



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**ANALISIS MEDAN MAGNETIK TERHADAP OPERATOR  
YANG BEKERJA DI SALURAN TRANSMISI  
MENGUNAKAN METODE 3-D ELEMEN HINGGA**

Aditya Dwinugraha  
NRP 2212100201

Dosen Pembimbing  
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
Ir. Arif Musthofa, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

**ANALYSIS OF MAGNETIC FIELD EFFECTS OPERATORS  
WORKING A POWER TRANSMISSION LINE USING 3D  
FINITE ELEMENT METHOD**

Aditya Dwinugraha  
NRP 2212100201

Advisor  
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
Ir. Arif Musthofa, MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “ANALISIS MEDAN MAGNETIK TERHADAP OPERATOR YANG BEKERJA DI SALURAN TRANSMISI MENGGUNAKAN METODE 3-D ELEMEN HINGGA” adalah benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2016



Aditya Dwinugraha  
Nrp 2212 100 201

**ANALISIS MEDAN MAGNETIK TERHADAP OPERATOR  
YANG BEKERJA DI SALURAN TRANSMISI  
MENGUNAKAN METODE 3-D ELEMEN HINGGA**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I,**

**Dosen Pembimbing II,**

**Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**  
**NIP. 1970071219980211001**

**Ir. Arif Musthofa, MT.**  
**NIP. 196608111992031004**



# **ANALISIS MEDAN MAGNETIK TERHADAP OPERATOR YANG BEKERJA DI SALURAN TRANSMISI MENGGUNAKAN 3D METODE ELEMEN HINGGA**

**Nama** : Aditya Dwinugraha  
**Pembimbing I** : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
**Pembimbing II** : Ir. Arif Musthofa, MT.

## **ABSTRAK**

Saluran transmisi adalah media untuk mengirimkan energi listrik dari satu tempat ke tempat lain untuk jarak jauh. Tegangan yang tinggi dan arus yang mengalir pada saluran transmisi dapat menimbulkan medan listrik dan medan magnet. Medan magnet yang di hasilkan oleh saluran transmisi dapat membahayakan lingkungan sekitar (manusia) apabila tidak di analisis dengan baik. Untuk menganalisis distribusi medan magnet pada *tower* di gunakan 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 tugas akhir ini akan mensimulasikan saluran transmisi 500kV dan pengaruhnya terhadap sekitar (operator) untuk mendapatkan medan magnet yang di hasilkan. Tugas akhir ini akan menggunakan perangkat lunak *CST Studio* berbasis FEM untuk melakukan simulasi distribusi medan magnet yang di hasilkan oleh saluran transmisi.

**Kata Kunci** : Saluran Transmisi, Medan Magnet, Menara Transmisi, Manusia, *CST Studio*, *Finite Element Method*

*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*

# **ANALYSIS OF MAGNETIC FIELD EFFECTS OPERATORS WORKING A POWER TRANSMISSION LINE USING 3D FINITE ELEMENT METHOD**

**Name** : Aditya Dwinugraha  
**1<sup>st</sup> Advisor** : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
**2<sup>nd</sup> Advisor** : Ir. Arif Musthofa, MT.

## **ABSTRACT**

Transmission line is a medium to transmit electric energy from one place to another for long distances. High voltage and the current flowing in the transmission line can cause an electric field and a magnetic field. The magnetic field generated by the transmission line can harm the environment (human) if not analyzed properly. To analyze the distribution of magnetic fields on tower are used FEM (Finite Element Method) based software. The basic idea of FEM is to divide between structure, body or areas that analyzed into a very large quantities of finite element. Therefore this final project will simulate a 500Kv transmission line and the effect of environment (operator) to obtain the magnetic field generated. This final project will use FEM-based software, CST Studio to simulate the magnetic distribution produced by transmission line.

**Key Words** : **Transmission Line, Magnetic Field, Tower Transmission, Human, CST Studio, Finite Element Method**

*- Halaman ini sengaja dikosongkan -*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya. Shalawat serta salam selalu tercurah kepada Nabi Besar Muhammad SAW, keluarga, dan sahabat serta kita semua selaku umatnya. Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir **“Analisis Medan Magnetik Terhadap Operator yang Bekerja di Saluran Transmisi Menggunakan 3D Metode Elemen Hingga”** ini dengan tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak I Made Yulistya Negara dan Bapak Arif Musthofa, atas segala pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang tua penulis, Bapak Sastra Viqaya dan Ibu Herlina Agustina yang selalu memberikan nasihat, semangat dan doanya kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan tepat waktu.
3. Kakak Arina Shallyta dan adik Alifia Oktaviani yang selalu mendoakan dan memberi semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini tepat pada waktunya.
4. Mas Arief Budi Ksatria, Mas Yusrizal Afif, dan Mas Yosua Pandapotan yang telah memberikan inspirasi bagi penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Seluruh Anggota Kalpataru yang selalu mengingatkan penulis untuk mengerjakan Tugas Akhir ini.
6. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
7. Teman-teman E52 yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
8. Teman-teman Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi yang telah mendukung penulis agar dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini..
9. Adik-adik angkatan 2013, 2014 dan 2015 yang telah menemani dan mendukung penulis agar dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

10. Seluruh warga kantin yang memberikan dan menjadi motivasi kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
11. Seluruh pihak yang tidak dapat sebutkan satu persatu yang telah membantu menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca.

Surabaya, Desember 2016

**Penulis**

# DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Sistematika Penulisan .....	2
BAB 2 TIANG LISTRIK DAN POTENSI GANGGUAN KESEHATAN AKIBAT PAPARAN MEDAN LISTRIK .....	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.2 Saluran Transmisi Tenaga Listrik.....	6
2.2.1 Kategori Saluran Transmisi.....	6
2.2.2 Saluran Transmisi Berdasarkan Pemasangan.....	6
2.2.3 Saluran Transmisi Berdasarkan Tegangan.....	8
2.2.4 Komponen Utama Saluran Transmisi .....	8
2.2.5 Andongan.....	11
2.3 Ruang Bebas dan Jarak Bebas Minimum Vertikal dan Horizontal pada SUTT dan SUTET.....	13
2.3.1 Jarak Bebas Minimum Vertikal Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET).....	13
2.3.2 Jarak Bebas Minimum Horisontal Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET).....	13
2.3.3 Ruang Bebas pada SUTT dan SUTET.....	16
2.4 Jarak Antar Kawat .....	17
2.5 Standar Ambang Batas Medan Magnet dan Medan Listrik.....	18
2.5.1 Berdasarkan SPLN-112-1994 .....	18

2.5.2 Berdasarkan SNI 04-6950-2003.....	18
2.5.3 Berdasarkan Rekomendasi WHO 1990 .....	19
2.6 Potensi Gangguan Kesehatan Akibat Paparan Medan Listrik.....	20
<b>BAB 3 METODE DAN SIMULASI MENARA TRANSMISI 500 KV MENGGUNAKAN CST STUDIO SUITE.....</b>	<b>23</b>
3.1 Metode Element Hingga (FEM) .....	23
3.2 Perhitungan Medan Magnet dengan Metode Elemen Hingga.....	23
3.2.1 Metode Perhitungan .....	24
3.2.2 Metode Pengukuran .....	27
3.3 Elemen Segitiga Sebagai Potensial Listrik .....	27
3.3.1 Penyatuan Elemen Segitiga.....	29
3.4 Konstruksi dan Spesifikasi Saluran Transmisi .....	30
3.5 Material Penyusun Menara Transmisi, Isolator Polimer, dan Manusia.....	33
3.6 Pemodelan Saluran Transmisi .....	35
3.7 Pemodelan Menara, Isolator dan Manusia.....	35
3.7.1 Pemodelan Pemasangan Saluran Transmisi.....	38
<b>BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA .....</b>	<b>41</b>
4.1 Tegangan Kerja pada Saluran Transmisi.....	41
4.2 Arah Distribusi Medan Magnet di Saluran Transmisi .....	43
4.3 Analisa Medan Magnet pada Menara .....	44
4.3.1 Hasil Simulasi pada Menara .....	44
4.3.2 Grafik dan Kurva pada Menara.....	45
4.4 Analisa Medan Magnet pada <i>phase</i> R, S, dan T.....	46
4.4.1 Hasil Simulasi pada <i>phase</i> R, S, dan T .....	47
4.4.2 Grafik dan Kurva <i>phase</i> R, S, dan T .....	48
4.5 Analisa Medan Magnet pada Konduktor (Jarak Terendah) dan Manusia.....	49
4.5.1 Grafik dan Kurva pada Konduktor (Jarak Terendah) dan Manusia.....	51
4.6 Perbandingan Medan Magnet pada Manusia di Bawah Saluran Transmisi .....	52
4.6.1 Hasil Simulasi pada Manusia .....	52

4.6.2 Grafik dan Kurva pada Manusia .....	53
4.6.3 Perbandingan Pengukuran Langsung dengan Hasil Simulasi .....	54
<b>BAB 5 PENUTUP</b>	
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	55
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>57</b>
<b>RIWAYAT HIDUP.....</b>	<b>59</b>

*- Halaman ini sengaja dikosongkan -*

# TABLE OF CONTENTS

COVER	
STATEMENT OF AUTHENTICITY	
APPROVAL SHEET	
ABSTRAK .....	<i>i</i>
ABSTRACT .....	<i>iii</i>
PREFACE .....	<i>v</i>
TABLE OF CONTENT .....	<i>vii</i>
TABLE OF ILLUSTRATION .....	<i>xi</i>
TABLE OF TABLES.....	<i>xiii</i>
CHAPTER 1 PRELIMINARY.....	<i>1</i>
1.1 Background.....	<i>1</i>
1.2 Writing System.....	<i>2</i>
CHAPTER 2 ELECTRIC TOWER AND POTENTIAL HEALTH DISORDERS DUE TO EXPOSURE TO ELECTRICAL FIELDS.....	<i>5</i>
2.1 Electricity System .....	<i>5</i>
2.2 Electric Power Transmission Line.....	<i>6</i>
2.2.1 Categories Transmission Line.....	<i>6</i>
2.2.2 Based Transmission Line Installation.....	<i>6</i>
2.2.3 Based on Voltage Transmission Line.....	<i>8</i>
2.2.4 Main Components Transmission Line.....	<i>8</i>
2.2.5 Sag .....	<i>11</i>
2.3 Free Space and Clearance Minimum Vertical and Horizontal on .....	<i>13</i>
2.3.1 Minimum Vertical Clearance on High Voltage Air Line and Extra High Voltage Air Line.....	<i>13</i>
2.3.2 Clearance Minimum Horizontal on High Voltage Air Line and Extra High Voltage Air Line.....	<i>13</i>
2.3.3 Free Space on High Voltage Air Line and Extra High Voltage Air Line.....	<i>16</i>
2.4 Spacing Wires.....	<i>17</i>
2.5 Standard Threshold Magnetic Field and Electric Field.....	<i>18</i>
2.5.1 Based SPLN-112-1994.....	<i>18</i>
2.5.2 Based SNI 04-6950-2003 .....	<i>18</i>
2.5.3 Based Recommendations WHO 1990.....	<i>19</i>

