

# Optimalisasi Konfigurasi Fasa Vertikal Pada Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi

Ruwahjoto<sup>a)</sup>, Dhimas Dhesah Kharisma<sup>\*b)</sup>, Mochammad Mieftah<sup>a)</sup>, Aly Imron<sup>a)</sup>

(Received 31 Desember 2024 || Revised 6 Februari 2025 || Published 28 Februari 2025)

**Abstract:** The dangers arising from the 500 kV extra high voltage overhead lines to the surrounding environment can actually be minimized in several ways. One of the methods is to change the configuration of the conductor arrangement. Based on the laws in field theory which state that the magnitude of the field quantity on a charged conductor can differ depending on the distance, area, or volume, an analysis was carried out to understand the effect of the phase arrangement on the electric field intensity under the 500 kV overhead transmission line. The Finite Difference Method uses a numerical approximation to the partial derivative of the differential equation describing the electric field. The use of the Hybrid Tower combines vertical and horizontal designs to achieve a balance between low electric fields and land efficiency. Of the 36 combinations of phase arrangements on transmission lines with a double-circuit vertical configuration, there is a large variation in the resulting field intensity. Information on the phase arrangement that produces the smallest field intensity is very important. The arrangement of 36 (arrangement T1-S1-R1: T2-S2-R2) produces the lowest electric field intensity. Compared with the superbundle arrangement (arrangement R1-S1-T1: R2-S2-T2), there is a decrease in field intensity of up to 45.842%, while compared with the low reactance arrangement (arrangement R1-S1-T1: T2-S2-R2), there is a decrease in field intensity of up to 33.374%.

**Keywords:** Vertical Phase, Field Intensity, superbundle arrangement

## 1. Pendahuluan

Dalam sistem tenaga listrik, efisiensi transmisi listrik menjadi aspek krusial untuk memastikan keandalan dan kontinuitas pasokan listrik. Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi transmisi adalah dengan menggunakan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET), yang berperan dalam menghubungkan pusat pembangkit listrik dengan pusat konsumsi. Salah satu permasalahan utama yang muncul dalam sistem transmisi tegangan ekstra tinggi adalah intensitas medan listrik yang tinggi di sekitar jalur transmisi. Radiasi medan listrik dari SUTET dapat menyebabkan gangguan elektromagnetik, meningkatkan risiko efek kesehatan bagi manusia, serta menimbulkan potensi gangguan pada perangkat elektronik di sekitarnya [1], [2], [3], [4]. Oleh karena itu, penelitian mengenai optimalisasi konfigurasi fasa vertikal dalam SUTET menjadi sangat penting guna mengurangi dampak negatif medan listrik yang dihasilkan.

Beberapa penelitian terdahulu telah meneliti dampak konfigurasi penghantar terhadap intensitas medan listrik pada sistem transmisi tegangan tinggi. Studi yang dilakukan oleh Rosyidi AS et al. [5] menunjukkan bahwa perubahan susunan konduktor dapat memengaruhi distribusi medan listrik di sekitar jalur transmisi. Utoyo et al. [6] menganalisis pengaruh medan magnet *Extremely Low Frequency* (ELF) dari SUTET terhadap kesehatan manusia, menunjukkan adanya peningkatan risiko penyakit akibat paparan medan magnet yang berlebihan. Selain itu, penelitian Miftakhudin et al. [7] menyoroti pentingnya perancangan konfigurasi saluran untuk meminimalkan efek medan listrik pada lingkungan. Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah memberikan wawasan penting, masih terdapat kesenjangan dalam memahami konfigurasi optimal yang dapat secara efektif mengurangi intensitas medan listrik tanpa mengorbankan efisiensi sistem transmisi.

Gap dalam penelitian ini terletak pada kurangnya kajian spesifik mengenai optimalisasi konfigurasi fasa vertikal dalam sistem transmisi tegangan ekstra tinggi 500 kV. Studi sebelumnya sebagian besar berfokus pada perubahan susunan konduktor dalam konfigurasi horizontal [8], [9], sedangkan dampak konfigurasi vertikal masih belum diteliti secara komprehensif.

Selain itu, belum banyak penelitian yang mengeksplorasi bagaimana kombinasi berbagai susunan fasa dapat mempengaruhi distribusi medan listrik di bawah jalur transmisi. Dengan demikian terdapat kebutuhan untuk melakukan analisis yang lebih mendalam mengenai strategi optimal dalam menentukan konfigurasi fasa vertikal yang dapat mengurangi intensitas medan listrik secara signifikan.

