnet (H) pada permukaan tanah digunakan persamaan (3.23) kemudian disubsitusikan ke persamaan (3.24) untuk dihitung besar kerapatan fluks magnet (B) pada setiap titik yang ditentukan. Adapun jarak setiap titik yang akan dihitung rapat medan magnetnya (B) masing-masing lima meter. Sedangkan perhitungan akan dilakukan sebanyak 16 titik kekiri sama dengan (80 meter) dan 16 titik kekanan (80 meter). Untuk perhitungan medan listrik (E) pada setiap titik tinjauanya digunakan persamaan 3.1. Perhitungan akan dilakukan sama seperti metode sebelumnya. Adapun hasil perhitungan Kerapatan medan magnet (B) dan kuat medan listrik (E) dengan jarak antar fasa (12 meter), (11 meter), (10 meter), (ME 9,765 meter), (NESC 8,952 meter), (VAB6,5 meter) dan (VDE 4,9 meter) di Ploting sebagai berikut :

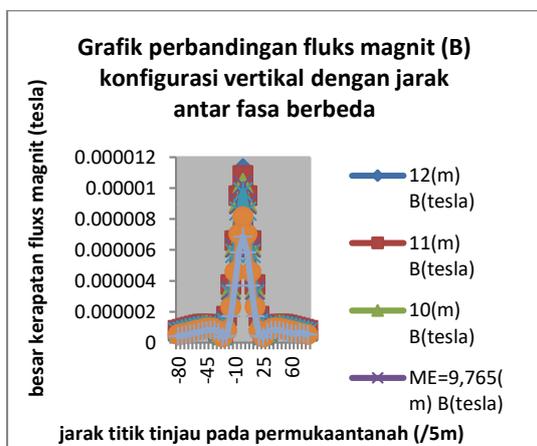


Gambar 19. Fluks Magnet Konfigurasi Delta

Untuk menguraikan karakteristik kerapatan fluks magnet (B) pada konfigurasi delta dengan berbagai macam jarak antar fasa yang berbeda di setiap jarak titik tinjau, maka Hasil perhitungan kerapatan fluks magnet dengan konfigurasi delta tersebut diplot kedalam suatu grafik perbandingan kerapatan fluks magnet sebagaimana terlihat pada gambar 4.6. diatas. Dari gambar grafik tersebut terlihat bahwa karakteristik fluks magnet dengan berbagai macam jarak antar fasa yang berbeda-beda pada susunan konfigurasi delta terlihat memiliki karakteristik yang sama. Sedangkan yang membedakannya adalah besarnya nilai-nilai kerapatan fluks magnetnya pada setiap titik tinjau. Perbedaan tersebut terlihat bahwa apabila jarak antar fasanya dirubah, maka nilai kerapatan fluks magnetnya pada titik tinjau yang sama akan berlainan nilai kerapatan fluks magnetnya.

Hasil perhitungan kerapatan fluks dengan susunan konfigurasi delta dan gambar 4.5. grafik diatas terlihat bahwa pada titik tinjau yang sama dipermukaan tanah pada koordinat (± 10 m) nilai kerapatan medan fluks nya (B) tertinggi adalah masing-masing sebesar $8,6 \cdot 10^{-6}$ tesla dengan (jarak antar fasa 12 meter), $8 \cdot 10^{-6}$ tesla (jarak antar fasa 11 meter), $7,5 \cdot 10^{-6}$ tesla (jarak antar fasa 10 meter), $7,34 \cdot 10^{-6}$ tesla (jarak antar fasa 9,765 meter), $6,8 \cdot 10^{-6}$ tesla (jarak antar fasa 8,952meter). $5,1 \cdot 10^{-6}$ tesla dengan (jarak antar fasa 6,5 meter), sedangkan pada koordinat (± 5 m) nilai kerapatan fluks magnetnya adalah $4,1 \cdot 10^{-6}$ tesla dengan (jarak antar fasa 4,9 meter). Nilai kerapatan fluks magnet (B) yang tertinggi adalah pada jarak antar fasanya 12 meter dan kerapatan fluks magnetnya terendah adalah pada jarak antar fasanya 4,9 meter. Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan memperpendek jarak antar

