

# Perhitungan Kuat Medan Listrik di Bawah Saluran Transmisi 150 kV Menggunakan Metode Kawat Bayangan

Rio YUSDIZALI<sup>1</sup>, DINDA SINTIA DEWI<sup>1</sup>, DEWI AMALIA<sup>1</sup>, EGEY SWANDY JULIAN<sup>1</sup>, DHIMAS PRABOWO<sup>1</sup>, SEIGA ALGHIFARI<sup>1</sup>, dan MUHAMMAD ABU BAKAR SIDIK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Elektro, Universitas Sriwijaya, Palembang  
Penulis korespondensi: abubakar@unsri.ac.id

**ABSTRAK** - Saluran transmisi udara tegangan tinggi merupakan bagian penting yang tidak dapat dipisahkan dari jaringan kelistrikan. Untuk tujuan efisiensi maka diperlukan jaringan transmisi bertegangan tinggi. Saat ini jaringan transmisi di Pulau Sumatera menggunakan dua tegangan berbeda yaitu 150 kV dan 275 kV. Saluran udara tegangan tinggi ini mengakibatkan munculnya radiasi gelombang elektromagnetik yang menyebar di sekitar saluran transmisi. Karena radiasi ini berada dalam frekuensi gelombang radio, maka ia dapat mengakibatkan terpengaruhnya kinerja peralatan yang berada di sekitar saluran transmisi tersebut. Dalam materi pembelajaran Mata Kuliah Teknik Tegangan Tinggi mahasiswa diberikan pemahaman tentang adanya medan listrik yang diakibatkan oleh saluran tegangan tinggi. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menghitung besarnya medan listrik yang terjadi karena adanya sumber tegangan tinggi adalah dengan Metode Kawat Bayangan. Walaupun secara teori metode ini sudah banyak dijelaskan, akan tetapi visualisasi secara tiga dimensi berdasarkan hasil perhitungan menggunakan Metode Kawat Bayangan belum ditemukan pada buku-buku rujukan Teknik Tegangan Tinggi. Makalah ini memaparkan hasil perhitungan kuat medan listrik di bawah saluran transmisi 150 kV menggunakan komputer yang selanjutnya digambarkan dalam bentuk grafik tiga dimensi.

**Kata Kunci:** Transmisi, Tegangan Tinggi, Kawat Bayangan

**ABSTRACT** - High-voltage air transmission lines are an important part that cannot be separated from the electrical network. For efficiency purposes, a high-voltage transmission network is required. Currently the transmission network on the island of Sumatra uses two different voltages, namely 150 kV and 275 kV. This high-voltage overhead line results in the emergence of electromagnetic wave radiation that spreads around the transmission line. Since this radiation is in the radio frequency band, it can affect the performance of equipment in the vicinity of the transmission line. In the learning material of the High Voltage Engineering Course, students are given an understanding of the existence of an electric field caused by a high voltage line. One method that can be used to calculate the magnitude of the electric field that occurs due to the presence of a high voltage source is the Shadow Wire Method. Although in theory this method has been widely explained, three-dimensional visualization based on the results of calculations using the Wire Shadow Method has not been found in reference books on High Voltage Engineering. This paper describes the results of the calculation of the electric field strength under a 150 kV transmission line using a computer which is then described in the form of a three-dimensional graph.

**Keywords:** Transmission, High Voltage, Wire with long shadow

## I. PENDAHULUAN

Karena semakin meningkatnya kebutuhan energi tenaga listrik untuk berbagai keperluan, kecenderungan penggunaan saluran transmisi udara tegangan tinggi (SUTT) di Indonesia semakin meningkat [1]. Hal ini dilakukan untuk memperbesar kemampuan dari saluran yang berbanding lurus dengan kuadrat jarak, juga memperkecil rugi-rugi daya dari pusat-pusat pembangkit ke pusat-pusat beban yang relatif berjauhan [2].