Kebaruan dalam penelitian yaitu optimalisasi konfigurasi fasa vertikal dengan mempertimbangkan berbagai parameter teknis yang berpengaruh terhadap distribusi medan listrik. Dengan menggunakan metode Perbedaan Hingga (*Finite Difference Method/FDM*), penelitian ini akan mensimulasikan berbagai konfigurasi susunan fasa untuk menemukan kombinasi terbaik yang dapat meminimalkan intensitas medan listrik. Optimalisasi konfigurasi fasa vertikal adalah bagian dari banyak pertimbangan yang harus dilakukan dalam merancang sistem transmisi listrik yang efisien secara keseluruhan. Terdapat berbagai faktor teknis, ekonomi, dan lingkungan yang harus dipertimbangkan secara bersamaan dalam mengembangkan sistem transmisi yang optimal dan efisien. Keberadaan SUTET 500 kV yang merupakan bagian vital dari interkoneksi listrik antara Jawa dan Bali, terletak di kota Gresik. Wilayah sekitar jalur ini memperlihatkan adanya kawasan industri yang signifikan serta merupakan tempat tinggal bagi sejumlah besar penduduk [4].

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh konfigurasi fasa vertikal terhadap intensitas medan listrik di sekitar SUTET 500 kV. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk (1) mengidentifikasi konfigurasi fasa vertikal yang menghasilkan medan listrik terendah, (2) menganalisis distribusi medan listrik pada berbagai susunan fasa dalam sistem transmisi tegangan ekstra tinggi, dan (3) mengembangkan strategi optimal dalam perancangan konfigurasi penghantar guna meningkatkan efisiensi dan keamanan sistem transmisi. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam desain dan perencanaan jaringan transmisi listrik yang lebih efektif serta ramah lingkungan.

## 2. Metode

Alur penelitian ini digambarkan di diagram alir seperti di Gambar 2.1. Penelitian diawali dengan tahap perencanaan dan

\*Korespondensi: Korespondensi: [dhimasdk@polinema.ac.id](mailto:dhimasdk@polinema.ac.id)

a) Prodi Teknik Listrik, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

b) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

identifikasi masalah yang ditandai dengan langkah "Mulai". Fokus utama penelitian ini adalah untuk memahami bagaimana perubahan konfigurasi fasa vertikal dalam sistem transmisi tegangan ekstra tinggi dapat mempengaruhi distribusi medan listrik di lingkungan sekitar. Langkah berikutnya dalam penelitian ini adalah melakukan studi terhadap sistem transmisi yang beroperasi di Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) Gresik. GITET ini berperan sebagai pusat distribusi tenaga listrik dalam jaringan interkoneksi, sehingga karakteristik teknis dan parameter sistem transmisinya menjadi dasar dalam perhitungan simulasi. Setelah itu penelitian dilanjutkan dengan analisis diameter konduktor penghantar serta konfigurasi susunan penghantar dalam sistem transmisi. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh susunan konduktor terhadap distribusi medan listrik, karena perubahan dalam diameter dan posisi penghantar dapat menyebabkan perbedaan dalam intensitas medan listrik yang dihasilkan. Tahap selanjutnya adalah perhitungan intensitas medan listrik di sekitar jalur transmisi menggunakan metode numerik, dalam hal ini *Finite Difference Method* (FDM). Metode ini memungkinkan simulasi distribusi medan listrik berdasarkan parameter tegangan fasa, jarak antar konduktor, dan kondisi batas dari sistem transmisi [10]. Setelah distribusi medan listrik dihitung, dilakukan analisis lebih lanjut terhadap profil medan listrik lateral dari beberapa konfigurasi susunan fasa vertikal. Analisis ini dilakukan untuk memahami bagaimana perubahan susunan fasa dapat mengurangi atau meningkatkan medan listrik di berbagai titik pengamatan di sekitar jalur transmisi. Setelah data numerik diperoleh, tahap berikutnya dalam diagram alir adalah analisis dan pembahasan. Pada tahap ini, hasil perhitungan dibandingkan dengan konfigurasi standar serta dikaitkan dengan penelitian sebelumnya yang relevan. Interpretasi hasil sangat penting dalam menentukan strategi optimal yang dapat digunakan dalam perancangan sistem transmisi listrik yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Setelah analisis selesai, penelitian berlanjut ke tahap penyusunan kesimpulan dan saran. Kesimpulan yang ditarik mencakup temuan utama mengenai konfigurasi fasa optimal yang dapat mengurangi intensitas medan listrik secara signifikan. Saran diberikan untuk pengembangan lebih lanjut, seperti peningkatan tinggi menara transmisi atau pemilihan jenis penghantar tertentu guna meminimalkan dampak medan listrik di permukaan tanah.

Penelitian ini menggunakan pendekatan numerik dengan metode perbedaan hingga (*Finite Difference Method*/FDM) untuk menganalisis distribusi medan listrik pada berbagai konfigurasi fasa vertikal dalam sistem transmisi tegangan ekstra tinggi 500 kV. Metode perbedaan hingga telah banyak digunakan dalam analisis medan listrik, seperti yang dilaporkan dalam penelitian oleh Abdelghani et al. [11] yang mengimplementasikan pendekatan serupa dalam simulasi distribusi medan listrik pada sistem isolasi tegangan tinggi. Selain itu, pendekatan ini juga diperkuat oleh penelitian Cambareri et al. [12] yang menunjukkan efektivitas metode numerik dalam mengurangi ketidakpastian dalam prediksi medan listrik di sekitar jalur transmisi. Keunggulan dari metode ini adalah kemampuannya untuk memberikan solusi numerik dengan akurasi tinggi dalam menganalisis medan listrik pada konfigurasi yang kompleks [13].