Dari data tersebut diatas, maka untuk menghitung Intensitas medan magnet (H) pada permukaan tanah digunakan rumus yang sama. Adapun jarak setiap titik yang akan dihitung kerapatan fluks magnetnya (B) masing-masing berjarak lima meter. Sedangkan perhitungan akan dilakukan sebanyak 16 titik kekiri (80 meter) dan 16 titik kekanan (80 meter) . Selanjutnya untuk perhitungan kuat medan listrik (E) pada setiap titik tinjau nya digunakan persamaan (3.1). Perhitungan akan dilakukan dengan bantuan program Microsoft Excel . Adapun hasil perhitungan di plotting pada Gambar 22 dibawah ini.



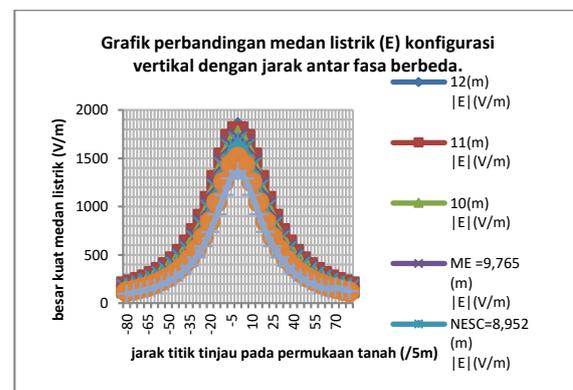
Gambar 22. Perbandingan Kerapatan Fluks Magnet (B) Konfigurasi Vertikal

Untuk menguraikan karakteristik kerapatan fluks magnet (B) pada konfigurasi vertikal dengan berbagai macam jarak antar fasa yang berbeda disetiap jarak titik tinjau, maka sebagaimana terlihat pada gambar 4.9. diatas. terlihat bahwa karakteristik kerapatan fluks magnet dengan berbagai macam jarak antar fasa yang berbeda-beda pada susunan konfigurasi vertikal terlihat memiliki karakteristik yang sama. Sedangkan yang membedakannya adalah besarnya nilai-nilai kerapatan fluks magnetnya pada setiap titik tinjau. Perbedaan tersebut terlihat bahwa apabila jarak antar fasanya dirubah, maka nilai kerapatan fluks magnetnya pada titik tinjau yang sama akan berlainan nilai kerapatan fluks magnetnya.

Hasil perhitungan kerapatan fluks dengan susunan konfigurasi vertikal dan gambar 4.9 diatas terlihat bahwa pada titik tinjau

yang sama dipermukaan tanah pada koordinat (0) nilai kerapatan fluks magnetnya (B) tertinggi adalah masing-masing sebesar $1,12 \cdot 10^{-5}$ tesla dengan (jarak antar fasa 12 meter), $1,08 \cdot 10^{-5}$ tesla (jarak antar fasa 11 meter), $1,03 \cdot 10^{-5}$ tesla (jarak antar fasa 10 meter), $1,02 \cdot 10^{-5}$ tesla (jarak antar fasa 9,765 meter), $9,7 \cdot 10^{-6}$ tesla (jarak antar fasa 8,952meter), $8,1 \cdot 10^{-6}$ tesla dengan (jarak antar fasa 6,5 meter) dan $6,8 \cdot 10^{-6}$ tesla dengan (jarak antar fasa 4,9 meter). Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan memperpendek jarak antar fasanya, maka kerapatan fluks magnetnya dapat menurun.

Hasil plot untuk membuat grafik kuat medan listrik (E) seperti diperlihatkan pada Gambar 23 dibawah ini.



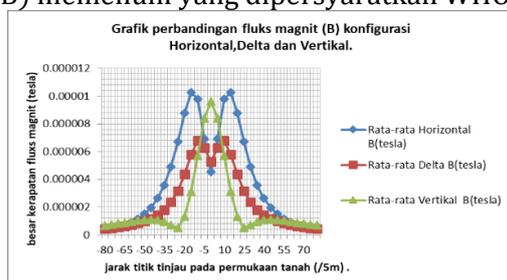
Gambar 23. Grafik Medan Listrik Konfigurasi Vertikal.