SUTT merupakan sumber interferensi elektromagnetik yang sangat potensial. Gelombang elektromagnetik ini akan dapat mempengaruhi kehidupan dan unjuk kerja peralatan-peralatan yang ada disekitarnya [3]–[5]. Sehingga akan terasa adanya suatu bentuk pancaran radiasi dari saluran tersebut.

Jika peralatan tersebut merupakan suatu peralatan penerima gelombang elektromagnetik maka radiasi yang tidak diinginkan tersebut dapat mengganggu sinyal gelombang elektromagnetik yang sebenarnya [6].

Sehingga penerimaan sinyal tersebut dapat terganggu yang mengakibatkan kegagalan operasi atau kesalahan operasi, atau mungkin rusak sama sekali.

Untuk itu perlu dilakukannya penelitian tentang besarnya tingkat radiasi atau kuat medan yang ditimbulkan oleh saluran tegangan tinggi tersebut. Penelitian ini dilakukan pada SUTT 150 kV Bukit Asam – Palembang. Perhitungan kuat medan listrik dilakukan antara menara no 379 dan 380 di Indralaya OKI, SUTT yang diukur mempunyai ketinggian 34,15 m dan 30,40 m dari permukaan tanah. Terdapat beberapa metode perhitungan kuat medan listrik salah satunya adalah menggunakan metode kawat bayangan. Dengan menggunakan metode kawat bayangan dapat diperoleh visualisasi grafik tiga dimensi dari kuat medan listrik yang ada disekitar SUTT dengan ketinggian 1,0 m dari permukaan tanah.

## II. PERHITUNGAN KUAT MEDAN LISTRIK

Dalam menghitung dampak SUTT terdapat beberapa teori perhitungan kuat medan elektromagnetik yang dikembangkan baik secara analitik atau numerik. Salah satu metode yang banyak terdapat di dalam buku teks teknik tegangan tinggi adalah metode kawat bayangan [7], [8]. Metode kawat bayangan adalah metode perhitungan kuat medan listrik yang berbasiskan nilai sumber tegangan tanpa melihat jenis sumber tegangan.

### A. Medan Listrik

Suatu medan listrik ( $E$ ) mula-mula berasal dari suatu potensial AC antara dua buah titik. Medan listrik adalah medan-medan impedansi tinggi karena besarnya tegangan antara titik-titik. Jadi, perbandingan  $V/l$  sangat besar berkenaan dengan impedansi udara bebas. Karakteristik penting dari medan listrik ini adalah ia mampu mengkopel energi ke dalam rangkaian korban dengan arus injeksinya.

### B. Metode Perhitungan Kuat Medan Listrik

Pada metode analitik untuk SUTT yang menggunakan konduktor berkas pada setiap phasanya terlebih dahulu harus dicari jari-jari pengganti untuk kapasitansi yang sama dari konduktor berkas, dengan demikian konduktor berkas dapat dianggap sebagai konduktor tunggal. Kemudian dengan menggunakan jari-jari pengganti konduktor berkas tersebut dicari muatan listrik persatuan panjang untuk setiap fasa dari saluran daya. Selanjutnya ditentukan kuat medan listrik untuk titik-titik tertentu dibawah SUTT

### C. Jari-jari Pengganti Konduktor Berkas

Untuk menentukan jari-jari pengganti konduktor berkas dapat digunakan persamaan berikut :

$$R_e = (R \cdot N \cdot A^{N-1})^{1/N} \quad (1)$$

Dimana,  $R$  adalah jari-jari sub konduktor,  $N$  adalah jumlah sub-konduktor dalam satu berkas,  $A$  adalah  $d/2 \sin \pi / N$ , untuk  $N > 1$ , dan  $d$  adalah jarak antara setiap sub-konduktor yang berurutan.