Dalam konteks optimalisasi konfigurasi fasa vertikal terhadap intensitas medan listrik dalam SUTET 500 kV, FDM digunakan untuk menghitung distribusi medan listrik berdasarkan hukum elektrostatik. Distribusi medan listrik di sekitar konduktor SUTET dapat dihitung menggunakan persamaan Laplace atau Poisson [14], [15] yang secara matematis dituliskan seperti pada (2-1).

[14], [15] yang secara matematis dituliskan seperti pada (2-1).

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2-1)$$

Atau dalam perbedaan hingga seperti pada (2-2)

$$\frac{V_{i+1,j}+V_{i-1,j}+V_{i,j+1}+V_{i,j-1}-4V_{i,j}}{h^2} = 0 \quad (2-2)$$

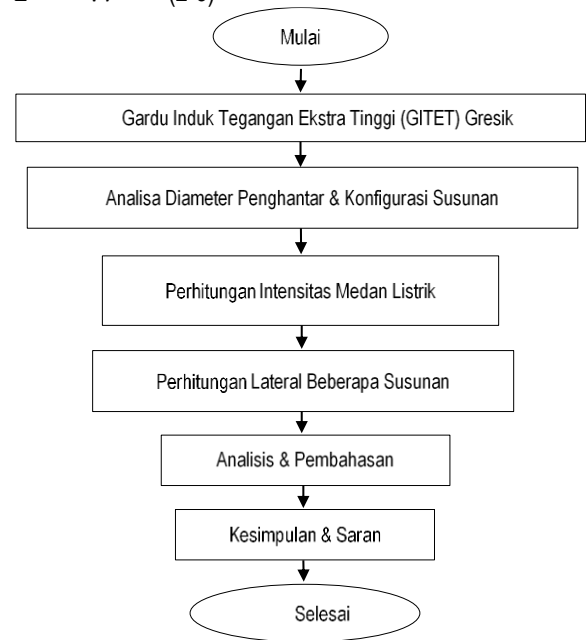
Keterangan:

$V_{i,j}$  = potensial listrik pada titik grid  $(i,j)(i,j)(i,j)$ ,

$h$  = adalah jarak antar-node dalam grid perhitungan,

Medan listrik diperoleh dari gradien potensial dihitung menggunakan (2-3).

$$E = -\nabla V \quad (2-3)$$



GAMBAR 2.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Dalam konteks optimalisasi konfigurasi fasa vertikal terhadap intensitas medan listrik dalam SUTET 500 kV, FDM digunakan untuk menghitung distribusi medan listrik berdasarkan hukum elektrostatik. Distribusi medan listrik di sekitar konduktor SUTET dapat dihitung menggunakan persamaan Laplace atau Poisson [14], [15] yang secara matematis dituliskan seperti pada (2-1).

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2-1)$$

Atau dalam perbedaan hingga seperti pada (2-2)

$$\frac{V_{i+1,j}+V_{i-1,j}+V_{i,j+1}+V_{i,j-1}-4V_{i,j}}{h^2} = 0 \quad (2-2)$$

Keterangan:

$V_{i,j}$  = potensial listrik pada titik grid  $(i,j)(i,j)(i,j)$ ,

$h$  = adalah jarak antar-node dalam grid perhitungan,

Medan listrik diperoleh dari gradien potensial dihitung menggunakan (2-3).

$$E = -\nabla V \quad (2-3)$$

Optimalisasi konfigurasi fasa vertikal dilakukan dengan menyusun domain perhitungan sebagai grid diskret di sekitar saluran transmisi, lalu menerapkan metode FDM untuk menyelesaikan distribusi medan listrik. Tegangan di setiap node dihitung berdasarkan nilai node tetangganya menggunakan skema perbedaan hingga. Kondisi batas (*Boundary Conditions*): konduktor dianggap sebagai sumber tegangan yang sudah diketahui. Tanah dianggap sebagai referensi potensial nol (ground). Daerah di luar sistem dianggap medan bebas.

Inisialisasi Grid menentukan ukuran domain perhitungan berdasarkan ketinggian tiang, jarak antar-konduktor, dan tinggi

permukaan tanah. Tegangan pada masing-masing konduktor sesuai dengan tegangan fasa SUTET 500 kV. Iterasi Perbedaan Hingga merapkan persamaan Laplace menggunakan metode Jacobi, Gauss-Seidel, atau *Successive Over-Relaxation* (SOR) untuk mendapatkan distribusi potensial listrik. Lanjutkan iterasi hingga konvergensi tercapai (nilai perubahan antara iterasi sangat kecil).

