

Analisis Medan Magnet Terhadap Operator yang Bekerja pada Saluran Transmisi Menggunakan Metode Elemen Hingga

Aditya Dwinugraha, I Made Yulistya Negara, dan Arif Musthofa

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: yulistya@ee.its.ac.id, arif@ee.its.ac.id

Abstrak—Pemakaian tegangan tinggi selain untuk mengurangi rugi-rugi daya, juga menghasilkan medan magnet di sekitar kawat penghantar. Medan magnet di sekitar kawat penghantar menimbulkan dampak merugikan bagi operator maupun penduduk yang bertempat tinggal di dekat saluran transmisi. Untuk menganalisis distribusi medan magnet pada saluran transmisi digunakan perangkat lunak berbasis FEM (*Finite Element Methode*). Ide dasar dari FEM adalah membagi struktur, badan (*body*), atau daerah yang dianalisis menjadi jumlah yang sangat besar dari suatu elemen hingga (*finite element*). Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan mensimulasikan saluran transmisi 500kV dan pengaruhnya terhadap sekitar (operator) untuk mendapatkan medan magnet yang di hasilkan. Penelitian ini akan menggunakan perangkat lunak *CST Studio* berbasis FEM untuk melakukan simulasi distribusi medan magnet yang di hasilkan oleh saluran transmisi dan terhadap manusia.

Kata Kunci—*CST Studio*, *Finite Element Method*, Medan Magnet, Menara Transmisi, Saluran Transmisi.

I. PENDAHULUAN

ENERGI listrik adalah salah satu energi yang sangat diperlukan dalam kehidupan sehari-hari, sebelum dapat kita gunakan energi listrik dibangkitkan dari berbagai macam sumber seperti PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), dan PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas) setelah itu energi listrik tegangannya di naikan oleh *trafo step up* dan disalurkan melalui saluran transmisi hal ini bertujuan untuk memperkecil rugi daya dan susut tegangan pada saluran transmisi, setelah itu tegangan diturunkan menggunakan *trafo step down* lalu disalurkan melalui saluran distribusi hingga dapat kita gunakan.

Fungsi utama suatu saluran transmisi adalah untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Untuk mengurangi rugi-rugi daya disepanjang saluran transmisi, maka dipakailah tegangan tinggi. Pemakaian tegangan tinggi ini selain mengurangi rugi-rugi daya, juga menghasilkan medan magnet di sekitar kawat penghantar [1]. Medan magnet di sekitar kawat penghantar menimbulkan dampak merugikan bagi operator maupun penduduk yang bertempat tinggal di dekat saluran transmisi.

Untuk menganalisis distribusi medan magnet pada saluran transmisi akan digunakan metode yang bernama FEM (*Finite Element Method*). [2,5].

Pada studi kali ini, simulasi menggunakan *CST Studio* berbasis *Finite Element Method* (FEM) digunakan untuk mengetahui kondisi dan persebaran medan magnet pada saluran transmisi 500 kV dan seberapa besar bahayanya terhadap operator.

II. PERHITUNGAN MEDAN MAGNET PADA SALURAN TRANSMISI

Dalam kalkulasi medan magnet, kekuatan medan magnet (\mathbf{H}) membawa serangkaian informasi yang terdiri dari medan magnet (\mathbf{B}) yang dimana $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$. Pemanfaatan persamaan gelombang (Helmholtz's equation) ada di (1)[5]. Ketika sumber frekuensi adalah 50 Hz, medan magnet memodelkan hukum persamaan arus yang terdefinisi sebagai berikut.

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Dimana, μ adalah permeabilitas magnet, σ adalah konduktivitas, dan ε adalah konstanta permitivitas dielektrik.