Untuk menguraikan karakteristik kuat medan listrik (E) dengan berbagai macam jarak antar fasa yang berbeda pada setiap jarak titik tinjau, maka data - data tersebut akan diplot kedalam suatu grafik perbandingan kuat medan listrik sebagaimana terlihat pada gambar 4.10 diatas. Dari grafik tersebut terlihat karakteristik medan listrik untuk berbagai macam jarak antar fasa yang berbeda-beda dengan susunan konfigurasi vertikal terlihat memiliki karakteristik yang sama, namun yang membedakannya adalah besarnya nilai - nilai kuat medan listrik pada setiap titik tinjau. Perbedaan tersebut terlihat bahwa apabila jarak antar fasanya dirubah, maka nilai kuat medan listriknya pada titik tinjau yang sama akan berlainan besarnya nilai kuat medan listrik nya. hasil perhitungan kuat medan listrik dan

gambar 4.10 diatas dengan susunan konfigurasi vertikal terlihat bahwa pada titik tinjau di permukaan tanah koordinat (0), nilai kuat medan listrik (E) tertinggi nya adalah masing – masing sebesar 1,81 (kV/m) dengan (jarak antar fasa 12 meter), 1,77 (kV/m) dengan (jarak antar fasa 11 meter), 1,73 (kV/m) dengan (jarak antar fasa 10 meter), 1,72 (kV/m) dengan (jarak antar fasa 9,765 meter), 1,67 (kV/m) dengan (jarak antar fasa 8,952 meter), 1,51 (kV/m) dengan (jarak antar fasa 6,5 meter), dan 1,36 (kV/m) dengan (jarak antar fasa 4,9 meter). Hasil perhitungan tersebut memperlihatkan untuk konfigurasi vertikal dengan memperkecil jarak antar fasanya mengalami penurunan nilai kuat medan listriknya.

IV.5. Hasil Perhitungan Kerapatan Fluks Magnet (B) Rata -Rata

Berdasarkan hasil perhitungan kerapatan fluks magnet dengan jarak antar fasa berbeda – beda pada susunan konfigurasi horizontal, konfigurasi delta dan konfigurasi vertical. Sesuai hasil plotting pada Gambar 15, Gambar 18 dan gambar 4. dihitung nilai rata rata kerapatan fluks magnetnya (B) dari masing – masing bentuk konfigurasi nya. Hasil perhitungan perbandingan nilai rata – rata kerapatan fluks magnet (B) konfigurasi horizontal, delta dan vertikal. maka dapat diploting pada Gambar 23. Hasil Perhitungan yang diploting pada Gambar 13. kerapatan fluks magnet rata (B) memenuhi yang dipersyaratkan WHO



Gambar 23. Grafik Perbandingan Fluks Magnet (B) Rata-Rata

Untuk menguraikan karakteristik dan nilai tertinggi kerapatan fluks magnetnya (B) pada masing konfigurasi horizontal, delta dan vertikal, maka diplot kedalam suatu grafik perbandingan nilai kerapatan fluks magnet (B) dari berbagai konfigurasi sebagaimana terlihat pada

dari grafik tersebut terlihat karakteristik fluks magnet tertinggi masing – masing $1,02 \cdot 10^{-6}$ tesla pada titik tinjau (± 15 m) yaitu pada konfigurasi horizontal, $6,7 \cdot 10^{-6}$ tesla pada titik tinjau (± 10 m) pada konfigurasi delta dan $9,6 \cdot 10^{-6}$ tesla pada konfigurasi vertikal pada titik tinjau (0). Hasil perhitungan nilai kerapatan fluks magnet rata – rata yang terendah adalah bentuk konfigurasi delta.