2.6 Potential Health Problems Due Electric Field Exposure .....	20
<b>CHAPTER 3 METHOD AND SIMULATION TRANSMISSION</b>	
<b>TOWER 500 KV USING CST STUDIO SUITE.....</b>	<b>23</b>
3.1 Finite Element Method (FEM) .....	23
3.2 Calculation of Magnetic Field with Finite Element Method.....	23
3.2.1 Calculation Method .....	24
3.2.2 Measurement Method.....	27
3.3 Triangular Element For Electrical Potential .....	27
3.3.1 Elements Unification Triangle .....	29
3.4 Construction Specifications Transmission Line .....	30
3.5 Material Authors Transmission Tower, Polymer Insulator,	
and Human.....	33
3.6 Transmission Line Modeling .....	35
3.7 Modelling Tower, Insulator, and Human .....	35
3.7.1 Modeling Installation of Transmission Line .....	38
<b>CHAPTER 4 SIMULATION RESULTS AND DATA ANALYSIS.....</b>	<b>41</b>
4.1 Working Voltage on Transmission Line .....	41
4.2 Directions Distribution of Magnetic Field on Transmission	
Line .....	43
4.3 Analysis of Magnetic Field on Tower .....	44
4.3.1 Simulation Results on Tower.....	44
4.3.2 Graph and Curve on Tower .....	45
4.4 Analysis of Magnetic Field on Phase R, S, and T.....	46
4.4.1 Simulation Results on Phase R, S, and T .....	47
4.4.2 Graph and Curve on Phase R, S, and T .....	48
4.5 Analysis of Magnetic Field on Conductor (Distance Low)	
and Human.....	49
4.5.1 Graph and Curve on Conductor (Distance Low) and	
Human.....	51
4.6 Comparison of Magnetic Field on Human Under	
Transmission Line.....	52
4.6.1 Simulation Results on Human.....	52
4.6.2 Graph and Curve on Human.....	53
4.6.3 Direct Mesurement Comparison with Simulation	
Results Horizontally against Conductor .....	54

*4.6.4 Direct Measurement Comparison with Simulation  
Results Vertically against Conductor.....55*

*CHAPTER 5 CLOSING*  
*5.1 Conclusion.....57*  
*5.2 Suggestion .....57*

*BIBLIOGRAPHY.....59*  
*BIOGRAPHY.....61*

*- Halaman ini sengaja dikosongkan -*

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> Diagram Segaris Sistem Tenaga Listrik Sederhana.....	5
<b>Gambar 2.2</b> Jenis Konstruksi <i>Tower</i> Saluran Udara Tegangan Tinggi (a) Konstruksi <i>Tower</i> Beton (b) Konstruksi <i>Tower</i> Baja.....	9
<b>Gambar 2.3</b> Jenis Isolator Saluran Udara Tegangan Tinggi (a) Isolator Renteng (b) Isolator Batang Panjang (c) Isolator Tonggak Saluran .....	10
<b>Gambar 2.4</b> Andongan atau Lendutan Tiang yang Tingginya Sama .....	12
<b>Gambar 2.5</b> Andongan atau Lendutan Tiang Yang Tingginya Tidak Sama .....	12
<b>Gambar 2.6</b> Ruang Bebas Pada SUTT dan SUTET.....	17
<b>Gambar 3.1</b> Sistem Koordinat Perhitungan .....	25
<b>Gambar 3.2</b> Sebuah Elemen Segitiga Pada Suatu Domain .....	28
<b>Gambar 3.3</b> Penggabungan Elemen Segitiga.....	30
<b>Gambar 3.4</b> Konstruksi <i>Steel Suspension Tower</i> 500 kV .....	31
<b>Gambar 3.5</b> Konstruksi Isolator Pos 500kV .....	32
<b>Gambar 3.6</b> Konstruksi Manusia .....	33
<b>Gambar 3.7</b> Pemodelan <i>Tower</i> Transmisi .....	36
<b>Gambar 3.8</b> Pemodelan Batang Konduktor dalam Isolator .....	36
<b>Gambar 3.9</b> Pemodelan Isolator .....	36
<b>Gambar 3.10</b> Pemodelan Isolator dengan Suspensi.....	37
<b>Gambar 3.11</b> Pemodelan <i>Tower</i> Manusia .....	37
<b>Gambar 3.12</b> Pemodelan <i>Tower</i> dengan Isolator .....	38
<b>Gambar 3.13</b> Pemodelan Dua <i>Tower</i> Transmisi .....	39
<b>Gambar 3.14</b> Pemodelan Saluran Transmisi .....	39
<b>Gambar 4.1</b> Tegangan Kerja Saluran Transmisi .....	41
<b>Gambar 4.2</b> Distribusi Medan Magnet di Saluran Transmisi, (a) Tampak Depan (b) Tampak Samping .....	42
<b>Gambar 4.3</b> Arah Persebaran Medan Magnet pada Saluran Transmisi. ....	43
<b>Gambar 4.4</b> Garis Kurva pada <i>Tower</i> .....	44
<b>Gambar 4.5</b> Hasi Simulasi pada <i>Tower</i> .....	45
<b>Gambar 4.6</b> Kurva pada <i>Tower</i> .....	46
<b>Gambar 4.7</b> Garis Kurva pada <i>Phase</i> R, S, T .....	47
<b>Gambar 4.8</b> Hasil Simulasi pada <i>Phase</i> R, S, dan T .....	48

<b>Gambar 4.9</b> Kurva <i>Phase</i> R, S, dan T .....	49
<b>Gambar 4.10</b> Garis Kurva pada Konduktor dan Manusia .....	50
<b>Gambar 4.11</b> Hasil Simulasi pada Konduktor dan Manusia .....	50
<b>Gambar 4.12</b> Kurva pada Konduktor dan Manusia .....	51
<b>Gambar 4.13</b> Nilai Medan Magnet pada Manusia di Bawah Konduktor (Jarak Terendah) .....	52
<b>Gambar 4.14</b> Pemodelan manusia .....	52
<b>Gambar 4.15</b> Hasil Simulasi pada Manusia .....	53
<b>Gambar 4.16</b> Kurva pada Manusia .....	53

## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 2.1</b> Jarak Bebas Minimum Vertikal dari Konduktor (c) Berdasarkan SNI 04-6918-2002.....	13
<b>Tabel 2.2</b> Jarak Bebas Minimum Horizontal dari Sumbu Vertikal Menara/Tiang Berdasarkan SNI 04-6918-2002 .....	15
<b>Tabel 2.3</b> Rekomendasi SNI 04-6950-2003 Untuk Batas Pemaparan Terhadap Medan Listrik dan Medan Magnet yang Berlaku pada Lingkungan Kerja dan Umum untuk Frekuensi 50/60 Hz .....	19
<b>Tabel 2.4</b> Nilai Ambang Batas Medan Listrik Berdasarkan Rekomendasi <i>WHO</i> 1990.....	20
<b>Tabel 3.1</b> Spesifikasi Tower Transmisi.....	31
<b>Tabel 3.2</b> Spesifikasi Isolator Type L4-SN791-13.....	32
<b>Tabel 3.3</b> Spesifikasi Manusia .....	33
<b>Tabel 3.4</b> Data Sheet Material Tower Transmisi dan Konduktor.....	34
<b>Table 3.5</b> Data Sheet Material Isolator.....	34
<b>Tabel 3.6</b> Data Sheet Material Manusia .....	34
<b>Tabel 4.1</b> Perbandingan Hasil Simulasi dengan Pengukuran.....	34

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

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 pada saluran transmisi terhadap operator akan digunakan software CST LF Studio yang berbasis FEM (*Finite Element Method*) atau MEA (Metode Elemen Hingga). Metode FEM (*Finite Element Method*) adalah metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematika. Ide dasar dari FEM adalah membagi struktur, badan (*body*), atau daerah yang dianalisis menjadi jumlah yang sangat besar dari suatu elemen hingga (*finite element*). Elemen ini bisa dalam bentuk satu, dua, atau tiga dimensi. Dalam proses diskretisasi, Elemen adalah kumpulan titik (*nodal*) yang saling terhubung. Sedangkan kumpulan nodal dan elemen didefinisikan sebagai mesh. Proses pembentukan mesh ini disebut diskretisasi atau metode pemisahan (*discretization*). Diskretisasi adalah proses pembentukan suatu benda/body dengan memisahkannya ke dalam sebuah sistem yang ekuivalen dari bagian terkecil atau elemen yang saling berhubungan antar nodal sehingga menjadi dua atau lebih elemen dengan garis batas dan permukaan [2].

Dari permasalahan tersebut, rumusan masalah yang akan dibahas pada tugas akhir ini yaitu:

1. Bagaimana proses persebaran medan elektromagnetik di setiap material.
2. Bahaya yang ditimbulkan dari medan elektromagnetik terhadap kesehatan manusia (operator).
3. Apakah manusia sudah menyadari bahaya medan elektromagnetik itu sendiri.

Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui kondisi dan persebaran medan magnet pada saluran transmisi 500 kV dan seberapa besar bahayanya terhadap operator

Dalam tugas akhir ini, metode pengerjaan yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan Data.  
Hal yang dilakukan di awal adalah mengumpulkan data berupa katalog referensi saluran transmisi 500 kV beserta isolator dan konduktornya dan standar medan magnet yang dipakai oleh PLN.
2. Simulasi.  
Mensimulasikan saluran transmisi 500 kV beserta isolator dan konduktor menggunakan CST Studio Suite 2014 untuk melihat distribusi medan dan mengetahui besar pengaruhnya terhadap kesehatan manusia.
3. Analisis.  
Setelah diketahui nilai medan listrik menggunakan simulasi CST Studio Suite 2014, akan dilakukan perbandingan data distribusi medan listrik terhadap standar yang sudah ada.
4. Kesimpulan.  
Setelah membandingkan data dari hasil simulasi akan dapat disimpulkan bahwa persebaran medan magnet di saluran transmisi 500 kV dan seberapa besar bahayanya terhadap kesehatan dengan mempertimbangkan standar yang dipakai.

## **1.2. Sistematika Penulisan**

Untuk memudahkan dalam pembahasan yang akan dilakukan, tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab.

Bab pertama merupakan pendahuluan yang meliputi pembahasan latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika pembahasan, dan relevansi dari penulisan.

Bab kedua membahas tentang landasan teori yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini, yaitu komponen saluran transmisi, jenis-jenis saluran transmisi, penjelasan isolator, penjelasan tower transmisi, dan penjelasan konduktor.

Bab ketiga akan dibahas mengenai metodologi yang digunakan dalam pengerjaan studi ini. Meliputi, metode *Finite Element Method*, pemodelan saluran transmisi, perhitungan panjang saluran transmisi, dan penghitungan medan magnet yang di hasilkan oleh saluran transmisi. Serta dilampirkan konstruksi dan spesifikasi serta material penyusun saluran transmisi.

Bab keempat akan memaparkan hasil simulasi dan menganalisis hasil tersebut, sehingga dapat diketahui karakteristik medan magnet pada saluran transmisi.

Bab kelima berisi kesimpulan dari hasil simulasi saluran transmisi waru 500 kV dan saran.

*- Halaman ini sengaja dikosongkan -*

## BAB II

### Tiang Listrik dan Potensi Gangguan Kesehatan Akibat Paparan Medan Listrik

#### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Secara umum sumber listrik berasal dari pembangkit tenaga listrik. Lokasi pembangkit tenaga listrik umumnya jauh dari sumber beban, sehingga untuk menyalurkan energi listrik harus disalurkan melalui sistem transmisi. Sistem tenaga listrik secara umum adalah suatu sistem yang terdiri dari lima sub sistem utama untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit tenaga listrik menuju ke pusat beban. Diagram segaris dari sistem tenaga listrik dalam penyaluran energi listrik secara umum dapat dilihat pada gambar 2.1.