Dengan mempertimbangkan sistem harmonik waktu yang menyatakan $\mathbf{H} = \mathbf{H}e^{j\omega t}$, maka

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} = -\omega^2 \mathbf{H} \quad \text{dan} \quad \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = j\omega \mathbf{H} \quad (2)$$

Dimana ω adalah frekuensi angular

Oleh karena itu, melihat dari persamaan 3.1 dapat menjadi persamaan sebagai berikut.

$$\nabla^2 \mathbf{H} - j\omega\sigma\mu\mathbf{H} + \omega^2\varepsilon\mu\mathbf{H} = 0 \quad (3)$$

Dengan mempertimbangan masalah di 3 dimensi (x,y,z), maka

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} \right) - (j\omega\mu\sigma - \mu\varepsilon\omega^2)\mathbf{H} = 0 \quad (4)$$

III. METODE PERHITUNGAN MEDAN MAGNET DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

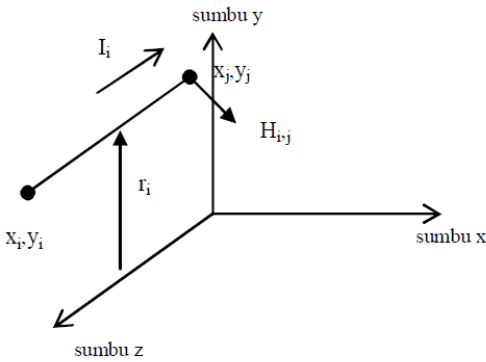
A. Metode Element Hingga (FEM)

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode numerik yang sering digunakan untuk menyelesaikan permasalahan struktur, termal dan elektromagnetik. Dalam metode ini permasalahan diselesaikan dengan menggunakan pendekatan prinsip dasar proses diskretisasi. Proses diskretisasi pada elemen hingga adalah proses pembagian pada pemodelan struktur objek dengan membaginya dalam elemen-elemen kecil yang jumlahnya tidak terbatas tergantung objek tersebut [1,2]. Elemen-elemen tersebut adalah bentuk mesh-mesh kecil yang terdapat pada obyek tersebut. Metode perhitungannya adalah menghitung mesh-

mesh kecil yang nantinya digabung menjadi suatu bentuk yang lebih besar untuk digabungkan. Hasil yang didapatkan berasal dari nilai pendekatan yang kontinu terhadap yang berhubungan antar bagian meshnya sehingga menjadi bentuk yang diharapkan[5,8].

B. Perhitungan Medan Magnet pada Saluran Transmisi

Metode umum untuk perhitungan medan magnet disekitar transmisi dapat dihitung dengan menggunakan analisis 2 dimensi. Dengan menganggap bahwa transmisi sejajar dengan permukaan bumi yang datar. Dengan menggunakan sistem koordinat yang diuraikan seperti gambar dibawah ini.



Gambar 1. Sistem Koordinat Perhitungan

Pada gambar 3.1, digambarkan bahwa konduktor transmisi sejajar dengan sumbu Z. Konduktor membawa arus sebesar I_i, dengan arah berlawanan sumbu Z.

Arah kuat medan H_{ji} pada titik x_j,y_j dengan jarak r_{ij} dari permukaan bumi mempunyai amplitudo

$$H_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \tag{5}$$

Dalam notasi vektor dituliskan

$$H_{j,i} = \frac{I_i \times r_{j,i}}{2\pi r_{i,j}^2} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \Phi_{i,j} \tag{6}$$

Unit vektor arah $\Phi_{i,j}$

$$= -\frac{y_i - y_j}{r_{ij}} u_x + \frac{x_i - x_j}{r_{ij}} u_y \tag{7}$$

Dimana u_x = unit vektor arah sejajar sumbu x dan u_y = unit vektor arah sejajar sumbu y.