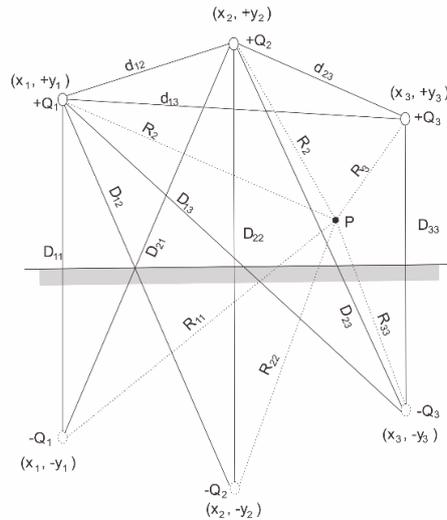
### D. Muatan Setiap Fasa dari Saluran Transmisi

Misalkan saluran transmisi tiga fasa dengan konfigurasi konduktor seperti Gambar 1. Masing-masing konduktor bermuatan garis  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  dan muatan bayangannya  $-Q_1$ ,  $-Q_2$ ,  $-Q_3$  C/m. Potensial di titik  $P$  yang disebabkan oleh muatan garis di tanah adalah

$$V = - \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0} \ln R_{i1} \quad (2)$$

Dengan menggunakan persamaan (2) untuk konfigurasi saluran seperti pada Gambar 1, potensial di titik  $P(x_p, y_p)$  di atas permukaan tanah diperoleh

$$V_p = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_{11}}{R_1} + \frac{Q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_{22}}{R_2} + \frac{Q_3}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_{33}}{R_3} \quad (3)$$



Gambar 1. Saluran transmisi tiga fase dengan bayangannya

Jika titik P ( $x_p, y_p$ ) dipilih pada permukaan konduktor 1, potensial  $V_p$  sama dengan potensial  $V_1$  dan diperoleh

$$V_1 = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{11}}{d_{11}} + \frac{Q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} + \frac{Q_3}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{13}}{d_{13}} \tag{4}$$

Dengan cara yang sama seperti di atas didapat :

$$V_2 = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{21}}{d_{21}} + \frac{Q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{22}}{d_{22}} + \frac{Q_3}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{23}}{d_{23}} \tag{5}$$

$$V_3 = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{31}}{d_{31}} + \frac{Q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{32}}{d_{32}} + \frac{Q_3}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{33}}{d_{33}} \tag{6}$$

Secara umum persamaan-persamaan di atas dapat ditulis

$$V_i = \sum_{j=1}^k \frac{Q_j}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \tag{7}$$

Dimana,  $i, j$  adalah bilangan numerik  $1, 2, 3, \dots, k$ ;  $V_i$  adalah tegangan masing-masing konduktor (V);  $Q_i$  adalah muatan masing-masing konduktor (C/m) untuk  $i = j$ ;  $D_{ij}$  adalah jarak antara konduktor dan bayangannya (m);  $d_{ij}$  adalah jari-jari konduktor (m) Untuk  $i \neq j$ ;  $D_{ij}$  adalah jarak antara konduktor  $i$  dan bayangannya  $j$  (m)  $= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ ; dan  $d_{ij}$  adalah jarak antara konduktor  $i$  dan  $j$  (m)  $= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ .

Persamaan (7) juga dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_i = P_{i1}Q_1 + P_{i2}Q_2 + \dots + P_{ij}Q_j \tag{8}$$

Denga  $P_{ij}$ , apabila  $i = j$  disebut koefisien potensial sendiri, sedangkan apabila  $i \neq j$  maka disebut koefisien potensial bersama.

Dalam notasi matrik persamaan (8) dapat ditulis:

$$[V] = [P][Q] \tag{9}$$

Invers dari persamaan (9) adalah:

$$[Q] = [C][V]$$

Dengan

$$[C] = [P]^{-1} \quad (10)$$

Apabila diuraikan persamaan (10) akan menjadi:

$$Q_i = C_{i1}V_1 + C_{i2}V_2 + \dots C_{ij}V_j \quad (11)$$

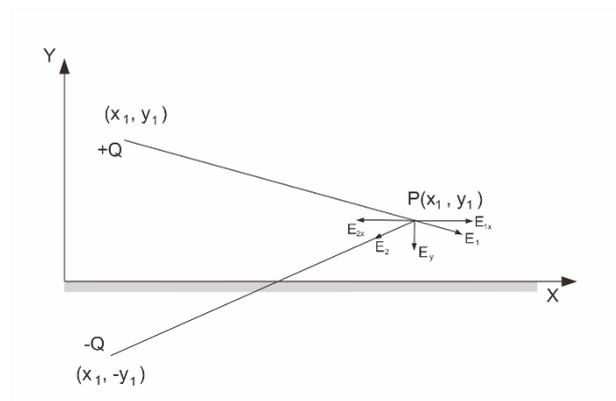
Dimana  $C_{ij}$ , apabila  $i = j$  disebut koefisien kapasitansi sendiri, sedangkan apabila  $i \neq j$  maka disebut koefisien kapasitansi bersama.

#### E. Kuat Medan Listrik di bawah Saluran Transmisi

Perhatikan sebuah konduktor horizontal seperti Gambar 2, kuat medan listrik di suatu titik ditentukan dengan menganggap bahwa konduktor tersebut sebagai muatan garis adalah

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{a_{R1}}{R_1} - \frac{a_{R2}}{R_2} \right) \quad (8)$$

Dimana,  $R_1, R_2$  adalah Jarak titik yang akan dicari kuat medannya dan  $a_{R1}, a_{R2}$  adalah vektor satuan dengan arah  $R_1$  dan  $R_2$ .



Gambar 2. Kuat medan listrik pada suatu konduktor

Jika kuat medan listrik tersebut diuraikan menjadi komponen-komponen vertical dan horizontal akan didapat Komponen horizontal :

$$E_x = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{(x_2 - x_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} - \frac{(x_2 - x_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 + y_1)^2} \right] \quad (9)$$

Komponen vertical :

$$E_y = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} - \frac{(y_2 + y_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 + y_1)^2} \right] \quad (10)$$

Pada permukaan tanah,  $y_2 = 0$ . Komponen horizontal akan sama dengan nol, sedangkan komponen vertikal adalah :

$$E_y = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{-y_1}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2)^2} - \frac{y_1}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2)^2} \right] \quad (10)$$

Apabila terdapat  $n$  buah konduktor, maka kuat medan pada titik  $P(x_p, y_p)$  adalah :

$$E_y = E_{px} + E_{py} \quad (11)$$

Dimana :

$$E_{px} = \sum_{n=1}^m \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{(x_p - x_n)}{(x_p - x_n)^2 + (y_p - y_n)^2} - \frac{(x_p - x_n)}{(x_p - x_n)^2 + (y_p + y_n)^2} \right] \tag{11}$$

$$E_{py} = \sum_{n=1}^m \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{(y_p - y_n)}{(x_p - x_n)^2 + (y_p - y_n)^2} - \frac{(y_p - y_n)}{(x_p - x_n)^2 + (y_p + y_n)^2} \right] \tag{12}$$

### III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dibagi kepada beberapa tahapan yaitu studi pustaka, pembuatan program perhitungan dan visualisa 3D dengan menggunakan komputer.