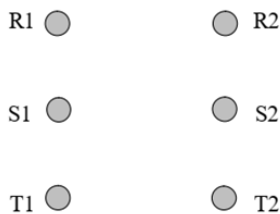
**3. Hasil dan Pembahasan**

**3.1 Jaringan SUTET 500kV Konfigurasi Vertikal Sirkuit Ganda**

Pada Saluran udara tegangan tinggi dan ekstra tinggi, termasuk untuk tegangan 500 kV, terdapat 2 macam konfigurasi susunan yang digunakan, yaitu:

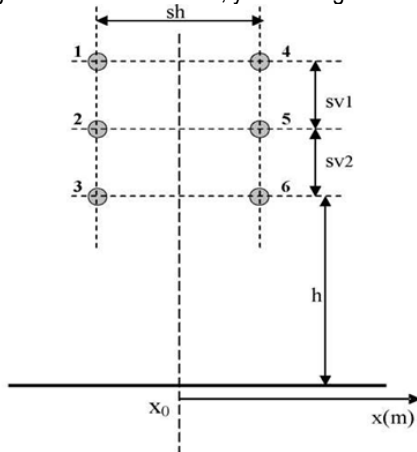
1. konfigurasi susunan sejajar (*Superbundle*) yang dalam penelitian ini didefinisikan oleh susunan 1;
2. konfigurasi susunan bersebrangan (*low-reactance*), yaitu susunan 6.

Susunan penghantar pada saluran dengan konfigurasi vertikal sirkuit ganda seperti pada Gambar 2.1 (dengan susunan 1 sebagai model).



**GAMBAR 3.1 SUSUNAN PENGHANTAR KONFIGURASI VERTIKAL SIRKIT GANDA (SUSUNAN 1)**

Dari Gambar 3.2 dapat ditentukan sketsa saluran untuk mengetahui parameter saluran yang terdiri dari data-data geometris dan data tegangan tiap penghantar dalam saluran untuk tiap konfigurasi susunan tertentu, yaitu sebagai berikut:



**GAMBAR 3.2 PROFIL SALURAN UDARA KONFIGURASI VERTIKAL SIRKIT GANDA**

Besar parameter-parameter saluran pada Gambar 3.2 antara lain:

- jarak horisontal antar sirkuit (sh) : 15 m;
- jarak vertikal antar susunan (sv) : 8,5 m;
- jarak saluran ke permukaan tanah (h) : 13,5 m.

Sedangkan data penghantar yang digunakan adalah:

- jumlah penghantar tiap berkas (n) : 4
- diameter sub penghantar (d) : 0,236 m
- jarak antar sub penghantar : 0,45 m

Besar tegangan penghantar, yaitu:

- V1 : VR1 = 288.675 +j0;
- V2 : Vsi = -144.338 — j 250;
- V3 : Vt1 = -144.338 + j250;
- V4 : VR2 = 288.675 +j0;
- V5 : VS2 = -144.338 — j 250;
- V6 : VT2 = -144.338 + j250.

**3.2 Profil Lateral Medan Listrik**

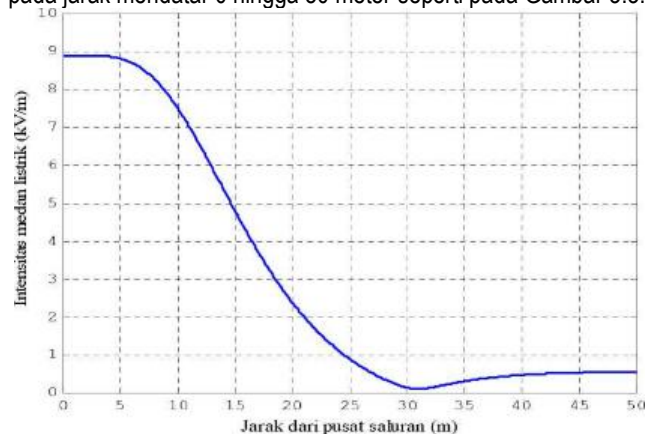
Parameter ini menunjukkan besar kuantitas medan yang dihasilkan oleh saluran transmisi pada daerah mendatar dari pusat saluran. Profil ini digunakan untuk mengetahui jarak aman dari induksi medan listrik pada manusia dan lingkungan sekitar sehingga bahaya akan induksi medan listrik dapat di minimalisir.

Dengan melakukan perhitungan yang sama untuk xN = 0-50 meter tiap 2 meter spasi jarak didapatkan tabel intensitas medan sebagai fungsi lateral terhadap jarak mendatar di permukaan tanah untuk susunan 1 seperti di Tabel 3.1.