Jika ada beberapa konduktor yang membawa arus listrik maka kuat medan totalnya menjadi

$$H_{ji} = \sum \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \Phi_{i,j} \tag{8}$$

Medan magnet disekitar transmisi 3 fasa dipengaruhi oleh kehadiran arus balik tanah (*earth return*) khususnya untuk titik yang jauh dari transmisi (dan dekat dengan tanah). Untuk transmisi yang seimbang, arus ini terdistribusi melalui tanah sepanjang transmisi, meskipun akhirnya jumlah arusnya adalah nol. Arus tanah dapat dihitung dengan rumus Carson. Dengan demikian kuat medan magnet yang dihasilkan oleh transmisi dan arus tanah dapat dituliskan [6]

$$H_{ji} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \Phi_{i,j} - \frac{I_i}{2\pi r'_{i,j}} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{2}{\gamma r'_{i,j}} \right)^4 \right] \Phi'_{i,j} \tag{9}$$

Persamaan 3.8 menunjukkan medan magnet akibat pengaruh transmisi, sedangkan persamaan 3.9 menunjukkan medan magnet akibat pengaruh arus balik di bumi yang juga merupakan faktor koreksi karena arus balik tanah sebesar $\gamma = [j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)]^{1/4}$

Keterangan:

σ = konduktivitas tanah (0,001 sampai dengan 0,002 S/m)

ϵ = permitivitas tanah ($8,85 \cdot 10^{-12}$ sama dengan permitivitas udara)

terlihat bahwa r'_{ij} juga merupakan bilangan kompleks

$$r'_{i,j} = \left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j + 2/\gamma)^2 \right]^{1/4} \tag{10}$$

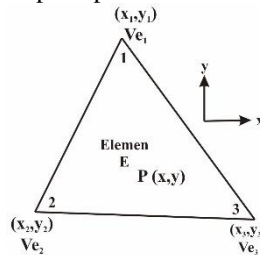
Sedangkan

$$\Phi'_{i,j} = -\left[\frac{y_i - y_j + 2/\gamma}{r'_{i,j}} \right] u_x + \frac{x_i - x_j}{r'_{i,j}} u_y \tag{11}$$

Dari rumus diatas terlihat bahwa kuat medan magnet H tidak akan sefasa dengan sumber arusnya bila efek arus bumi diperhitungkan.

C. Perhitungan Medan dan Penyatuan Element Segitiga

Inti dari metode elemen hingga adalah diskretisasi, yaitu pembentukan mesh elemen-elemen segitiga kecil dengan jumlah yang tak terbatas. Dengan mengetahui nilai potensial (V) pada satu elemen segitiga maka akan didapat nilai medan listrik pada permukaan isolator tersebut.

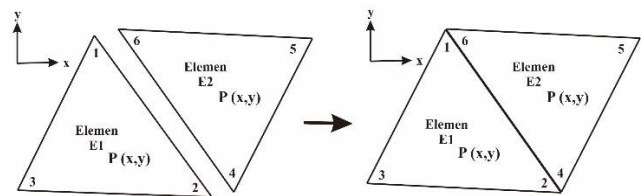


Gambar 2. Pemodelan bentuk elemen segitiga

Persamaan mencari energi pada medan elektrostatis untuk tiap elemen dapat didapatkan dari fungsi berikut:

$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r V^T S V \tag{12}$$

Berikut metode penyatuan elemen-elemen segitiga yang telah terbentuk.



Gambar 3. Penggabungan dua elemen segitiga

Dari penggabungan beberapa elemen segitiga tadi didapatkan nilai energinya :

$$W = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r V_{con}^T S V_{con} \tag{13}$$