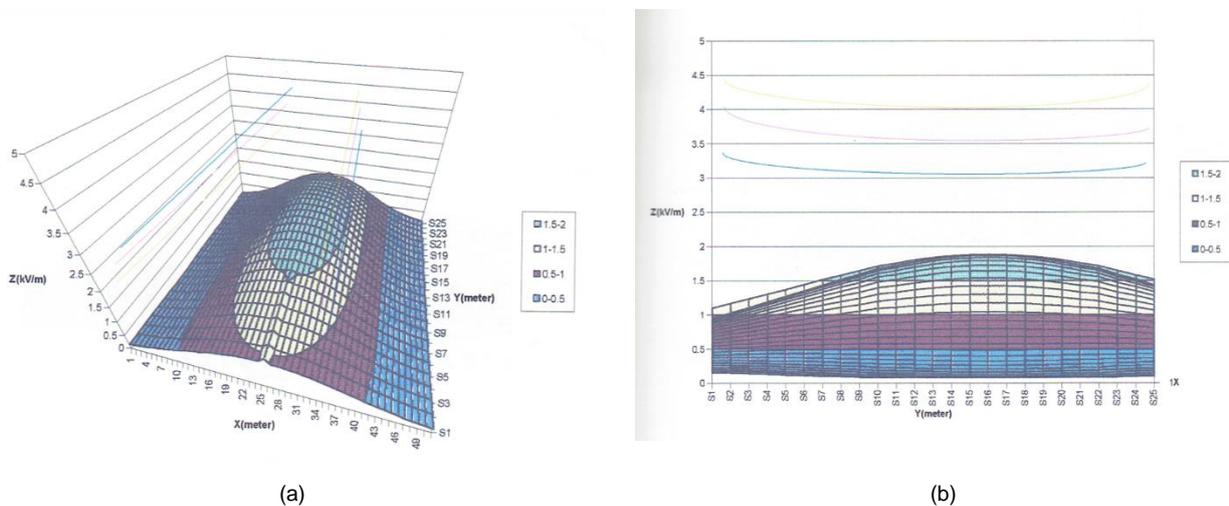
Studi pustaka dilakukan untuk mengumpulkan informasi dampak dari medan elektromagnetik yang ditimbulkan oleh SUTT, teori perhitungan yang berkaitan, spesifikasi SUTT (konduktor dan menara) dan cara penggunaan alat ukur.

Menara yang digunakan pada SUTT 150 kV Bukit Asam Palembang sebanyak 444 menara dengan daerah peninggian dan penurunan standar 3,0 m (-3,0 m, ±0,0 m, ±3,0 m, +6,0 m, 9,0 m) tergantung dengan kondisi daerah yang akan dilalui. Menara tersebut terdiri dari tiga tipe yaitu (a) tipe AA 402 buah menara, digunakan pada saluran yang lurus (*straight line*); (b) tipe BB 23 buah menara, digunakan pada saluran yang membentuk sudut pertengahan (*medium angle*); dan (c) tipe CC 19 buah menara, digunakan pada saluran yang membentuk sudut besar dan pada ujung saluran (*large angle and dead angle*).

Untuk dapat melakukan perhitungan kuat medan listrik yang akurat dan efisien – menggunakan metode kawat bayangan – maka perlu diperlukan komputer dan perangkat lunak pemrograman. Bahasa yang digunakan pada pembuatan program perhitungan adalah bahasa pemrograman pascal. Hasil perhitungan kemudian divisualisasikan kepada grafik tiga dimensi.

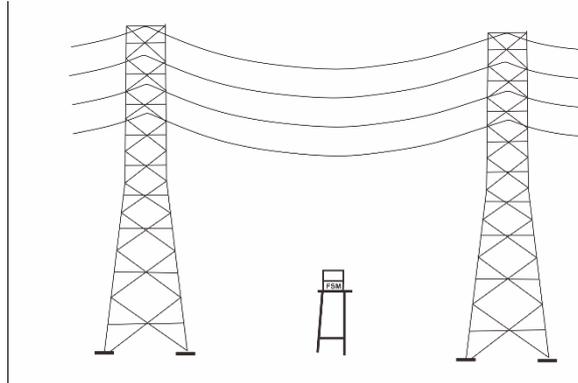
### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada perhitungan ini diasumsikan bahwa tegangan pada SUTT adalah stabil dengan tegangan puncak sebesar 150 kV. Gambar 3 memperlihatkan hasil perhitungan kuat medan listrik menggunakan metode kawat bayangan. Medan listrik tertinggi adalah terdapat pada bagian *sagging* terendah dari SUTT yaitu mendekati 2,0 kV/m. Pada titik-titik yang menjauhi secara vertikal terhadap SUTT maka didapat bahwa kuat medan listrik adalah semakin menurun. Hal ini sesuai dengan beberapa penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan [9]–[12]. Selanjutnya pada titik-titik yang menjauhi *sagging* terendah secara horizontal terlihat bahwa kuat medan listrik juga semakin menurun hal ini dikarenakan jarak dari SUTT yang semakin jauh. Bagaimanapun juga metode kawat bayangan tidak memperhitungkan pengaruh induksi dari menara SUTT, karena itu pada perhitungan ini tidak dapat dilihat pengaruh menara tersebut terhadap kuat medan listrik disekitarnya.