**TABEL 3.1 PROFIL LATERAL SUSUNAN 1**

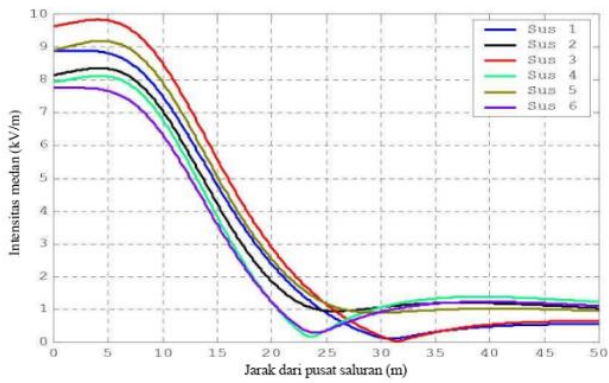
| xN (m) | E (kV/m) | xN (m) | E (kV/m) | xN (m) | E (kV/m) |
|--------|----------|--------|----------|--------|----------|
| 0      | 8.881    | 18     | 3.235    | 36     | 0.355    |
| 2      | 8.893    | 20     | 2.378    | 38     | 0.427    |
| 4      | 8.876    | 22     | 1.678    | 40     | 0.478    |
| 6      | 8.708    | 24     | 1.123    | 42     | 0.512    |
| 8      | 8.264    | 26     | 0.692    | 44     | 0.534    |
| 10     | 7.502    | 28     | 0.366    | 46     | 0.545    |
| 12     | 6.488    | 30     | 0.141    | 48     | 0.549    |
| 14     | 5.357    | 32     | 0.139    | 50     | 0.548    |
| 16     | 4.242    | 34     | 0.257    |        |          |

Dari Tabel 3.1 kemudian dapat diketahui profil lateral intensitas medan listrik yang dihasilkan saluran untuk konfigurasi susunan 1 pada jarak mendatar 0 hingga 50 meter seperti pada Gambar 3.3.

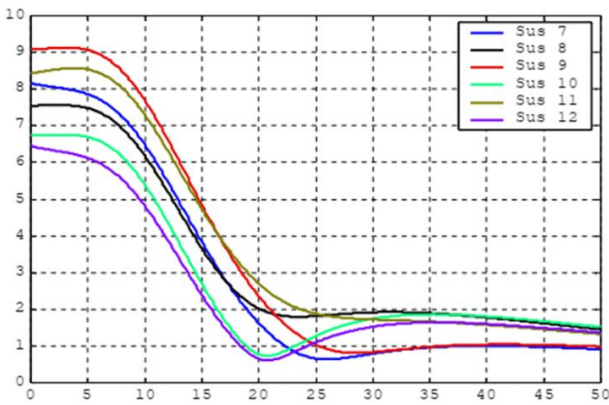


**GAMBAR 3.3 PROFIL LATERAL MEDAN LISTRIK UNTUK SUSUNAN 1**

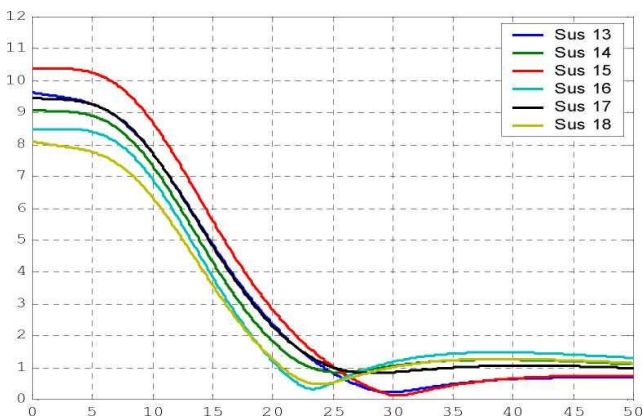
Profil lateral untuk seluruh konfigurasi susunan ditunjukkan dalam Gambar 3.4 - Gambar 3.9 dengan intensitas medan (kV/m) pada sumbu X dan jarak dari pusat saluran (m) pada sumbu Y.



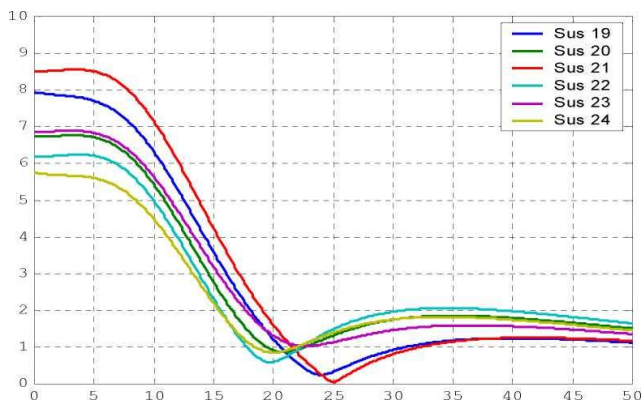
GAMBAR 3.4 PROFIL LATERAL MEDAN LISTRIK UNTUK SUSUNAN 1 s/d 6



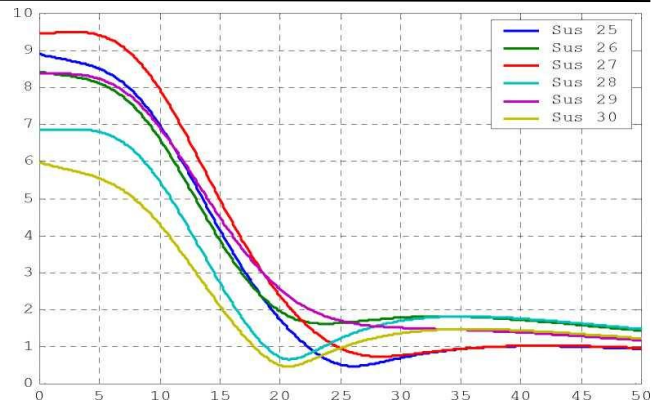
GAMBAR 3.5 PROFIL LATERAL MEDAN LISTRIK UNTUK SUSUNAN 7 s/d 12