**Gambar 2.1.** Diagram Segaris Sistem Tenaga Listrik Sederhana

Dari gambar 2.1 energi listrik yang bersumber dari pembangkit tenaga listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTP, PLTGU dan PLTD akan disalurkan melalui sistem transmisi. Energi listrik yang dibangkitkan tegangannya akan dinaikkan menggunakan transformator penaik tegangan dengan tujuan untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi sehingga dapat mengurangi rugi-rugi daya transmisi. Energi listrik kemudian disalurkan melalui sistem transmisi menuju gardu induk untuk kemudian disalurkan ke sumber beban.

Tegangan transmisi akan diturunkan lagi melalui transformator penurun tegangan (*step-down transformer*) di gardu induk menjadi tegangan menengah 20 kV untuk dapat disalurkan ke gardu distribusi. Gardu distribusi akan kembali menurunkan tegangan menjadi tegangan rendah 220 V / 380 V sebelum disalurkan melalui saluran distribusi menuju pusat – pusat beban [3].

## **2.2 Saluran Transmisi Tenaga Listrik**

Transmisi tegangan tinggi adalah sebuah proses penyaluran energi listrik dari satu gardu induk ke gardu induk lainnya. Proses penyaluran energi listrik tersebut terdiri dari konduktor yang direntangkan antara tiang-tiang (tower) melalui isolator-isolator, dengan sistem tegangan tinggi. Besaran tegangan transmisi dapat dibagi menjadi beberapa kelas, yaitu : Tegangan Ultra Tinggi (UHV), Tegangan Ekstra Tinggi (EHV), Tegangan Tinggi (HV), Tegangan Menengah (MHV), dan Tegangan Rendah (LV). Standar tegangan tinggi yang berlaku di Indonesia adalah : 30 KV, 70 KV dan 150 KV.

### **2.2.1 Kategori Saluran Transmisi**

Saluran transmisi memiliki kriteria mengenai panjang atau jarak dari saluran transmisi serta ketelitian yang diinginkan. Dilihat dari segi panjangnya saluran transmisi tegangan tinggi dapat dikategorikan menjadi 3 (tiga), yaitu:

1. Saluran transmisi pendek, dengan jarak kurang dari 80 km (50 mil)
2. Saluran transmisi menengah, dengan jarak antara 80 km (50 mil) dan 240 km (150 mil)
3. Saluran transmisi panjang, dengan jarak lebih dari 240 km (150 mil)

### **2.2.2 Saluran Transmisi Berdasarkan Pemasangan**

Saluran transmisi dapat dibagi menjadi dua kategori berdasarkan pemasangannya, yaitu :

#### **1. Saluran Udara**

Saluran udara adalah saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada isolator antar menara atau tiang transmisi. Saluran transmisi udara memiliki beberapa keuntungan antara lain:

- a. Mudah dalam perbaikan
- b. Mudah dalam perawatan
- c. Mudah dalam mengetahui letak gangguan
- d. Biaya operasional yang murah

Saluran transmisi udara juga memiliki beberapa kerugian yaitu :

- a. Berada di ruang terbuka sehingga mengakibatkan gangguan dari luar sangat mudah terjadi, seperti gangguan hubung singkat dan gangguan tegangan lebih yang diakibatkan oleh sambaran petir dan gangguan – gangguan lainnya
- b. Keandalannya dipengaruhi oleh situasi alam
- c. Mengurangi keindahan lingkungan sekitar

## **2. Saluran Kabel Bawah Tanah atau Bawah Air**

Saluran kabel bawah tanah atau saluran kabel bawah air, merupakan saluran transmisi tegangan tinggi yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang dipendam didalam tanah atau berada di bawah air. Kategori saluran kabel bawah tanah banyak digunakan didalam perkotaan, disebabkan keberadaan dari saluran tegangan tinggi tersebut berada didalam tanah sehingga tidak mengganggu keindahan kota dan gangguan akibat kondisi cuaca atau kondisi alam dapat jarang terjadi. Namun kekurangannya, mahal dalam instalasi dan investasi serta sulitnya menentukan titik gangguan dan perbaikannya karena berada di bawah tanah.

Saluran tegangan tinggi dengan konstruksi kabel bawah air lebih sering digunakan untuk mentransmisikan daya listrik dari pulau kepulauan, atau lebih sering disebut sebagai kabel laut. Karena konstruksi ini lebih sering digunakan untuk mentransmisikan daya listrik dari pulau ke pulau, maka keberadaan saluran ini sangat riskan terjadi gangguan akibat arus bawah laut.

### **2.2.3 Saluran Transmisi Berdasarkan Tegangan**

#### **1. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 200 kV – 500 kV**

Pada umumnya digunakan pada pembangkitan dengan kapasitas di atas 500 MW. Tujuannya adalah agar drop tegangan dan penampang kawat dapat direduksi secara maksimal, sehingga diperoleh operasional yang efektif dan efisien.

Permasalahan mendasar pembangunan SUTET adalah: konstruksi tiang (*tower*) yang besar dan tinggi, memerlukan tapak tanah yang luas, memerlukan isolator yang banyak, sehingga pembangunannya membutuhkan biaya yang besar. Pembangunan transmisi ini cukup efektif untuk jarak 100 km sampai dengan 500 km.

#### **2. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30 kV – 150 kV**

Saluran udara tegangan tinggi (SUTT) memiliki tegangan operasi antara 30 kV sampai dengan 150 kV. Konfigurasi jaringan pada umumnya single atau double sirkuit, dimana 1 sirkuit terdiri dari 3 fasa dengan 3 atau 4 kawat. Biasanya hanya 3 kawat dan penghantar netralnya digantikan oleh tanah sebagai saluran kembali. Apabila kapasitas daya yang disalurkan besar, maka penghantar pada masing-masing fasa terdiri dari dua atau empat kawat (*double atau quadrupole*) dan berkas konduktor disebut *bundle conductor*.

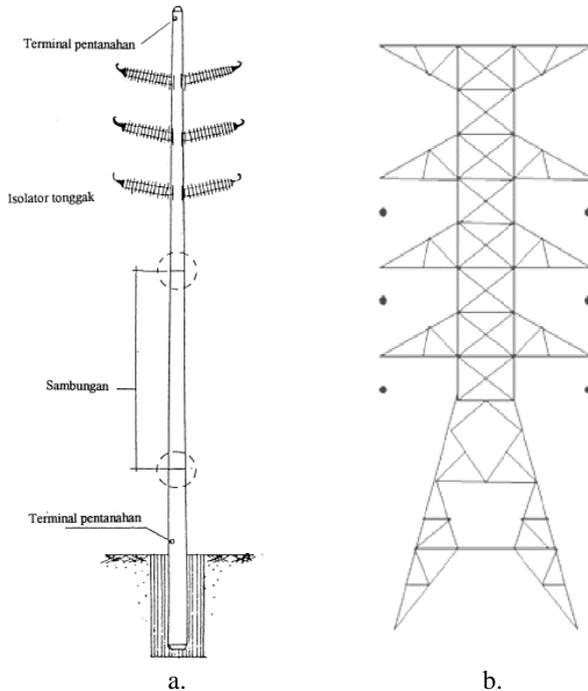
### **2.2.4 Komponen Utama Saluran Transmisi**

Saluran transmisi tenaga listrik memiliki beberapa komponen utama yang terdiri dari:

#### **1. Menara Transmisi atau Tiang Transmisi**

Pada suatu Sistem Tenaga Listrik, energi listrik yang dibangkitkan dari pusat pembangkit listrik ditransmisikan ke pusat-pusat pengatur beban melalui suatu saluran transmisi, saluran transmisi tersebut dapat berupa saluran udara atau saluran bawah tanah, namun pada umumnya berupa saluran udara. Energi listrik yang disalurkan lewat saluran transmisi udara pada umumnya menggunakan kawat telanjang sehingga mengandalkan udara sebagai media isolasi antara kawat penghantar tersebut dengan benda sekelilingnya, dan untuk menyanggah / merentang kawat penghantar dengan ketinggian dan jarak yang aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya, kawat-kawat penghantar tersebut dipasang pada suatu konstruksi bangunan yang kokoh, yang

biasa disebut menara / tower. Material menara transmisi sendiri dijelaskan pada gambar 2.2.

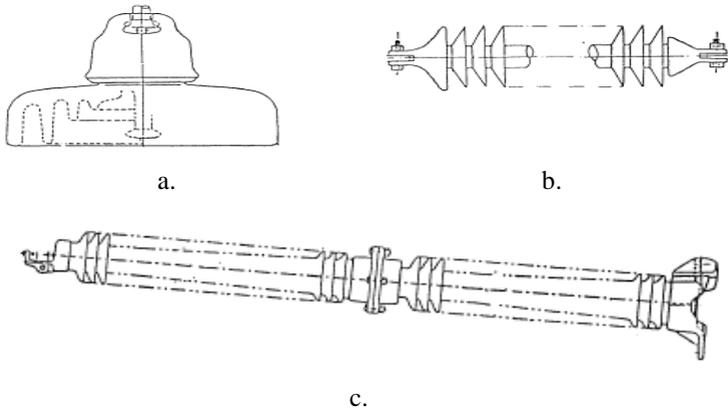


**Gambar 2.2.** Jenis Konstruksi Menara Saluran Udara Tegangan Tinggi (a) Konstruksi Menara Beton (b) Konstruksi Menara Baja [4]

## 2. Isolator

Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi pada umumnya adalah jenis porselin atau gelas yang berfungsi sebagai isolasi tegangan listrik antara kawat penghantar dengan tiang.

Macam-macam isolator yang digunakan pada saluran udara tegangan tinggi adalah sebagai berikut :



**Gambar 2.3** Jenis Isolator Saluran Udara Tegangan Tinggi (a) Isolator Renteng (b) Isolator Batang Panjang (c) Isolator Tonggak Saluran [4]

### 3. Konduktor (*Conductor*)

Kawat konduktor ini digunakan untuk menghantarkan listrik yang ditransmisikan. Kawat konduktor untuk saluran transmisi tegangan tinggi ini selalu tanpa pelindung/isolasi, hanya menggunakan isolasi udara. Jenis Konduktor yang dipakai antara lain:

1. Tembaga (*Cu*)
2. Alumunium (*Al*)
3. Baja (*Steel*)

Di Indonesia, jenis yang sering dipakai adalah jenis alumunium dengan campuran baja. Jenis-jenis penghantar Alumunium antara lain:

1. AAC (*All-Alumunium Conductor*), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari alumunium.
2. AAAC (*All-Alumunium-Alloy Conductor*), yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran alumunium.
3. ACSR (*Alumunium Conductor Steel-Reinforced*) Conductor, Steel-Reinforced), yaitu kawat penghantar alumunium berinti kawat baja. Pada umumnya SUTT maupun SUTET menggunakan konduktor jenis ACSR. Konduktor jenis ACSR merupakan kawat berupa *steel* yang mempunyai kuat mekanik

tinggi, sedangkan bagian luarnya mempunyai konduktivitas tinggi.