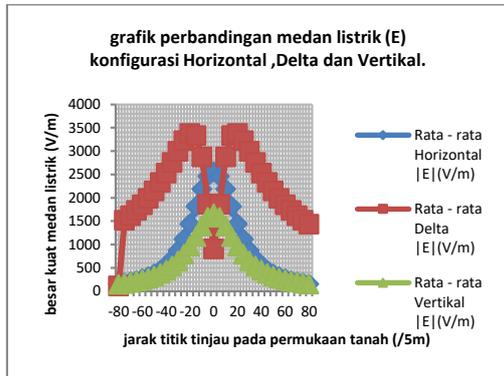
IV.6. Hasil Perhitungan Kuat Medan Listrik (E) Rata-Rata.

Menurut Hukum Coulomb, suatu muatan listrik akan menghasilkan medan listrik di titik – titik sekitarnya. Medan listrik merupakan besarnya gaya yang akan dialami oleh setiap coulomb muatan yang ditempatkan dititik tersebut. Untuk muatan titik, besar medan listrik akan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dari muatan penyebabnya. Sedangkan untuk muatan garis dengan rapat muatan persatuan panjang ρ_L seperti pada kawat transmisi medan listrik nya (E) sesuai persamaan 3.1.

Berdasarkan hasil perhitungan kuat medan listrik (E) dengan jarak antar fasa berbeda – beda pada susunan konfigurasi horizontal, konfigurasi delta dan konfigurasi vertikal dihitung nilai rata rata kuat medan listrik (E) dari masing – masing bentuk konfigurasi nya. Hasil perhitungan nilai rata – rata kuat medan listriknya sebagai berikut ini :

Hasil perhitungan perbandingan nilai rata – rata kuat medan listrik (E) konfigurasi horizontal, delta dan vertikal. Untuk memperjelas karakteristik dan nilai tertinggi kuat medan listrik (E) pada konfigurasi horizontal, delta dan vertikal, maka hasil diploting kedalam suatu gambar perbandingan nilai kuat medan listrik (E) dari berbagai konfigurasi sebagaimana terlihat pada gambar 4.12 dibawah ini. Dari grafik tersebut terlihat karakteristik kuat medan listrik tertingginya adalah masing – masing 3,37 (kV/m) pada titik tinjau (± 20 m) yaitu pada konfigurasi delta, 2,55 (kV/m) pada titik tinjau (0) pada konfigurasi horizontal dan 1,65 (kV/m) pada konfigurasi vertikal pada titik tinjau (0). Sehingga dari hasil perhitungan nilai kuat medan listrik (E) rata-rata yang terendah adalah bentuk konfigurasi vertikal. Hasil

perhitungan dari ketiga konfigurasi tersebut nilai kuat medan listrik nya masih memenuhi nilai yang dipersyaratkan WHO.



Gambar 24. Grafik Perbandingan Kuat Medan Listrik (E) Rata-Rata

IV.7 Perhitungan Nilai Optimum.

Untuk memperoleh nilai optimum dari dua series yang berbeda, persamaan regresi dapat ditulis sebagai berikut

$$Y_1 = a_1 X + b_1 \dots \dots \dots (4.1)$$

$$Y_2 = a_2 X + b_2 \dots \dots \dots (4.2)$$

Dengan kedua persamaan diatas yang menggambarkan ordinat(Y) dan absis (X) maka diperoleh koordinat titik potong (Xp, Yp) sbb :

$$X = \frac{(b_2 - b_1)}{(a_1 - a_2)} \dots \dots \dots (4.3)$$

Selanjutnya dengan memsubsitusi persamaan (4.3) ke persamaan (4.1) diperoleh

$$Y = \frac{a_1(b_2 - b_1)}{(a_1 - a_2)} + b_1$$

$$Y = \frac{a_1(b_2 - b_1) + b_1(a_1 - a_2)}{(a_1 - a_2)}, \text{ maka}$$

$$Y = \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{(a_1 - a_2)} \text{ dengan demikian dikatakan terjadi titik potong (xp dan yp), } \left(\frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2}, \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1 - a_2} \right).$$

Tabel 2. Hasil Perhitungan Kuat Medan Listrik Dan Kerapatan Fluks Magnet Dengan Variasi Jarak Antar Fasa.