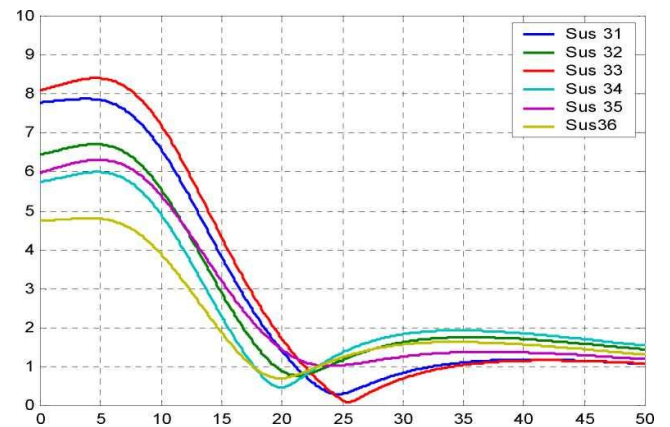
GAMBAR 3.6 PROFIL LATERAL MEDAN LISTRIK UNTUK SUSUNAN 13 s/d 18



GAMBAR 3.7 PROFIL LATERAL MEDAN LISTRIK UNTUK SUSUNAN 19 s/d 24



GAMBAR 3.8 PROFIL LATERAL MEDAN LISTRIK UNTUK SUSUNAN 25-30



GAMBAR 3.9 PROFIL LATERAL MEDAN LISTRIK UNTUK SUSUNAN 31-36

### 3.3 Pengaruh Saluran Terhadap Muatan Penghantar Fasa

Adanya penghantar lain dalam sebuah saluran udara akan mengakibatkan berubahnya muatan sebuah penghantar. Besar muatan penghantar R1 jika dianggap penghantar tunggal, seperti Tabel 3.2.

TABEL 3.2 PENGARUH PENGHANTAR LAIN DALAM SALURAN TERHADAP MUATAN SUATU PENGHANTAR FASA (%) UNTUK KONFIGURASI SUSUNAN 1

| Penghantar Fasa | Pengaruh susunan 1 terhadap intensitas medan (%) |
|-----------------|--|
| R1              | 14.087   |
| S1              | 24.835   |
| T1              | 6.851  |
| R2              | 14.087   |
| S2              | 24.835   |
| T2              | 6.851  |

Dengan menggunakan proses yang sama didapatkan Tabel 3.3 pengaruh susunan 2 terhadap besar intensitas medan listrik tiap penghantar fasa pada pusat saluran transmisi dengan susunan 1 sebagai pembanding sebagai berikut:

TABEL 3.3 PENGARUH SUSUNAN FASA TERHADAP KUANTITAS MEDAN LISTRIK PENGHANTAR FASA (%) UNTUK KONFIGURASI SUSUNAN 2

| Penghantar Fasa | Pengaruh susunan 2 terhadap intensitas medan (%) |
|-----------------|--|
| R1              | -1.31202   |
| S1              | 3.469647   |
| T1              | 3.778396   |
| R2              | -1.31202   |
| S2              | 43.8237  |

T2

-25.3397

Untuk semua konfigurasi susunan dapat dilihat dalam Tabel 3.4.

**TABEL 3.4 PENGARUH SUSUNAN FASA TERHADAP INTENSITAS MEDAN DIBAWAH SUTET 500 kV**

| Susunan | Pengaruh konfigurasi susunan (%) | Susunan | Pengaruh konfigurasi susunan (%) |
|---------|----------------------------------|---------|----------------------------------|
| 2       | -5.932                           | 20      | -23.984                          |
| 3       | 10.654                           | 21      | -3.802                           |
| 4       | -8.63                            | 22      | -29.817                          |
| 5       | 3.303                            | 23      | -22.619                          |
| 6       | -12.468                          | 24      | -35.394                          |
| 7       | -8.309                           | 25      | 0.187                            |
| 8       | -14.99                           | 26      | -5.232                           |
| 9       | 2.54                             | 27      | 6.802                            |
| 10      | -24.144                          | 28      | -22.709                          |
| 11      | -3.619                           | 29      | -5.637                           |
| 12      | -27.533                          | 30      | -32.756                          |
| 13      | 8.353                            | 31      | -11.412                          |
| 14      | 2.072                            | 32      | -24.595                          |
| 15      | 16.833                           | 33      | -5.578                           |
| 16      | -4.438                           | 34      | -32.665                          |
| 17      | 6.39                             | 35      | -29.197                          |
| 18      | -8.951                           | 36      | -45.842                          |
| 19      | -10.745                          |         |                                  |