4. ACAR (Aluminium Conductor, Alloy-Reinforced), yaitu kawat penghantar aluminium yang di perkuat dengan logam campuran.

#### 4. Kawat Tanah (*ground wire*)

Kawat tanah atau ground wires, juga disebut sebagai kawat pelindung (*shield wires*) gunanya untuk melindungi kawat-kawat penghantar atau kawat-kawat fasa terhadap sambaran petir. Jadi kawat tanah ini dipasang diatas kawat fasa. Sebagai kawat tanah dipakai kawat baja (*steel wires*).

#### 2.2.5 Andongan (*Sag*)

Karena beratnya, maka penghantar yang direntangkan antara dua tiang transmisi mempunyai bentuk lengkung tertentu (*catenary curve*) yang dapat dinyatakan oleh persamaan-persamaan tertentu. Andongan dan tegangan tarik pada suatu rentang kawat penghantar antar menara dalam saluran udara dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut : berat kawat per satuan panjang, modulus elastisitas, koefisien perubahan panjang, ultimate strength, diameter kawat, jarak antara dua menara (*span*), dan kondisi lingkungan sekitar yang mungkin berpengaruh, misalnya angin, es, debu, dan suhu. Berat efektif maksimum dari kawat penghantar adalah jumlah vektor dari berat vertikal dan tekanan angin horisontal. Nilai andongan dapat dicari dengan menggunakan pendekatan secara parabola berikut [4]:

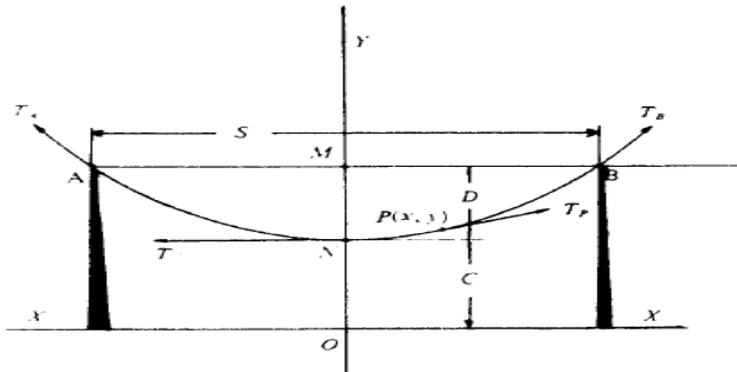
$$D = \frac{wS^2}{8T} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

D = Andongan (m)

w = Berat kawat (Kg/m)

S = Jarak antar dua menara/*span* (m)



**Gambar 2.4** Andongan atau Lendutan Tiang yang Tingginya Sama

Nilai andongan atau lendutan dengan tinggi tiang yang tidak sama, dapat ditentukan dengan persamaan berikut [4]:

$$D_0 = D \left(1 - \frac{H}{4D}\right)^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

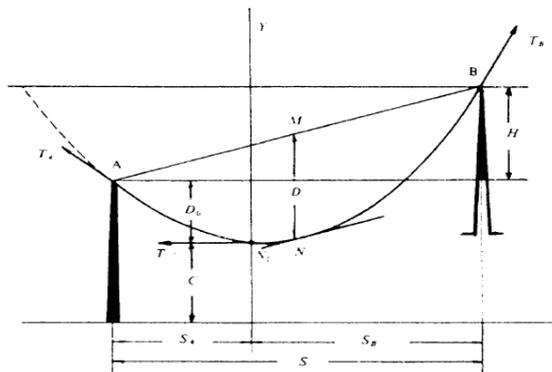
dimana

D = Andongan (m)

$D_0$  = Andongan dengan tinggi tiang yang tidak sama

T = *Horisontal Tension* (Kg)

H = Beda tinggi tiang (m)



**Gambar 2.5** Andongan atau Lendutan Tiang Yang Tingginya Tidak Sama

## 2.3 Ruang Bebas dan Jarak Bebas Minimum Vertikal dan Horizontal Pada SUTT dan SUTET

### 2.3.1 Jarak Bebas Minimum Vertikal Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET)

Jarak terpendek secara vertikal antara konduktor SUTT atau SUTET dengan permukaan bumi atau benda di atas permukaan bumi tidak boleh kurang dari jarak yang telah ditetapkan demi keselamatan manusia, makhluk hidup dan benda lainnya serta keamanan operasi SUTT dan SUTET. Jarak bebas minimum vertikal pada SUTT dan SUTET berdasarkan SNI 04-6918-2002 dapat dilihat pada tabel 2.1.

### 2.3.2 Jarak Bebas Minimum Horizontal Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET)

Jarak terpendek secara horizontal antara konduktor SUTT atau SUTET dengan permukaan bumi atau benda di atas permukaan bumi tidak boleh kurang dari jarak yang telah ditetapkan demi keselamatan manusia, makhluk hidup dan benda lainnya serta keamanan operasi SUTT dan SUTET. Jarak bebas minimum horizontal pada SUTT dan SUTET berdasarkan SNI 04-6918-2002 dapat dilihat pada tabel 2.2.

**Tabel 2.1** Jarak Bebas Minimum Vertikal dari Konduktor (c) Berdasarkan SNI 04-6918-2002

No.	LOKASI	SUTT		SUTET	
		66 kV (m)	150 kV (m)	275 kV (m)	500 kV (m)
1.	Lapangan terbuka atau daerah terbuka <sup>a</sup>	7,5	8,5	10,5	12,5
2					
2.1	Daerah dengan keadaan tertentu	4,5	5,0	7,0	9,0
2.2	Bangunan, jembatan <sup>b</sup> tanaman/tumbuhan, hutan	4,5	5,0	7,0	9,0

No.	LOKASI	SUTT	SUTET
-----	--------	------	-------

		66kV (m)	150kV (m)	275kV (m)	500kV (m)
2.3	Perkebunan <sup>b</sup>	8,0	9,0	11,0	15,0
2.4	Jalan/jalan raya/ rel kereta api <sup>a</sup>	12,5	13,5	15,0	18,0
2.5	Lapangan umum <sup>a</sup> SUTT lain, saluran udara tegangan rendah (SUTR), saluran udara tegangan menengah (SUTM), saluran udara	3,0	4,0	5,0	8,5
2.6	Komunikasi, antena dan kereta gantung <sup>b</sup> Titik tertinggi tiang kapal pada kedudukan air pasang / tertinggi pada lalu lintas air <sup>b</sup>	3,0	4,0	6,0	8,5

Catatan :

<sup>a</sup> Jarak bebas minimum vertikal dihitung dari permukaan bumi atau permukaan jalan/rel.

<sup>b</sup> Jarak bebas minimum vertikal dihitung sampai titik tertinggi / terdekatnya.

**Tabel 2.2** Jarak Bebas Minimum Horizontal dari Sumbu Vertikal Menara/Tiang Berdasarkan SNI 04-6918-2002

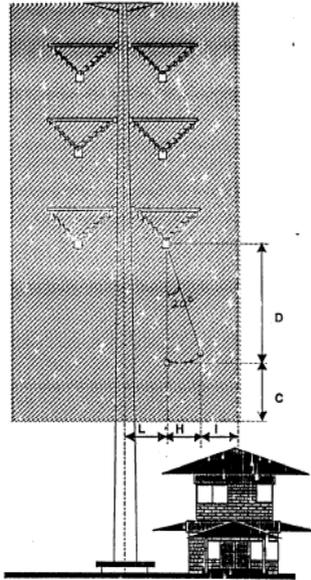
<b>No</b>	<b>Saluran Udara</b>	<b>Jarak dari sumbu vertikal menara / tiang ke konduktor L (m)</b>	<b>Jarak horizontal akibat ayunan konduktor H (m)</b>	<b>Jarak Bebas Impuls petir (untuk SUTT) atau jarak bebas impuls switsing (untuk SUTET) I (m)</b>	<b>Total L + H + I (m)</b>	<b>Pembulatan (m)</b>
1	SUTT 66 kV tiang baja	1,80	1,37	0,63	3,80	4,00
2	SUTT 66 kV tiang beton	1,80	0,68	0,63	3,11	4,00
3	SUTT 66 kV menara	3,00	2,74	0,63	6,37	7,00
4	SUTT 150 kV tiang baja	2,25	2,05	1,50	5,80	6,00
5	SUTT 150 kV tiang beton	2,25	0,86	1,50	4,61	5,00
6	SUTT 150 kV menara	4,20	3,76	1,50	9,46	10,00

<b>No</b>	<b>Saluran Udara</b>	<b>Jarak dari</b>	<b>Jarak horizont</b>	<b>Jarak Bebas</b>	<b>Total L + H</b>	<b>Pembulatan</b>
-----------	----------------------	-------------------	-----------------------	--------------------	--------------------	-------------------

		sumbu vertikal menara / tiang ke konduktor L (m)	al akibat ayunan konduktor H (m)	Impuls petir (untuk SUTT) atau jarak bebas impuls switsing (untuk SUTET) I (m)	+ I (m)	(m)
7	SUTET 275 kV sirkuit ganda	5,80	5,13	1,80	12,73	13,00
8	SUTET 500 kV sirkuit tunggal	12,00	6,16	3,10	21,26	22,00
9	SUTET 500 kV sirkuit ganda	7,30	6,16	3,10	16,56	17,00

### 2.3.3 Ruang Bebas Pada SUTT dan SUTET

Ruang bebas adalah daerah yang dibentuk oleh jarak bebas minimum vertikal dan horizontal pada SUTT dan SUTET, dimana pada daerah inilah manusia, makhluk hidup dan bangunan tidak boleh ada di dalamnya. Gambar 2.6 merupakan gambar yang menunjukkan letak ruang bebas pada SUTT dan SUTET.



**Keterangan :**



: Penampang melintang ruang bebas pada tengah gawang

- L : Jarak dari sumbu vertikal tiang ke konduktor
- H : Jarak horizontal akibat ayunan konduktor
- I : Jarak bebas Impuls petir
- C : Jarak bebas minimum vertikal
- D : Jarak andongan terendah ditengah gawang (antara dua tiang)

**Gambar 2.6** Ruang Bebas Pada SUTT dan SUTET

## 2.4 Jarak Antar Kawat

Jarak antar kawat konduktor dipengaruhi oleh beberapa hal, terutama hal-hal mekanis dari kawat konduktor. Bahan material dan diameter konduktor harus diperhatikan dalam perhitungan, karena untuk konduktor yang kecil, khususnya yang terbuat dari aluminium, memiliki berat yang lebih ringan, sehingga jika terdapat tekanan angin akan lebih mengayun secara vertical dibandingkan dengan konduktor dengan luas penampang yang lebih besar dan bahan yang lebih berat. Biasanya konduktor akan mengayun secara sinkron dengan angin, tetapi untuk *span* yang panjang dan kawat yang kecil, ada kemungkinan konduktor mengayun dengan tidak sinkron, dan ukuran konduktor serta andongan

maksimum pada titik tengah *span* adalah faktor yang harus diperhitungkan dalam menentukan jarak antar kawat konduktor. (Sumarsono, 2009)

Perhitungan jarak minimum antar kawat konduktor yang telah berhasil dalam pengujiannya, salah satu diantaranya adalah metode perhitungan menurut *VDE (Verbandes Deutscher Electrotechnischer)* adalah sebagai berikut :

$$a = 7,5 \sqrt{D} + \frac{V^2}{200} \text{ m} \dots\dots\dots (2.7)$$

dimana :

- a = jarak antar kawat dalam m
- V = tegangan dalam kV
- D = andongan dalam m

**2.5 Standar Ambang Batas Medan Magnet dan Medan Listrik**

**2.5.1 Berdasarkan SPLN-112-1994**

Berdasarkan SPLN-112-1994 pada Pasal 3 mengenai ambang batas kuat medan listrik dan induksi medan magnet untuk melindungi manusia bahwa ambang batas nilai efektif kuat medan listrik (*E<sub>b</sub>*) secara terus menerus adalah *E<sub>b</sub>* = 10 kV/m. Diukur/dihitung pada ketinggian 1 meter di atas permukaan tanah pada medan yang tidak terganggu. Serta ambang batas nilai efektif induksi medan magnet (*B<sub>b</sub>*) secara terus menerus adalah *B<sub>b</sub>* = 0,5 mT. Diukur/dihitung pada ketinggian 1 m di atas tanah pada medan yang tidak terganggu [3].