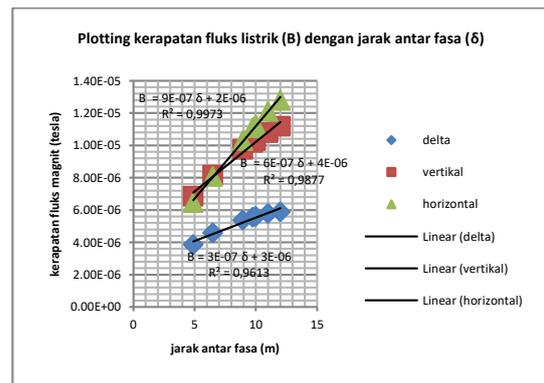
jarak antar fasa (δ)	Delta		vertikal		Horizontal	
	E(V/m)	B(Tesla)	E(V/m)	B(Tesla)	E (V/m)	B(tesla)
4,9	769,924	3,88E-06	1363,875	6,86E-06	1870,806	6,48E-06
6,5	850,037	4,59E-06	1513,167	8,16E-06	2199,309	8,09E-06
8,952	924,114	5,39E-06	1677,536	9,76E-06	2604	1,03E-05
9,765	937,14	5,57E-06	1720,409	1,02E-05	2708,34	1,11E-05
10	939,989	5,62E-06	1731,936	1,03E-05	2735,934	1,13E-05
11	947,984	5,79E-06	1777,299	1,08E-05	2841,643	1,21E-05

12	948,985	5,90E-06	1817,375	1,12E-05	2929,736	1,28E-05
----	---------	----------	----------	----------	----------	----------

Untuk memperoleh nilai optimum jarak antar fasa, kuat medan listrik dan kerapatan fluks. Maka dengan memplot data pada tabel IV.1 tersebut diatas diperoleh grafik regresi linier.

IV.7.1 . Nilai optimum jarak antar fasa (δ) dan kerapatan fluks magnet (B)

Nilai B pada konfigurasi delta, vertikal dan horizontal memiliki slope positif artinya semakin besar jarak antar fasa nilai B meningkat seperti diperlihatkan pada gambar 4.13 dibawah ini. Untuk memperoleh nilai optimum jarak antar fasa (δ), langkah pertama memplot nilai (δ), kemudian memplot nilai kerapatan fluks magnet (B) pada ketiga konfigurasi tersebut, maka dari plotting diperoleh persamaan garis seperti Gambar 25. dibawah ini.



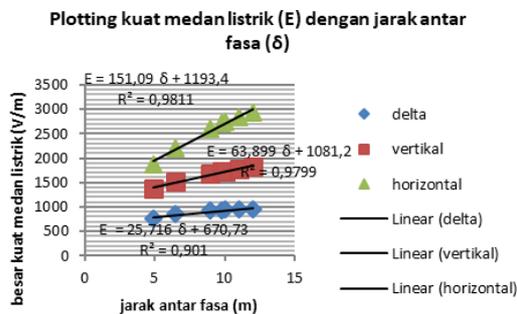
Gambar 25. Kerapatan Fluks Magnet Dengan Jarak Antar Fasa

Hasil plotting pada Gambar 25. terlihat bahwa perpotongan garis terjadi antara konfigurasi vertikal dengan horizontal. Sehingga diperoleh nilai jarak antar fasa optimum (δ_{opt}) adalah pada jarak 6,7 meter. Sedangkan untuk memperoleh nilai optimum kerapatan fluks magnitnya (B_{opt}) dengan mensubsitusikan salah satu persamaan garis perpotongan antara B horizontal dan B vertikal, maka diperoleh nilai adalah sebesar 8,03. 10⁻⁶ (Tesla).

IV.7.2 Perhitungan Nilai Optimum Kuat Medan Listrik (E_{opt}).

Untuk mendapatkan nilai optimum kuat medan listrik, langkah pertama memplot kuat medan listrik dan jarak antar fasa konfigurasi delta, langkah kedua memplot nilai kuat medan listrik

dan jarak antar fasa konfigurasi vertikal, selanjutnya memplot nilai kuat medan listrik dan jarak antar fasa konfigurasi horizontal, sehingga diperoleh persamaan garis seperti diperlihatkan Gambar 26 dibawah ini.