Dimana

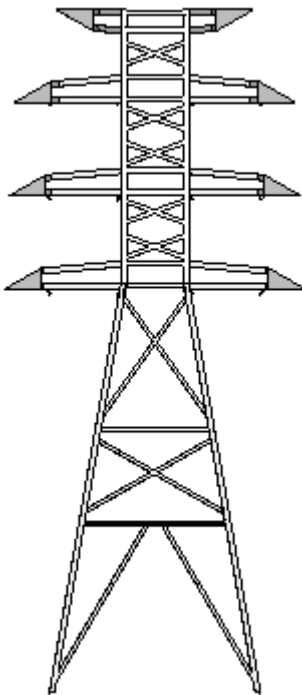
$$S = C^T S_{dis} C \tag{14}$$

Persamaan (18) dapat dijabarkan menjadi suatu matrik koefisien yang terhubung antar satu segitiga dengan yang lainnya. Matriks koefisiensi dari pengabungan dua element segitiga seperti pada gamba dibawah ini :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11}^{(1)} + S_{66}^{(2)} & S_{12}^{(1)} + S_{64}^{(2)} & S_{13}^{(1)} & S_{65}^{(2)} \\ S_{21}^{(1)} + S_{46}^{(2)} & S_{22}^{(1)} + S_{44}^{(2)} & S_{23}^{(1)} & S_{45}^{(2)} \\ S_{31}^{(1)} & S_{32}^{(1)} & S_{33}^{(1)} & 0 \\ S_{56}^{(1)} & S_{54}^{(1)} & 0 & S_{55}^{(2)} \end{bmatrix} \tag{15}$$

D. Pemodelan Tower, Isolator, dan Manusia

Pemodelan awal yang dilakukan adalah pemodelan tower transmisi. Jenis tower yang digunakan dalam pemodelan adalah *suspension tower*. Hasil pemodelan tower transmisi dapat dilihat pada gambar 4.



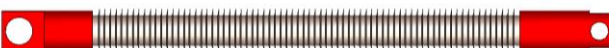
Gambar 4. Pemodelan Tower Transmisi

Setelah pemodelan tower transmisi, langkah selanjutnya adalah pemodelan isolator 500 kV. Pemodelan batang konduktor menggunakan material *epoxy resin*. Hasil pemodelan batang konduktor dalam isolator dapat dilihat pada gambar 5.



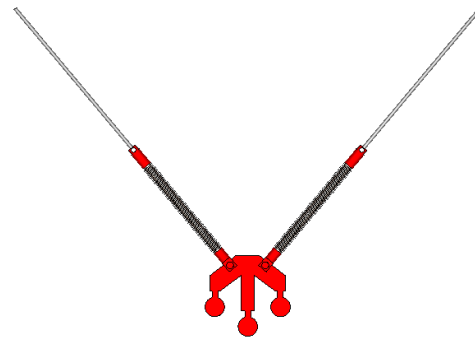
Gambar 5. Pemodelan Batang Konduktor dalam Isolator

Pemodelan selanjutnya adalah memasang sirip-sirip isolator dengan material *polymide* dan memasang *end fitting* dengan material *iron*. Hasil pemodelan isolator dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Pemodelan Isolator

Setelah pemodelan isolator selesai, kita lakukan pemasangan isolator pada suspensi isolator. Dari hasil pemodelan kita dapatkan hasil yang ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Pemodelan Isolator dengan Suspensi

Dan Pemodelan manusia dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Pemodelan Manusia

E. Material Penyusun Tower Transmisi, Isolator Polimer, dan Manusia

Tabel berikut menunjukkan material-material yang digunakan oleh tower transmisi, dan isolator polimer pada simulasi berdasarkan pada data *library* CST Studio Suite.

Tabel 1. Data Sheet Material Tower Transmisi dan Konduktor

No	Unit	Material	
		Copper (Pure)	Ferro A6M (lossy)
1	Epsilon	1	5.9
2	Mue	1	1
3	El. Cond. (S/m)	5.96x10 ⁷	
4	Therm. Cond. (W/K/m)		2

Tabel 2. Data Sheet Material Isolator

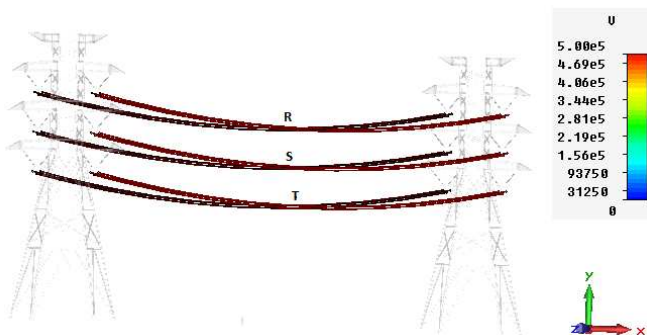
No	Unit	Material	
		Epoxy Resin	Polymide (lossy)
1	Epsilon	4	3.5
2	Mue	1	1
3	El. Cond. (S/m)	1 x10 ⁻¹⁵	
4	Rho (kg/m ³)	1500	1400
5	Therm. Cond. (W/K/m)	0.2	0.2
6	Heat cap. (kJ/K/kg)		1
7	Diffusivity (m ² /s)		1.42857 x10 ⁻⁷
8	Young's Mod. (GPa)	13	2.5
9	Poiss. Ratio	0.45	0.4
10	Thermal Exp. (1e ⁻⁶ /K)		25