**2.5.2 Berdasarkan Rekomendasi SNI 04-6950-2003**

Badan Standarisasi Nasional tentang Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) - Nilai Ambang Batas Medan Listrik dan Medan Magnet. Standar ini berlaku sebagai pedoman untuk menetapkan ruang batas dan jarak bebas minimum pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan EkstraTinggi (SUTET). Standar ini berlaku untuk SUTT dengan tegangan nominal 66 kV dan 150 kV serta SUTET dengan tegangan nominal 275 kV dan 500 kV di Indonesia, balk dengan menggunakan menara baja maupun tiang baja/beton.

**Tabel 2.3** Rekomendasi SNI 04-6950-2003 Untuk Batas Pemaparan Terhadap Medan Listrik dan Medan Magnet yang Berlaku pada Lingkungan Kerja dan Umum untuk Frekuensi 50/60 Hz [4]

Klasifikasi	Kuat Medan Listrik (kV/m)	Kuat Medan Magnet (mT)
<b>Yang berhubungan dengan pekerjaan</b>		
Seluruh hari kerja	10	0.5
Jangka pendek	30 <sup>a)</sup>	5 <sup>b)</sup>
Hanya pada lengan	-	25
<b>Yang berhubungan dengan masyarakat umum</b>		
Sampai 24 jam/hari <sup>c)</sup>	5	0.1
Beberapa jam/hari <sup>d)</sup>	10	1

Catatan:

- a. Durasi pemaparan untuk kuat medan listrik antara 10-30 kV/m dapat dihitung dengan rumus :  $t \leq 80/E$  dimana  $t$  = lama exposure (jam) dan  $E$  = Kuat medan listrik (kV/m)
- b. Durasi pemaparan maksimum per hari adalah 2 jam
- c. Pembatasan ini berlaku untuk ruang terbuka dimana anggota masyarakat umum dapat secara wajar diperkirakan menghabiskan sebagian besar waktu selama satu hari, seperti misalnya kawasan rekreasi, lapangan untuk bertemu dan lain-lain yang semacam itu.
- d. Nilai kuat medan listrik dan kuat medan magnet dapat dilampaui untuk durasi beberapa menit/hari asalkan diambil tindakan pencegahan.

### 2.5.3 Berdasarkan Rekomendasi WHO 1990

WHO pada tahun 1990 memberikan rekomendasi untuk nilai ambang batas medan listrik seperti terlihat pada tabel 2.4 berikut:

**Tabel 2.4** Nilai Ambang Batas Medan Listrik Berdasarkan Rekomendasi WHO 1990 [4]

Intensitas Medan Listrik (kV/m)	Lama <i>Exposure per</i> 24 jam yang diperbolehkan (menit)
5	Tidak Terbatas
10	180
15	90
20	10
25	5

Bagi masyarakat umum, WHO 1990 merekomendasikan tingkat paparan maksimum adalah 5 kV/m untuk medan listrik.

## 2.6 Potensi Gangguan Kesehatan Akibat Paparan Medan Listrik

Menurut INIRC (International Non Ionizing Radiation Committee) dari International Radiation Protection Association (IRPA), nilai medan listrik dan medan magnet yang merupakan ciri kondisi paparan tidak terganggu (unperturbed electric and magnetic fields) adalah medan yang apabila semua benda dihilangkan, karena medan listrik pada umumnya akan terganggu jika berada di dekat permukaan suatu benda.

Efek biologis dikaitkan dengan paparan medan pada permukaan tubuh, medan-medan induksi yang mengakibatkan pengaliran arus dan rapat arus yang diinduksi dalam tubuh, sehingga kriteria yang dipakai dalam penentuan batas paparan biasanya adalah rapat arus yang diinduksi dalam tubuh. Arus-arus induksi dalam tubuh tidak dapat dengan mudah diukur secara langsung, sehingga batasan-batasan dalam kuat medan listrik (E) yang tidak terganggu dan rapat fluks magnetik (B) diturunkan dari nilai kriteria induksi. Medan listrik yang tidak terganggu dengan kuat medan sebesar 10 kV/m akan menginduksi rapat arus efektif kurang dari 4 mA/m<sup>2</sup> dengan rata-rata pengaliran arus di seluruh tubuh manusia. Rapat fluks magnetik sebesar 0,5 mT pada frekuensi 50/60 Hz akan menginduksi rapat arus efektif sekitar 1 mA/m<sup>2</sup> pada keliling suatu loop jaringan tubuh yang berjejari 10 cm.

UNEP (United Nations Environmental Programme), WHO (World Health Organization) dan IRPA pada tahun 1987 mengeluarkan pernyataan tentang nilai rapat arus induksi dengan efek-efek biologisnya yang ditimbulkan oleh paparan pada seluruh tubuh manusia:

- a. 1 - 10 mA/m<sup>2</sup>, tidak menimbulkan efek biologis berarti.

- b.  $10 - 100 \text{ mA/m}^2$ , menimbulkan efek biologis yang berarti, termasuk efek pada sistem penglihatan dan saraf.
- c.  $100 - 1000 \text{ mA/m}^2$ , menimbulkan stimulasi pada jaringan-jaringan yang dapat dirangsang dan berbahaya bagi kesehatan.
- d.  $> 1000 \text{ mA/m}^2$ , dapat menimbulkan gangguan pada jantung, berupa irama ekstrasistole dan fibrilasi ventricular

Secara umum, potensi gangguan kesehatan akibat radiasi elektromagnetik pada manusia, berupa efek jangka panjang, berupa potensi proses degeneratif dan keganasan (kanker) serta efek hipersensitivitas, dengan berbagai manifestasinya. Potensi terjadinya proses degeneratif dan keganasan tergantung batas paparan medan listrik dan medan magnet dalam satuan waktu. Sedangkan efek hipersensitivitas tidak harus tergantung pada batas paparan.

Radiasi elektromagnetik berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan tertentu. Berbagai potensi gangguan kesehatan tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Sistem darah, berupa leukemia dan limfoma malignum.
- b. Sistem reproduksi laki-laki, berupa infertilitas.
- c. Sistem saraf, berupa degeneratif saraf tepi.
- d. Sistem kardiovaskular, berupa perubahan ritme jantung.
- e. Sistem endokrin, berupa perubahan metabolisme hormon melatonin.
- f. Psikologis, berupa neurosis dan gangguan irama sirkadian.
- g. Hipersensitivitas.

Potensi gangguan terhadap sistem darah, kardiovaskular, reproduksi dan saraf, memerlukan waktu yang panjang dan tidak dapat dirasakan atau diamati dalam waktu pendek. Sedangkan potensi gangguan pada sistem hormonal, psikologis dan hipersensitivitas, umumnya dapat terjadi dalam waktu pendek. Manifestasi gangguan dalam waktu pendek, biasanya berupa berbagai keluhan. Keluhan yang paling banyak dikemukakan oleh penduduk yang bertempat tinggal di bawah SUTET adalah sakit kepala, pening dan kelelahan menahun.

*- Halaman ini sengaja dikosongkan -*

## **BAB III**

### **METODE DAN SIMULASI TIANG TRANSMISI 500 KV MENGGUNAKAN CST STUDIO SUITE**

Pada bab 3 ini akan dibahas mengenai metode elemen hingga (FEM) yang digunakan untuk menyelesaikan perhitungan distribusi medan magnet pada permukaan sisi tiang, dalam tiang, dan pada tulang besi tiang menggunakan *software* CST Studio Suite 2014.

#### **3.1 Metode Elemen Hingga (FEM)**

Dalam pengerjaan studi ini, untuk menganalisa distribusi medan magnet pada tiang transmisi 500 kv, menggunakan Metode Elemen Hingga atau FEM (*Finite Element Method*). Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematika dari suatu gejala fisika. Tipe masalah yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisis struktur dan kelompok analisis non-struktur. Dalam studi ini analisis yang digunakan adalah analisis untuk masalah non-struktur yaitu distribusi potensial listrik dan medan listrik. Ide dasar dari FEM adalah membagi struktur, badan (*body*), atau daerah yang dianalisa menjadi jumlah yang sangat besar dari suatu elemen hingga (*finite element*). Dengan kata lain ide dasar dari FEM adalah proses diskretisasi [2].

Elemen ini bisa dalam bentuk satu, dua, atau tiga dimensi. Dalam proses diskretisasi, Elemen adalah kumpulan titik (nodal) yang saling terhubung. Sedangkan kumpulan nodal dan elemen didefinisikan sebagai mesh. Proses pembentukan mesh ini disebut diskretisasi atau metode pemisahan (*discretization*). Diskretisasi adalah proses pembentukan suatu benda/body dengan memisahkannya ke dalam sebuah sistem yang ekuivalen dari bagian terkecil atau elemen yang saling berhubungan antar nodal sehingga menjadi dua atau lebih elemen dengan garis batas dan permukaan [5].

#### **3.2 Perhitungan Medan Magnet dengan Metode Elemen Hingga**

Dalam kalkulasi medan magnet, kekuatan medan magnet (**H**) membawa serangkaian informasi yang terdiri dari medan magnet (**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.

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

Dimana,  $\mu$  adalah permeabilitas magnet,  $\sigma$  adalah konduktivitas, dan  $\epsilon$  adalah konstanta permitivitas dielektrik.