Gambar 26. Kuat Medan Listrik Dengan Jarak Antar Fasa

Dari ketiga persamaan garis tersebut pada Gambar 26 diatas, memiliki slope positif yang artinya semakin besar jarak antar fasanya kuat medan listriknya meningkat. Dari gambar 4.14 diatas ketiga garis tersebut tidak terjadi perpotongan, dengan demikian untuk mendapatkan nilai kuat medan listrik optimum (E_{opt}) nya dapat digunakan Persamaan kuat medan listrik pada salah satu konfigurasi horizontal atau vertikal. Adapun nilai jarak antar fasanya digunakan adalah 6,7 meter. Maka dengan mensubsitusikan nilai jarak antar fasa ke persamaan E horizontal diperoleh nilai kuat medan listrik optimumnya (E_{opt}) sebesar 2,2 (kV/m).

V. Kesimpulan

Dari pembahasan bab - bab sebelumnya maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Perubahan konfigurasi konduktor dan perubahan jarak fasanya (δ), dapat mempengaruhi parameter kuat medan listrik (E) dan kerapatan fluks magnet (B).
2. Variasi konfigurasi konduktor antara Vertikal dengan Horizontal dapat menentukan nilai optimum kuat medan listrik, kerapatan fluks magnet dan jarak antar fasa. Besarnya nilai optimum adalah masing - masing (δ_{opt}) = 6,7 (meter), (B_{opt}) = $8,03 \cdot 10^{-6}$ (Tesla) dan (E_{opt}) = 2,2 (kV/m).

3. Penggunaan slope dapat menentukan konfigurasi yang akan dipilih.
4. Hasil penelitian yang dilakukan memenuhi standart WHO.

Daftar Pustaka

Akosh Das Begamudre "Extra High Voltage Ac Transmission Engineering " Third Edition" New Age International (P) Limited,Publisher

Amalia (2012).Perhitungan Korona, Audible Noise Dan Radio Interference Pada Sutet Dengan Variasi Jarak Antar Kawat.

Badan Standari Nasional 2003 Sutt Dan Sutet -Nilai Ambang Batas Medan Magnit Dan Medan Listrik

Djiteng Marsudi (2011) .Pembangkitan Energi Listrik

Gonen,Turan (1988) "Electric Power Transmission System Engineering "Weley-Iterscience Publication,Jhon Wiley And Son Inc, Canada

H.Ahmadi,S.S. Mohseni,A.A. Shayegani Akmal.(2010). Electromagnetic Fields Near Transmission Lines Problem ,And Solution.

Hutauruk ,T.S (1993).Transmisi Tenaga Listrik . Erlangga ,Jakarta. Transmission Line Refrence Book 345 KV Above SNI 04-6918-2002

Kumar ,S.R. Statis And A.R Santha Kumar " Design Tower"

Murjono M.Sc . Elektomagnetika PT. Pln (Persero), Spln 112: (1994),Ambang Batas Kuat Medan Listrik Dan Induksi Medan Magnet Dibawah Saluran Tegangan Tinggi Dan Tegangan Ekstra Tinggi. Jakarta

Ms.H.Al.Salameh And M.A.S Hasouna (2010). Arrangin

Osama Elsayed (2012), Mitigation Of Manetic Field Under Double Circuit 220 Kv.

Prof. Dr. Ir .Zuhal .Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya

Proceeding Of Wce Vol Ii (2010),Adel Z El.Dein. Mitigation Of Magnetic Field Under Egyption 500 Kv Over Head Transmission Line.

Stevenson,Wiliam,D,Jr (1993),"Analisa Sistem Tenaga " Terjemahan, Kamal Idris,Edisi Keempat,Erlangga Jakarta.

Theraja, B.L (1986) “Electrical Technology “ Nirja Construction And Development Co (P) Ltd ,Ram Nagar,New Delhi

Tribuana ,N.2000. Pengukuran Medan Listrik Dan Medan Magnit Dibawah Sutet 500 Kv.