Tabel 3.
Data Sheet Material Manusia

No	Unit	Material (Heart)
1	Epsilon	1
2	Mue	1
3	Rho (kg/m ³)	1100
4	Therm. Cond. (W/K/m)	0.293
5	Heat cap. (kJ/K/kg)	3.5
6	Diffusivity (m ² /s)	7.61039e x10 ⁻⁸
7	Bloodflow (W/K/m ³)	9100
8	Metab. Rate (W/m ³)	1620

F. Simulasi Saluran Transmisi

Tegangan yang bekerja pada saluran transmisi sesuai dengan tegangan nominal saluran transmisi, yaitu 500 kV. Gambar 9 menunjukkan tegangan yang diberikan pada saluran transmisi tersebut. Tegangan 500 kV 3 fasa diberikan pada konduktor yang berwarna merah pada gambar dengan penempatan R, S dan T.

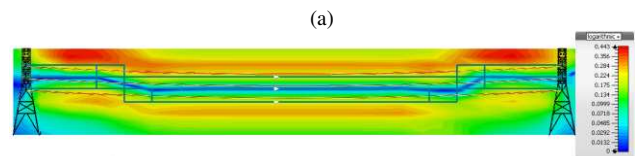
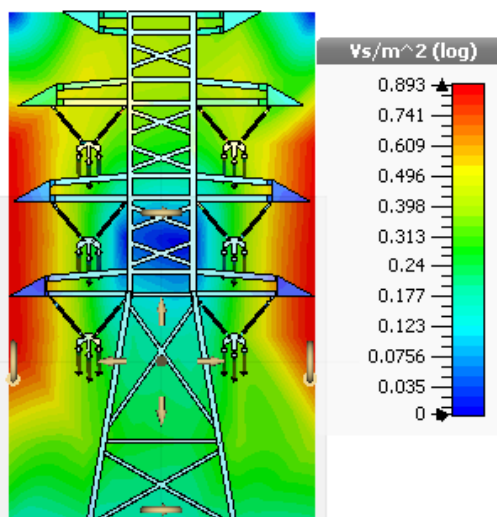


Gambar 9. Tegangan Kerja Saluran Transmisi

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

A. Hasil Simulasi pada Saluran Transmisi

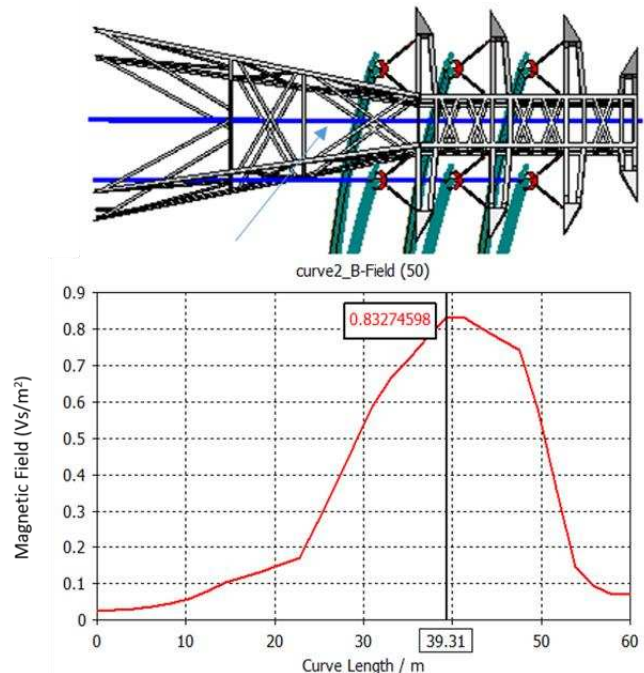
Pada gambar 10, dapat dilihat distribusi medan magnet pada saluran transmisi dengan indikator warna. Warna merah pada gambar menunjukkan nilai medan magnet tertinggi dan warna biru bernilai sedikit atau tidak ada nilai medan magnetnya. Pada gambar a dan b menunjukkan nilai distribusi medan magnet di tengah-tengah saluran transmisi.