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

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = -\omega^2 H \quad \text{dan} \quad \frac{\partial H}{\partial t} = j\omega H \quad (3.2)$$

Dimana  $\omega$  adalah frekuensi angular

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

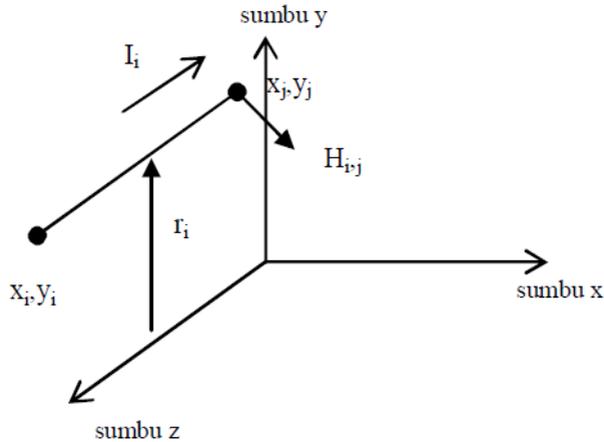
$$\nabla^2 H - j\omega\sigma\mu H + \omega^2\epsilon\mu H = 0 \quad (3.3)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right) - (j\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2)H = 0 \quad (3.4)$$

### 3.2.1 Metode Perhitungan

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



**Gambar 3.1** 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

$$H_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \quad (3.5)$$

Dalam notasi vektor dituliskan

$$H_{j,i} = \frac{I_i \times r_{j,i}}{2\pi r_{i,j}^2} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \Phi_{i,j} \quad (3.6)$$

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

$$= -\frac{y_i - y_j}{r_{ij}} u_x + \frac{x_i - x_j}{r_{ij}} u_y \quad (3.7)$$

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

$$H_{ji} = \Sigma \frac{I_i}{2\pi r_{ij}} \Phi_{ij} \quad (3.8)$$

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]

$$H_{ji} = \frac{I_i}{2\pi r_{ij}} \Phi_{ij} - \frac{I_i}{2\pi r'_{ij}} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{2}{\gamma r'_{ij}} \right)^4 \right] \Phi'_{ij} \quad (3.9)$$

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:

$\sigma$  = konduktivitas tanah (0,001 sampai dengan 0,002 S/m)

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

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

$$r'_{ij} = \left[ (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j + 2/\gamma)^2 \right]^{1/4} \quad (3.10)$$

Sedangkan

$$\Phi'_{ij} = - \left[ \frac{y_i - y_j + 2/\gamma}{r'_{ij}} \right] u_x + \frac{x_i - x_j}{r'_{ij}} u_y \quad (3.11)$$

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

$$H_x = H_{x,r} + j H_{x,i}$$

$$H_y = H_{y,r} + j H_{y,i}$$

$$H = H_x + H_y$$

### 3.2.2 Metode Pengukuran

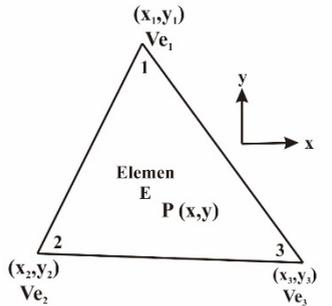
Untuk melakukan pengukuran medan magnet digunakan alat *ELF Field Strength Measurement System*, tipe HI-3604, buatan Holaday Industries Inc. Sedangkan untuk mengukur ketinggian dan jarak digunakan meteran rol.

Pengukuran di tempat terbuka dilakukan dibawah andongan pada jarak dan ketinggian yang ditentukan. Disamping itu juga pengukuran tinggi konduktor dari permukaan tanah, pengukuran temperatur, kelembaban. Untuk menentukan koordinat, digunakan GPS. Selain itu diidentifikasi beberapa hal seperti: jenis tower, isolator, sistem *ground wire*, dan pengamatan keadaan lingkungan.

Penentuan besarnya medan magnet secara riil dilakukan penelitian dengan pengukuran secara langsung di saluran transmisi 500 kV Krian - Gresik, tepatnya di Gardu Induk Driyorejo, Kabupaten Gresik.

### 3.3 Elemen Segitiga Sebagai Potensial Listrik

Untuk menyelesaikan perhitungan distribusi medan magnet pada tiang transmisi dengan metode elemen hingga, domain dari tiang transmisi dibagi kedalam bentuk elemen segitiga. Inti dari metode ini adalah dengan memperkirakan nilai potensial listrik (V) pada tiap elemen segitiga. Potensial listrik tersebut terletak pada titik yang terdapat pada tiap sudut segitiga. Setelah itu potensial listrik yang terdapat pada tiap elemen segitiga dihubungkan antara satu dengan yang lain [6],



**Gambar 3.2** Sebuah Elemen Segitiga Pada Suatu Domain

dengan bentuk dan ukuran segitiga yang berbeda. Sehingga dapat diketahui potensial listrik pada tiap-tiap titik.

Fungsi di titik  $V(x,y)$  dalam elemen segitiga dapat diperkirakan sebagai masalah liner :

$$V = a + bx + cy \tag{3.15}$$

Gambar 3.2 menunjukkan elemen segitiga dengan nilai  $V$  yang mempunyai fungsi linear dan nilai koordinat tertentu. Dengan menggunakan koordinat gambar 3.2 maka akan didapat :

$$V = \sum_{i=1}^3 V_i \alpha_i(x, y) \tag{3.16}$$

Gradien potensial listrik dapat diaplikasikan pada energi yang berada pada tiap sudut elemen segitiga yang menghubungkan distribusi potensial dalam suatu daerah pada batas yang telah ditetapkan. Gradien potensial listrik dapat dirumuskan menjadi:

$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \int |\nabla V|^2 ds \tag{3.17}$$

Dari persamaan gradien potensial listrik diatas, sehingga diperoleh nilai energinya menjadi :

$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 V_i \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j ds V_j \quad (3.18)$$

Dengan  $S_{i,j}$  yang merupakan matriks pada sebuah elemen segitiga :

$$S_{i,j} = \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j ds \quad (3.19)$$

Persamaan 3.19 dapat ditulis sebagai matriks kuadrat dalam bentuk energi :

$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r V^t S V \quad (3.20)$$

Keterangan :

$W_E$  = Energi pada medan elektrostatik

$\epsilon_r$  = Permittivitas relatif

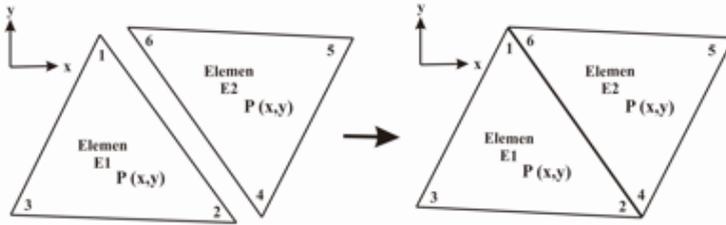
$\epsilon_0$  = Permittivitas ruang hampa =  $8,854 \times 10^{-12}$

$V$  = Matriks dari potensial listrik pada titik  $V_{e1}$ ,  $V_{e2}$ , dan  $V_{e3}$

$T$  = Transpose matriks  $V$

### 3.3.1 Penyatuan Element Segitiga

Setelah tiang transmisi didiskretisasi menjadi bentuk elemen segitiga dan memiliki nilai potensial pada setiap elemen segitiganya, maka dapat dilakukan perhitungan potensial listrik pada seluruh bagian arrester dengan menyatukan tiap-tiap elemen segitiga kecil menjadi satu bentuk arrester yang utuh. Dari nilai potensial listrik pada setiap penggabungan elemen segitiga, dapat diketahui nilai medan listrik (E), kerapatan fluks (D) dan energi (W) pada tiang beton. [6]



**Gambar 3.3** Penggabungan Elemen Segitiga

Energi dari hasil penyatuan elemen segitiga adalah :

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r V_{con}^T S V_{con} \quad (3.21)$$

Dengan,

$$S = C^T S_{dis} C \quad (3.22)$$

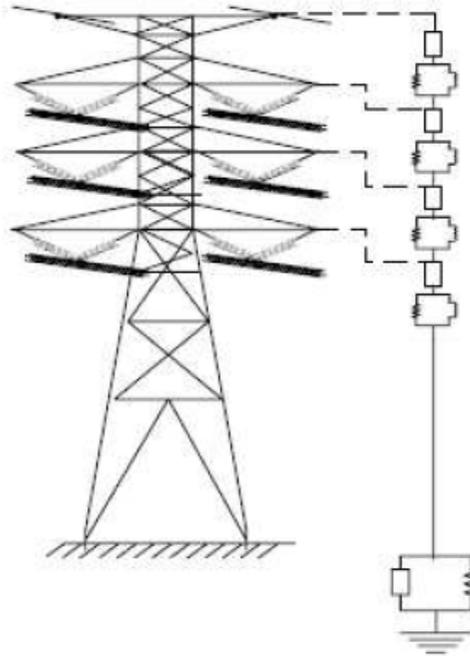
Persamaan 3.22 merupakan matriks koefisien dari segitiga yang saling terhubung. Matriks koefisien dari hasil penyatuan dua elemen segitiga seperti pada gambar 3.2 adalah :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11}^{(1)} + S_{66}^{(2)} & S_{12}^{(1)} + S_{64}^{(2)} & S_{13}^{(1)} & S_{65}^{(2)} \\ S_{21}^{(1)} + S_{46}^{(2)} & S_{22}^{(1)} + S_{44}^{(2)} & S_{23}^{(1)} & S_{45}^{(2)} \\ S_{31}^{(1)} & S_{32}^{(1)} & S_{33}^{(1)} & 0 \\ S_{56}^{(1)} & S_{54}^{(1)} & 0 & S_{55}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

### 3.4 Konstruksi dan Spesifikasi Saluran Transmisi

Pada simulasi tugas akhir ini, jenis tower transmisi yang digunakan adalah tower transmisi *Double-Circuit* dengan rating tegangan nominal 500 kV. Dalam simulasi ini dimodelkan tower transmisi dengan jenis lattice, isolator dengan jenis pos dan konduktor dengan material tembaga.

Konstruksi tower transmisi yang disimulasikan dapat dilihat pada gambar 3.4, dan spesifikasi tower transmisi dapat dilihat pada tabel 3.1.

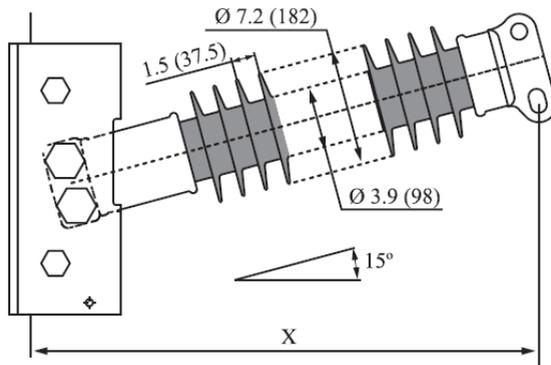


**Gambar 3.4** Konstruksi *Steel Suspension Tower* 500 kV [5]

**Tabel 3.1** Spesifikasi Tower Transmisi

Specification	UNIT	
	Voltage Class	kV
Section Length "L"	Ft	162,6
	m	49
Section Height "H"	Ft	180
	m	55

Konstruksi isolator dengan material polimer yang disimulasikan dapat dilihat pada gambar 3.5



The dimensions are in inches.  
The metric equivalents  
(millimeters) are shown in ( ).