Nilai (+) pada Tabel 3.4 menunjukkan bahwa terjadi kenaikan intensitas medan listrik pada susunan tersebut, sebaliknya tanda (-) menunjukkan penurunan. Seperti tujuan penelitian ini maka dari Tabel 3.4 terlihat bahwa perubahan susunan fasa berpengaruh terhadap kuantitas medan listrik.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini membahas optimalisasi konfigurasi fasa vertikal terhadap intensitas medan listrik dalam Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV. Keberadaan medan listrik yang tinggi di sekitar jalur transmisi menimbulkan potensi gangguan bagi lingkungan dan kesehatan manusia, sehingga diperlukan strategi untuk mengurangi dampak tersebut tanpa mengorbankan efisiensi sistem transmisi. Salah satu pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan analisis terhadap berbagai konfigurasi fasa vertikal guna menentukan susunan penghantar yang menghasilkan medan listrik terendah. Dengan menggunakan Metode Perbedaan Hingga (*Finite Difference Method*, FDM), penelitian ini memberikan wawasan mendalam mengenai hubungan antara konfigurasi fasa dengan distribusi medan listrik di bawah jalur transmisi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi fasa vertikal memiliki pengaruh yang signifikan terhadap intensitas medan listrik di sekitar jalur transmisi. Dari berbagai kombinasi susunan yang diuji, konfigurasi T1-S1-R1 : T2-S2-R2 (Susunan 36) terbukti menghasilkan medan listrik terendah, dengan penurunan hingga 45,842% dibandingkan dengan konfigurasi standar (*superbundle arrangement*). Selain itu, penelitian ini juga menemukan bahwa distribusi medan listrik lateral menunjukkan penurunan signifikan pada jarak lebih dari 16 meter dari pusat saluran, di mana medan listrik berada di bawah ambang batas yang diperbolehkan menurut standar keselamatan. Temuan ini mengindikasikan bahwa optimalisasi konfigurasi fasa vertikal dapat menjadi solusi yang

efektif untuk meminimalkan dampak medan listrik pada lingkungan sekitar SUTET 500 kV.

Temuan penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menyoroti pengaruh konfigurasi penghantar terhadap distribusi medan listrik. Studi oleh Rosyidi et al. [5] mengindikasikan bahwa perubahan susunan konduktor dapat berdampak pada distribusi medan listrik, meskipun penelitian mereka lebih berfokus pada konfigurasi horizontal. Selain itu, penelitian Utoyo et al. [6] menyoroti dampak medan magnet *Extremely Low Frequency* (ELF) dari SUTET 500 kV terhadap kesehatan manusia, dan menyarankan strategi mitigasi untuk mengurangi paparan medan listrik di lingkungan sekitar jalur transmisi. Dalam konteks ini, hasil penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dengan menunjukkan bahwa optimalisasi konfigurasi fasa vertikal dapat menjadi salah satu strategi mitigasi yang efektif.

Meskipun hasil penelitian ini mendukung temuan penelitian sebelumnya dalam hal dampak konfigurasi penghantar terhadap medan listrik, terdapat beberapa perbedaan dalam pendekatan yang digunakan. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada aspek ketinggian tiang transmisi atau pengaruh medan magnet, sedangkan penelitian ini lebih spesifik dalam mengeksplorasi bagaimana variasi konfigurasi fasa vertikal dapat mengurangi intensitas medan listrik. Dengan demikian, penelitian ini memberikan perspektif baru yang belum banyak dibahas dalam kajian sebelumnya, khususnya dalam konteks sistem transmisi tegangan ekstra tinggi 500 kV di Indonesia.

Untuk pengembangan penelitian di masa mendatang, terdapat beberapa aspek yang dapat dikaji lebih lanjut guna meningkatkan efektivitas strategi mitigasi medan listrik pada SUTET. Pertama, penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi kombinasi optimal antara ketinggian tiang transmisi dan konfigurasi fasa vertikal, guna menemukan solusi yang lebih efisien dalam menekan medan listrik di lingkungan sekitar. Kedua, simulasi dapat diperluas dengan menggunakan metode numerik lain, seperti metode elemen hingga (*Finite Element Method*, FEM), untuk meningkatkan akurasi perhitungan medan listrik. Ketiga, penelitian eksperimental dengan pengukuran medan listrik langsung di lapangan dapat dilakukan untuk memvalidasi lebih lanjut hasil simulasi yang telah diperoleh. Selain itu, aspek lingkungan dan dampak kesehatan jangka panjang dari medan listrik tegangan tinggi juga dapat menjadi topik penelitian yang relevan untuk dieksplorasi lebih lanjut.

Sebagai kesimpulan, penelitian ini menegaskan bahwa optimalisasi konfigurasi fasa vertikal merupakan strategi yang efektif dalam mengurangi intensitas medan listrik di sekitar SUTET 500 kV. Hasil penelitian ini tidak hanya memperkaya pemahaman mengenai distribusi medan listrik pada sistem transmisi tegangan ekstra tinggi, tetapi juga memberikan rekomendasi praktis bagi industri tenaga listrik dalam perancangan sistem transmisi yang lebih aman dan efisien. Dengan adanya pengembangan lebih lanjut, strategi yang diusulkan dalam penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada peningkatan keandalan jaringan transmisi serta mitigasi dampak lingkungan dari medan listrik tegangan tinggi.