Gambar 10. Distribusi Medan Magnet di Saluran Transmisi. (a) Tampak Depan (b) Tampak Samping

B. Analisis Medan Magnet pada Tower

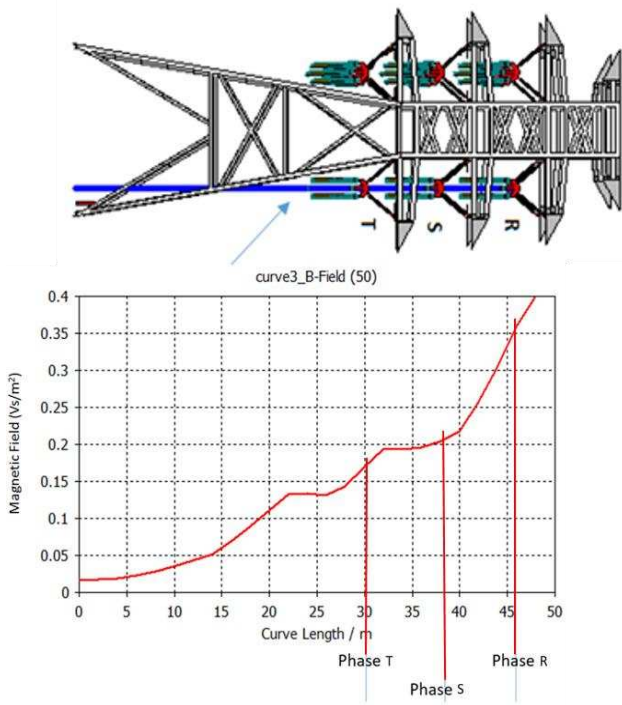
Nilai medan magnet pada tower mengalami naik turun. Pada titik awal peningkatan konstan, lalu pada titik 23 mengalami peningkatan yang signifikan dan nilai tertinggi ada pada ketinggian 39,31m yang bernilai 0,83 Vs/m², lalu turun hingga titik 60.



Gambar 11. Grafik Medan Magnet pada Tower

C. Analisis Medan Magnet pada Phase R, S, dan T

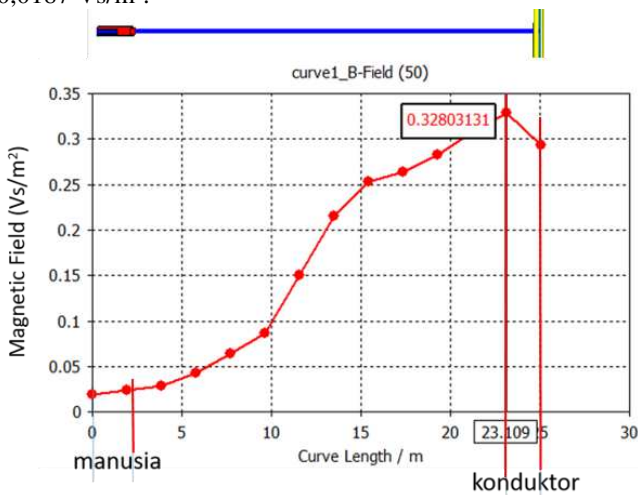
Dapat dilihat digambar 12 nilai medan magnet pada saluran transmisi di phase T dengan tinggi kurva 30 m. Garis berwarna biru menunjukkan tinggi dari kurva tersebut. Pada titik T nilai medan magnet adalah 0,17 Vs/m² dan mengalami peningkatan hingga titik R. Pada titik S dengan tinggi 38m bernilai 0,21 Vs/m². Dan pada titik R dengan tinggi 46m bernilai 0,35 Vs/m²