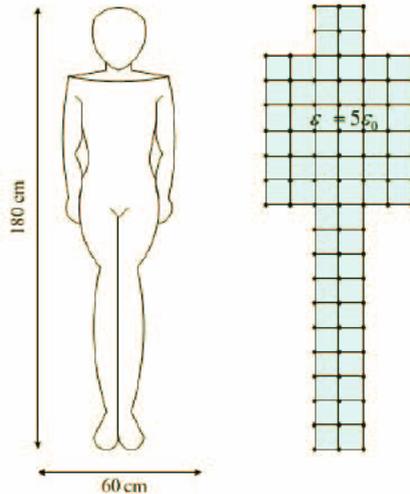
**Gambar 3.5** Konstruksi Isolator Pos 500kV

Isolator yang disimulasikan adalah tipe L4-SN791-13 dengan spesifikasi

**Tabel 3.2** Spesifikasi Isolator Type L4-SN791-13

Specification	UNIT	
	Low Frequency Flashover	kV
Critical Impulse Flashover	Positive kV	162,6
	Negative kV	49
Number of sheds		79
Panjang "X"	mm	3252
Arcing Distance	mm	3005
Leakage Distance	mm	8888
Maximum Design Centilever Load	kN	7.9
Berat	kg	100.6

Konstruksi manusia dengan material heart yang disimulasikan dapat dilihat pada gambar 3.6 dan spesifikasi dapat dilihat pada tabel 3.3



**Gambar 3.6** Konstruksi Manusia

**Tabel 3.3** Spesifikasi Manusia

Specification	UNIT	
Height	m	2
Width	m	0,4
Side	m	0,2

### 3.5 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 2014.

**Tabel 3.4** 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)	$5.96 \times 10^7$	
4	Therm. Cond. (W/K/m)		2

**Tabel 3.5** 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)	$1 \times 10^{-15}$	
4	Rho ( $\text{kg/m}^3$ )	1500	1400
5	Therm. Cond. (W/K/m)	0.2	0.2
6	Heat cap. (kJ/K/kg)		1
7	Diffusivity ( $\text{m}^2/\text{s}$ )		$1.42857 \times 10^{-7}$
8	Young's Mod. (GPa)	13	2.5
9	Poiss. Ratio	0.45	0.4
10	Thermal Exp. ( $1e^{-6}/\text{K}$ )		25

**Tabel 3.6** Data Sheet Material Manusia

No	Unit	Material
1	Epsilon	1
2	Mue	1
3	Rho ( $\text{kg/m}^3$ )	1100
4	Therm. Cond. (W/K/m)	0.293
5	Heat cap. (kJ/K/kg)	3.5

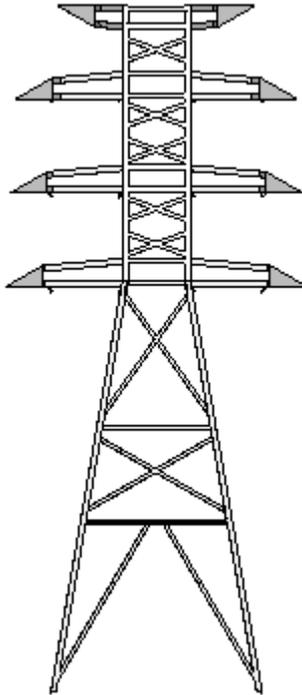
No	Unit	Material
6	Diffusivity ( $m^2/s$ )	$7.61039e \times 10^{-8}$
7	Bloodflow ( $W/K/m^3$ )	9100
8	Metab. Rate ( $W/m^3$ )	1620

### 3.6 Pemodelan Saluran Transmisi

Dengan menggunakan software CST Studio Suite 2014, saluran transmisi dimodelkan dalam bentuk 3 dimensi. Pemodelan dilakukan dengan aplikasi *LF Solver* dalam software CST Studio Suite 2014. Parameter satuan yang digunakan dalam pemodelan adalah meter untuk luas dan volume, dan menggunakan hertz untuk frekuensinya.

### 3.7 Pemodelan Menara, 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 3.7.



**Gambar 3.7** 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 3.8.



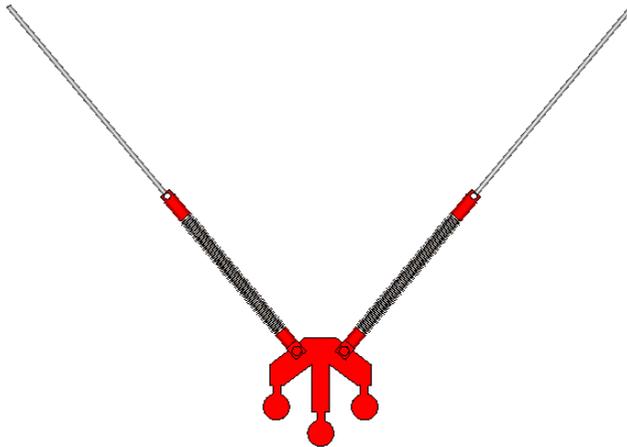
**Gambar 3.8** Pemodelan Batang Konduktor dalam Isolator

Pemodelan selanjutnya adalah memasang sirip-sirip isolator dengan material *polymide* dan memasang *end fitting* dengan material *iron*. Hasil pemodelan isolator dapat dilihat pada gambar 3.9.



**Gambar 3.9** Pemodelan Isolator

Setelah pemodelan isolator selesai, kita lakukan pemasangan isolator pada suspensi isolator. Dari hasil pemodelan kita dapatkan hasil yang ditunjukkan pada gambar 3.10.



**Gambar 3.10** Pemodelan Isolator dengan Suspensi

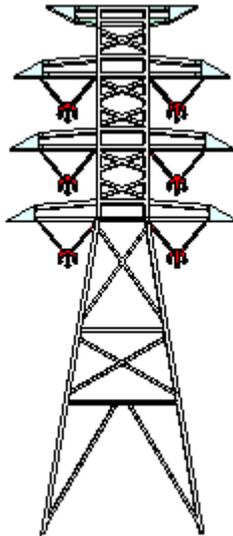
Dan Pemodelan manusia dapat dilihat pada gambar 3.11.



**Gambar 3.11** Pemodelan Manusia

### 3.7.1 Pemodelan Pemasangan Saluran Transmisi

Langkah selanjutnya yang harus dilakukan adalah pemasangan saluran transmisi. Pertama dilakukan pemasangan isolator dengan suspensi di tower transmisi. Hasil dapat dilihat pada gambar 3.12.



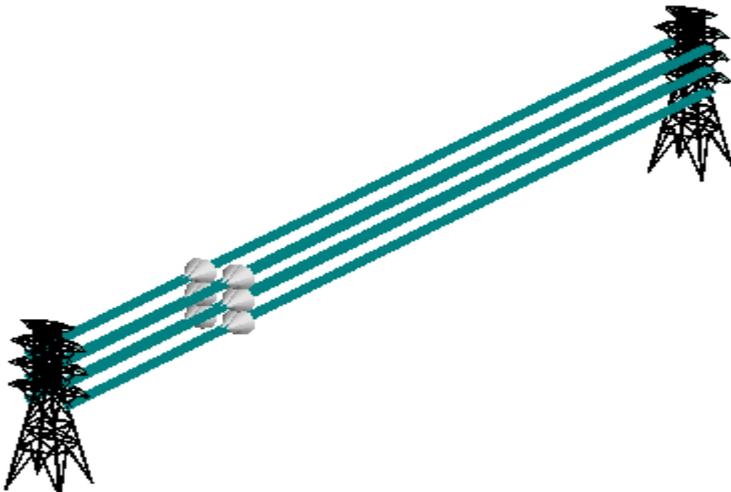
**Gambar 3.12** Pemodelan Tower dengan Isolator

Tower kedua didirikan dengan jarak antar tower sepanjang 300 meter. Hasil dari pemodelan dua tower dapat dilihat pada gambar 3.13.



**Gambar 3.13** Pemodelan Dua Tower Transmisi

Langkah terakhir yang dilakukan adalah memasang konduktor di kedua tower transmisi yang sudah didirikan. Hasil akhir pemodelan saluran transmisi dapat dilihat pada gambar 3.14.



**Gambar 3.14** Pemodelan Saluran Transmisi

*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*

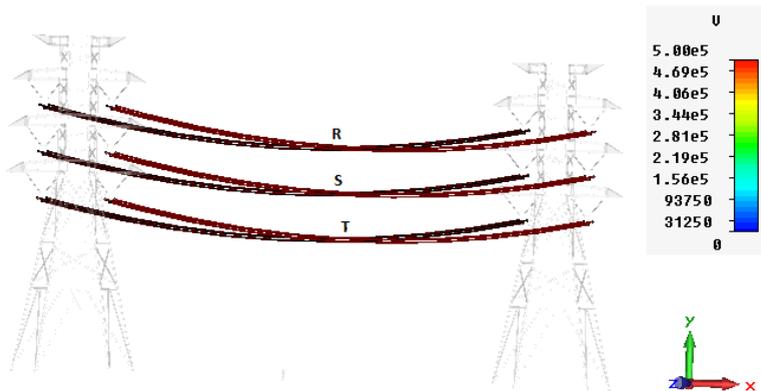
## BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISA DATA

Pada bab ini akan dijelaskan hasil simulasi dan analisis hasil simulasi. Hal ini dilakukan dengan tujuan mengetahui perbandingan nilai distribusi medan magnet pada saluran transmisi.

### 4.1 Tegangan Kerja Saluran Transmisi

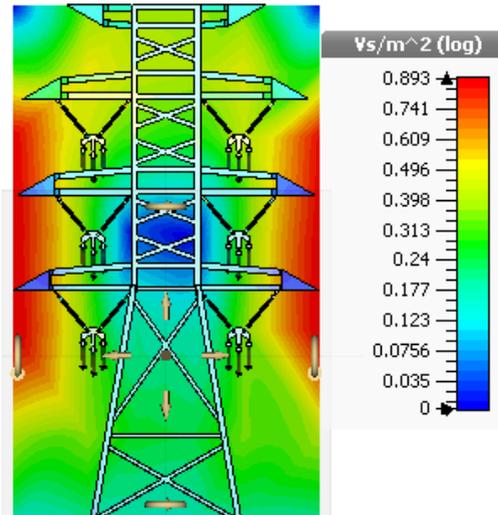
Tegangan yang bekerja pada saluran transmisi sesuai dengan tegangan nominal saluran transmisi, yaitu 500 kV.

Gambar 4.1 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.

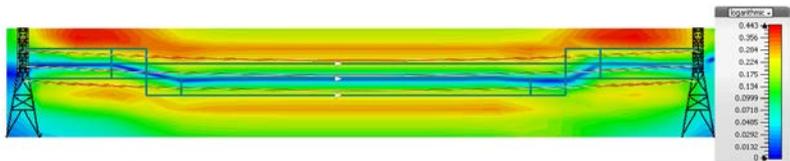


**Gambar 4.1** Tegangan Kerja Saluran Transmisi

Setelah konduktor diberi tegangan, dilakukan simulasi menggunakan *LF Solver* dengan menggunakan frekuensi 50 Hz. Hasil dari simulasi tampak depan dapat dilihat digambar 4.2 dan tampak samping dapat dilihat digambar 4.3.



(a)



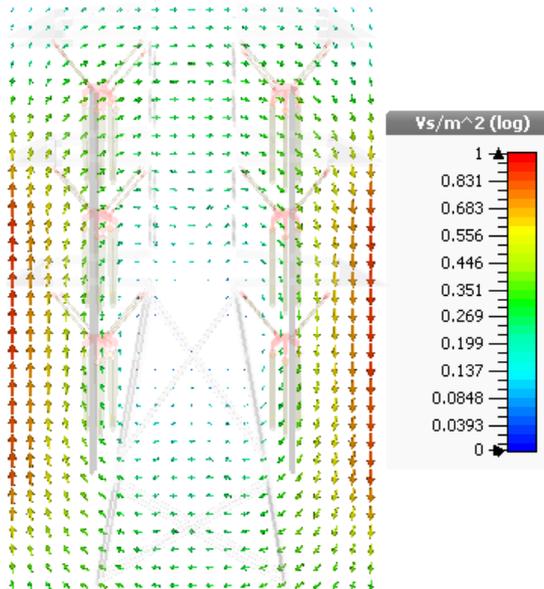
(b)

**Gambar 4.2** Distribusi Medan Magnet di Saluran Transmisi, (a) Tampak Depan (b) Tampak Samping

Pada gambar 4.2, 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.