#### Referensi

- [1] I. Boukabou, D. Rupanetti, N. Kaabouch, and L. Foust, "Electromagnetic Environment Around Overhead Parallel

- Extra-High-Voltage Transmission Lines for UAS During Powerline Inspection,” *2023 IEEE Symp. Electromagn. Compat. Signal/Power Integrity, EMC+SIP1 2023*, pp. 413–418, 2023, doi: 10.1109/EMCSIP150001.2023.10241534.
- [2] E. R. Anagha and H. J. Bahirat, “Effect of High-Voltage Transmission Lines on Nearby Residential Buildings,” *Proc. 2024 IEEE 7th Int. Conf. Cond. Assess. Tech. Electr. Syst. CATCON 2024*, pp. 82–86, 2024, doi: 10.1109/CATCON60527.2024.10831712.
- [3] A. Nawawi, “Dampak Radiasi Listrik Tegangan Tinggi Terhadap Kesehatan Manusia,” *Swara Patra Maj. Ilm. PPSDM Migas*, vol. 8, no. 1, pp. 93–106, Mar. 2018, Accessed: Mar. 12, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal.ppsdmmigas.esdm.go.id/sp/index.php/swarapatra/article/view/20>
- [4] A. A Zamista, “Perancangan Solar Cell untuk Kebutuhan Energi Listrik pada Kapal Nelayan,” *J. Unitek*, vol. 10, no. 1, pp. 1–7, 2017, doi: 10.52072/unitek.v10i1.66.
- [5] N. Rosyidi AS, E. Supriyadi, and S. Sugianto, “Pengaruh Susunan Konduktor pada SUTET,” *Sainstech J. Penelit. Dan Pengkaj. Sains Dan Teknol.*, vol. 33, no. 4, 2023, doi: 10.37277/stch.v33i4.1747.
- [6] E. B. Utoyo, F. Azmi, and Sudarti, “Analisis Dampak Paparan Medan Magnet Extremely Low Frequency (ELF) Oleh SUTET Terhadap Resiko Kanker dan Masalah Reproduksi Pada Manusia,” *CERMIN J. Penelit.*, vol. 7, no. 1, pp. 58–68, 2023.
- [7] Miftakhudin, D. Wahjudi, and Watiningsih, “Analisis Pengaruh Kuat Medan Listrik Terhadap Lingkungan Dibawah Transmisi SUTET 500 kV Penghantar Pedan-Pesugihan,” *Teodolita Media Komun. Ilm. Dibidang Tek. Vol. 23 No. 2*, vol. 23, no. 2, 2022.
- [8] R. Benato *et al.*, “Highly efficient overhead line innovative conductors with reduced joule power losses,” *2017 AEIT Int. Annu. Conf. Infrastructures Energy ICT Oppor. Foster. Innov. AEIT 2017*, vol. 2017-January, pp. 1–6, Dec. 2017, doi: 10.23919/AEIT.2017.8240504.
- [9] S. Liu, A. Liu, D. Zhao, and W. Ye, “Effect of Overhead Transmission Line Arrangement on Energy Losses in Overhead Power Line Ground Wires,” *2024 3rd Int. Conf. Power Syst. Electr. Technol. PSET 2024*, pp. 283–288, 2024, doi: 10.1109/PSET62496.2024.10808978.
- [10] K. Zhao *et al.*, “A novel FDFD method for electromagnetic simulation based on adaptive grids,” <https://doi.org/10.1117/12.2687264>, vol. 12773, pp. 144–150, Nov. 2023, doi: 10.1117/12.2687264.
- [11] R. Abdelghani, K. Abdellah, and L. Messaouda, “Study of Electrical Field Distribution in the Insulation of High-Voltage Cables,” *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 682, pp. 723–734, 2021, doi: 10.1007/978-981-15-6403-1\_49.
- [12] P. Cambareri, C. De Falco, L. Di Rienzo, P. Seri, and G. C. Montanari, “Electric Field Calculation During Voltage Transients in HVDC Cables: Contribution of Polarization Processes,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 37, no. 6, pp. 5425–5432, Dec. 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3177567.
- [13] X. Bian, J. Cui, Y. Lu, and J. Tan, “Bias electric field distribution analysis based on finite difference method with non-uniform grids for a non-contact tunneling current probe,” <https://doi.org/10.1117/12.2512440>, vol. 11053, pp. 1085–1091, Mar. 2019, doi: 10.1117/12.2512440.
- [14] S. Kumara, Y. V. Serdyuk, and M. Jeroense, “Calculation of Electric Fields in HVDC Cables: Comparison of Different Models,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 28, no. 3, pp. 1070–1078, Jun. 2021, doi: 10.1109/TDEI.2021.009371.
- [15] C. Jörgens and M. Clemens, “Modeling the electric field at interfaces and surfaces in high-voltage cable systems,” *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 39, no. 5, pp. 1099–1111, Dec. 2020, doi: 10.1108/COMPEL-01-2020-0041/FULL/XML.