Gambar 12. Grafik Medan Magnet pada Phase R, S, dan T

D. Analisis Medan Magnet pada Konduktor (Jarak Terendah) dan Manusia

Nilai medan magnet di konduktor saluran transmisi mengalami kenaikan dan sedikit penurunan. Gambar 13 pada manusia dengan ketinggian 0 - 2,2 m terlihat garis kurva mengalami sedikit kenaikan dengan nilai medan magnet rata-rata 0,025 Vs/m², lalu pada ketinggian 10 m mengalami kenaikan yang drastis hingga pada titik puncak di tepi konduktor yaitu di ketinggian 23 m yang bernilai 0,328 Vs/m². Lalu pada konduktornya sendiri mengalami penurunan, ini dikarenakan medan magnet terkuat adalah di sekitar konduktor maka di konduktornya sendiri nilai medan magnet kecil dibandingkan sekitarnya. Pada gambar 4.13 menunjukkan nilai medan magnet pada manusia yaitu sebesar 0,0187 Vs/m².

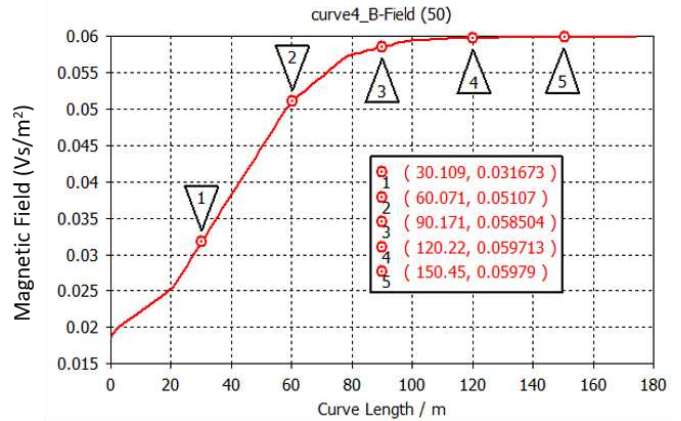


Gambar 13. Perbandingan medan listrik pada sirip isolator dengan keretakan

E. Perbandingan Medan Magnet pada Manusia di Bawah Saluran Transmisi

Dalam bahasan ini, akan dilakukan perbandingan antar manusia dengan jarak masing-masing 30 m pada sepanjang saluran transmisi. Pada gambar 4.16 dapat dilihat nilai medan

magnet pada jarak 0 m dari tower mengalami peningkatan hingga jarak 120 m, lalu dari jarak 120 m hingga 180 hampir konstan di 0,06 Vs/m². Ini menandakan bahwa nilai medan magnet terbesar yaitu 0,06 Vs/m² terletak di tengah saluran transmisi atau di bawah konduktor (jarak terendah).



Gambar 15. Grafik Medan Magnet pada Manusia di Bawah Saluran Transmisi

F. Perbandingan Pengukuran Langsung dengan Hasil Simulasi

Setelah mendapatkan hasil kurva dan grafik dari simulasi *lf solver* dalam *software CST Studio Suite*, langkah selanjutnya adalah melakukan pengukuran langsung di saluran transmisi 500 kV. Pengukuran dilakukan di saluran transmisi 500 kV krian - gresik yang melewati Surabaya tepatnya di Surabaya bagian barat. Pengukuran langsung dilakukan dengan menggunakan alat ukur medan magnet *ELF Field Strength Measurement System* produksi Holaday Industries Inc. dengan tipe alat ukur HI-3604.