Gambar 3 .Hasil Perhitungan kuat medan listrik dibawah SUTT 150 kV Bukit Asam – Palembang antara menara 379 dan 380 (a) dilihat dari sisi depan (b) dilihat dari sisi samping

Untuk melihat keakuratan hasil pengukuran maka dilakukan validasi yaitu dengan membandingkan hasil perhitungan dengan hasil pengukuran. Pengukuran dilakukan menggunakan field strength meter FSM M-262E yang diletakkan di atas sebuah meja dengan ketinggian 1,0 m dari permukaan tanah. Penempatan alat pada SUTT adalah seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.

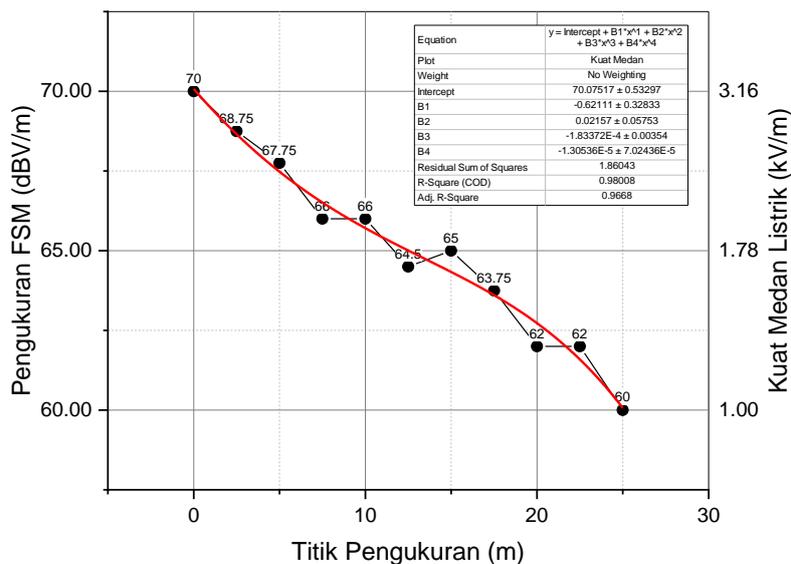


Gambar 4. Metode pengukuran kuat medan listrik dengan Field Strength Meter

FSM M-262E menggunakan menerima gelombang elektromagnetik melalui *loop antenna*. Pengukuran dilakukan pada awal malam hari, dengan pengamati waktu dimana terjadinya beban puncak. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan peralatan FSM M-262E sinyal terkuat berada pada frekuensi 225 kHz. Hasil pengukuran ini kemungkinan besar adalah bersumber dari korona yang timbul pada saluran transmisi tersebut. Gambar 4 memperlihatkan hasil pengukuran yang dilakukan pada pukul 18.30 – 20.00 wib; suhu 30°C. Pengukuran hanya dilakukan pada titik dari satu sisi SUTT bermula dari titik tengah menara SUTT karena kedua jalur SUTT adalah identic.

Data hasil pengukuran dianalisis menggunakan regresi *Polynomial Fit*, seperti diperlihatkan pada Gambar 4. Terlihat bahwa pola gelombang hasil pengukuran dan perhitungan adalah sama, dimana semakin menjauhi SUTT maka kuat medan listrik akan semakin menurun hal ini sesuai dengan teori bahwa kuat medan listrik sangat dipengaruhi oleh jarak dari sumber ke titik pengukuran  $E = -\nabla V$ .