Langkah pertama pengukuran medan magnet adalah mengukur jarak yang akan diukur. Jarak pengukuran disesuaikan dengan jarak yang ada di pemodelan simulasi saluran transmisi. Setelah mendapatkan nilai-nilai medan magnet pada titik-titik yang sudah ditentukan dengan menggunakan simulasi *lf solver* dalam *software CST Studio suite* dan pengukuran langsung di Gardu Induk Driyorejo, kita dapat membandingkan nilai-nilai medan magnet tersebut menggunakan grafik. Berikut hasil perbandingan simulasi dengan pengukuran ditunjukkan di tabel 4.

Tabel 4.
Perbandingan Hasil Simulasi dengan Pengukuran

Jarak (meter)	Hasil Simulasi (Vs/m ²)	Pengukuran (Vs/m ²)
0	0,018	0,02
30	0,031	0,035
60	0,051	0,038
90	0,058	0,034
120	0,059	0,048
150	0,059	0,043
180	0,06	0,05

V. KESIMPULAN

Nilai medan magnet terbesar pada saluran transmisi terletak di bagian samping kanan dan kiri dari menara transmisi yaitu sebesar 0,83 Vs/m² dan yang terkecil terletak pada manusia yang berada di bawah konduktor yaitu sebesar 0,0187 Vs/m². Hal ini dikarenakan faktor penyusun bahan dan konduktifitas termal bahan, sehingga mengakibatkan efek polarisasi antar muka makroskopis (*macroscopic*

interface) yang dapat memperburuk sifat dielektrik bahan. Bahan *steel* pada menara transmisi menunjukkan nilai medan magnet yang lebih tinggi dibandingkan lainnya.

Pada simulasi terhadap operator (manusia) di bawah saluran transmisi didapatkan hasil bahwa nilai rata - rata yang terdapat di simulasi adalah $0,048 \text{ Vs/m}^2$, ini mengartikan bahwa manusia yang berada di sekitar tower transmisi melebihi ambang batas aman untuk intensitas medan magnet, karena batasan untuk manusia adalah $0,025 \text{ Vs/m}^2$ berdasarkan SNI 04-6950-2003. Dan ini akan berdampak jangka panjang terhadap kesehatan manusia.

Dari hasil perbandingan dapat dilihat nilai pengukuran langsung dengan simulasi tidak berbeda jauh. Nilai medan magnet berada dititik tertingginya pada saat 180 meter yang terletak di tengah saluran transmisi atau tepat di bawah konduktor dengan jarak terendah yaitu sebesar $0,06 \text{ Vs/m}^2$ pada hasil simulasi dan $0,05 \text{ Vs/m}^2$ pada hasil pengukuran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tobing, Bonggas L., 2003, "*Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*," Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- [2] Vassiliki T. Kontargyri, Ioannis F. Gonos, Ioannis A. Stathopoulos, and Alex M. Michaelides, "*Simulation of the Electric Field on High Voltage Insulators using the Finite Element Method*", IEEE 2006.
- [3] Sani Ugustra, "*Kajian Kuat Medan Listrik Pada Konfigurasi Vertikal Saluran Transmisi 150kV*", 2015
- [4] SPLN 121, "*Konstruksi Saluran Udara Tegangan Tinggi 70 KV dan 150KV dengan Tiang Beton/Baja*", Jakarta, 1996.
- [5] Bunmat A., P.Pao-la-or, "*Analysis of Magnetic Field Effects Operators Working a Power Transmission Line Using 3D Finite Element Method*", Thailand, 2015
- [6] Hitoshi Kusuma Putra, "*Analisis Pengaruh Medan Listrik Isolator Terhadap Tower Distribusi Saat Terkena Tegangan Tinggi dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga*", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [7] Hayt William H. And John A. Buck, "*Elektromagnetika Edisi Ketujuh*", Penerbit Erlangga, Januari 2006.
- [8] Yusrizal Afif, "*Analisis Distribusi Medan Listrik Pada Isolator Gantung Bahan Polimer Menggunakan Finite Element Method*", Institut Teknologi Sepuluh November, 2014.