Bagaimanapun juga, didapati bahwa hasil pengukuran tertinggi adalah berbeda dengan hasil perhitungan. Hal ini karena hasil pengukuran dipengaruhi oleh meningkatnya beban pengguna – dimana pengukuran dilakukan pada saat beban puncak – sehingga korona yang terjadi pada SUTT juga meningkat. Sedangkan alat ukur FSM mengukur kuat medan elektromagnetik yang berasal dari SUTT jadi komponen yang masuk kepada alat ukur bukan hanya medan listrik tetapi juga medan magnet. *Uncertainty* alat ukur dapat juga adalah penyebab terjadinya perbedaan hasil pengukuran dan perhitungan kuat medan listrik.



Gambar 5. Hasil pengukuran kuat medan listrik.

## V. KESIMPULAN

Grafik tiga dimensi kuat medan listrik berdasarkan perhitungan menggunakan metode kawat bayangan telah dapat dihasilkan. Hasil penelitian ini bisa dimanfaatkan untuk memberikan informasi pendahuluan berkaitan perencanaan pemasangan SUTT. Sedangkan untuk mahasiswa – khususnya mahasiswa konsentrasi teknik tenaga listrik – hasil ini dapat memberikan pencerahan berkaitan dengan penerapan teori pada buku teks kepada aplikasi di dunia ketenaga listrikan. Penelitian ini juga telah menampilkan hasil pengukuran menggunakan salah satu alat *field strength meter*, walaupun alat ini mungkin tidak sepenuhnya sesuai untuk mengukur kuat medan listrik pada SUTT akan tetapi terbukti alat ini dapat mengukur radiasi elektromagnetik yang disebabkan oleh korona yang berlaku pada SUTT.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. G. H. Mangunkusumo, A. A. Kusuma, and B. S. Munir, "A case study of mutual impedance effect in parallel transmission lines under maintenance condition," in 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2018, pp. 192–195.
- [2] S. Manjang, Y. George, and I. Kitta, "Analysis of power losses of the 150 kV transmission using Poynting vector," in 2012 International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), 2012, pp. 1–4.
- [3] H. Das, K. Gogoi, and S. Chatterjee, "Analysis of the effect of electric field due to High Voltage Transmission lines on humans," in 2015 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN), 2015, pp. 1–4.
- [4] U. Khayam, R. Prasetyo, and S. Hidayat, "Electric field analysis of 150 kV compact transmission line," in 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), 2017, pp. 424–427.
- [5] F. Wang, W. Wang, Z. Jiang, and X. Zhao, "Analysis of the Line-Frequency Electric Field Intensity around EHV Transmission," in 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010, pp. 3343–3346.
- [6] A. I. Sidorov, I. S. Okrainskaya, and S. P. Gladyshev, "Measurement of super high voltage transmission line electric field effecting on the environment," in 2011 IEEE International Conference on Electro/Information Technology, 2011, pp. 1–4.
- [7] A. A. Al-Arainy, M. I. Qureshi, and N. H. Malik, *Fundamentals of High Voltage Engineering*. 2005.
- [8] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. B. T.-H. V. E. F. (Second E. Kuffel, Eds., "Front Matter," Oxford: Newnes, 2000, p. iii.
- [9] M. A. B. Sidik et al., "Induced voltage on objects under six-phase transmission line," in TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference, 2011, pp. 968–970.
- [10] K. M. Srinivasa et al., "Field measurements of electric and magnetic fields on HV and EHV transmission lines and substations," in Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.98CH36239), 1998, vol. 2, pp. 347–350 vol.2.
- [11] F. R. Sabino, G. G. Machado, M. T. de Melo, and L. H. A. de Medeiros, "Measurements of electric field due to power line communication: The influence of the soil electric parameters," in 2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015, pp. 1–4.
- [12] R. Maruthi, K. Karunakara, M. K. Kumari, K. M. Srinivasa, and Channakeshava, "Computation and measurement of AC electric and magnetic field lateral profiles and longitudinal contours under transmission lines," in Proceedings 1995 International Conference on Energy Management and Power Delivery EMPD '95, 1995, vol. 1, pp. 209–214 vol.1.