#### 4.2 Arah Distribusi Medan Magnet di Saluran Transmisi

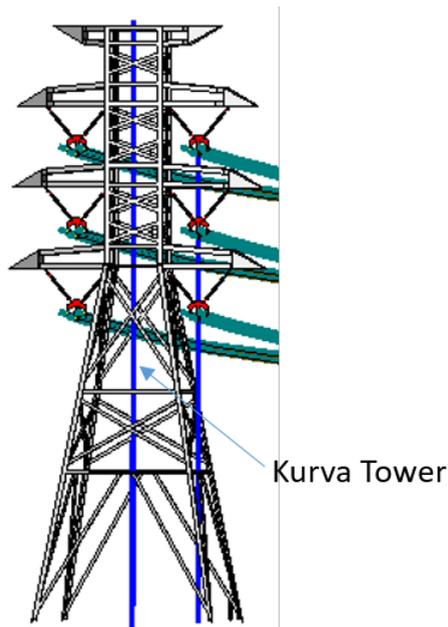
Arah persebaran medan magnet mengalami penyebaran ke segala arah terutama pada bagian konduktor yang diberikan tegangan, *tower*, dan juga isolator pos. Besar kecilnya medan dapat dilihat dari besar kecilnya ukuran panah-panah pada gambar 4.3. Nilai medan magnet terbesar  $1 \text{ Vs/m}^2$  atau sama dengan 1 Tesla disekitar konduktor yang diberi potensial dan nilai terkecil  $0 \text{ Vs/m}^2$  di area tengah *tower* transmisi.



**Gambar 4.3** Arah Persebaran Medan Magnet pada Saluran Transmisi

### 4.3. Analisa Medan Magnet pada Tower

Di subbab ini akan dilakukan pengamatan dan juga Analisa hasil simulasi *If solver* dalam *software* CST Studio Suite 2014 dengan letak kurva di badan *tower* transmisi. Garis biru dengan tinggi 83 m yang terdapat pada gambar 4.4 menunjukkan bagian yang diukur nilai medan magnetnya.

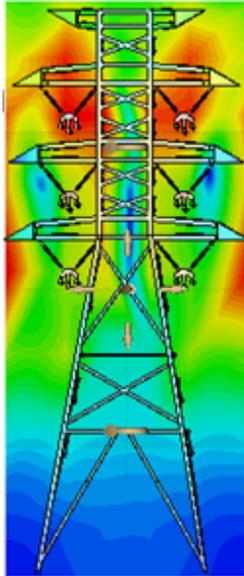


Gambar 4.4 Garis Kurva pada Tower

#### 4.3.1 Hasil Simulasi pada Tower

Pada subbab ini akan dilakukan pengamatan serta analisa medan magnet pada bagian saluran transmisi, lebih tepatnya pada *tower*.

Dapat dilihat digambar 4.5 nilai medan magnet pada *tower*. Warna merah menunjukkan bagian terbesar yang terdapat pada lengan *phase* R dan *tower* bagian samping kanan dan kiri.

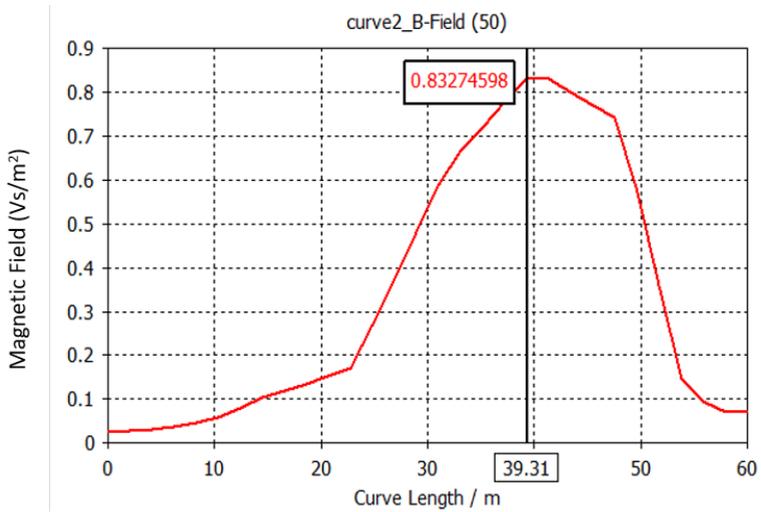


**Gambar 4.5** Hasil Simulasi pada *Tower*

#### **4.3.2 Grafik dan Kurva pada *Tower***

Pada subbab ini akan dilakukan pengamatan serta analisa medan magnet pada bagian saluran transmisi, lebih tepatnya pada *tower*.

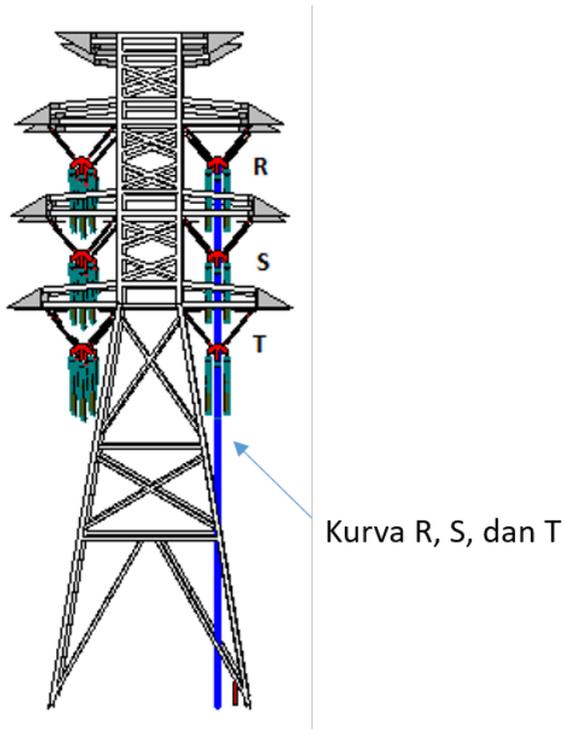
Dapat dilihat digambar 4.6 nilai medan magnet pada *tower* mengalami naik turun. Pada titik awal peningkatan konstan, lalu pada titik 23 mengalami peningkatan yang signifikan dan nilai tertinggi ada pada ketinggian 39,31m yang bernilai  $0,83 \text{ Vs/m}^2$ , lalu turun hingga titik 60.



**Gambar 4.6** Kurva pada *Tower*

#### 4.4 Analisa Medan Magnet pada *Phase R, S, dan T*

Dalam subbab ini akan dijelaskan paparan medan magnet yang dihasilkan oleh saluran transmisi yang terletak di konduktor *phase R, S, dan T*. Penarikan garis kurva yang digunakan di grafik *R, S, T* dapat dilihat pada gambar 4.7 dengan tinggi 48 m dan sejajar di tiap-tiap *phase*.

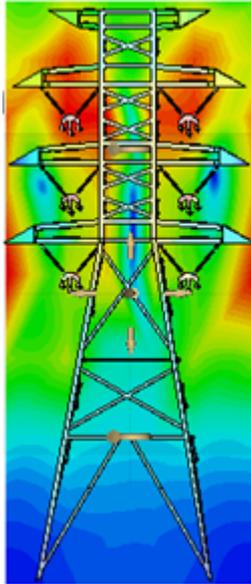


**Gambar 4.7** Garis Kurva pada *Phase R, S, T*

#### **4.4.1 Hasil Simulasi pada *Phase R, S, dan T***

Pada subbab ini akan dilakukan pengamatan serta analisa medan magnet pada bagian saluran transmisi, lebih tepatnya pada *phase R, S, dan T*.

Dapat dilihat digambar 4.8 nilai medan magnet pada saluran transmisi di 3 *phase*. Warna merah menunjukkan bagian terbesar dari nilai medan magnetnya yaitu sebesar  $0,148 \text{ Vs/m}^2$ .

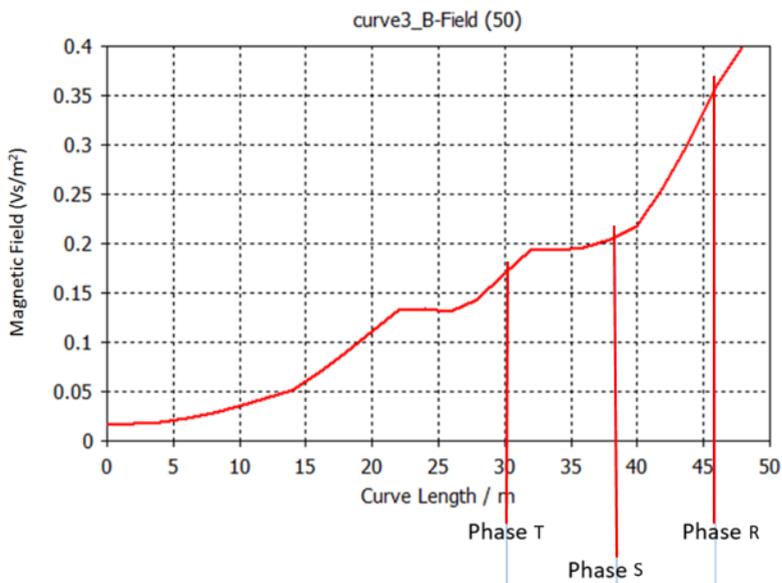


**Gambar 4.8** Hasil Simulasi pada *Phase R, S, dan T*

#### **4.4.2 Grafik dan Kurva *Phase R, S, dan T***

Pada subbab ini akan dilakukan pengamatan serta analisa medan magnet pada bagian saluran transmisi, lebih tepatnya pada *phase R, S, dan T*.

Dapat dilihat digambar 4.9 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  $0,17 \text{ Vs/m}^2$  dan mengalami peningkatan hingga titik R. Pada titik S dengan tinggi 38m bernilai  $0,21 \text{ Vs/m}^2$ . Dan pada titik R dengan tinggi 46m bernilai  $0,35 \text{ Vs/m}^2$



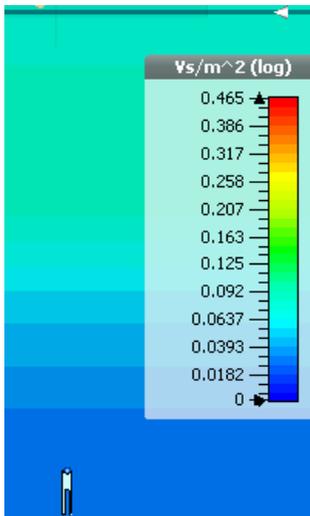
**Gambar 4.9** Kurva *Phase R, S, dan T*

#### 4.5 Analisa Medan Magnet pada Konduktor (Jarak Terendah) dan Manusia

Di subbab ini akan dilakukan pengamatan dan juga Analisa hasil simulasi *If solver* dalam *software CST Studio Suite 2014* dengan letak kurva di tengah saluran transmisi atau di bawah konduktor (jarak terendah). Garis biru dengan tinggi 25 m yang terdapat pada gambar 4.10 menunjukkan bagian yang diukur nilai medan magnetnya. Dan pada gambar 4.11 merupakan gambar hasil simulasi yang menunjukkan bahwa nilai medan magnet pada manusia di bawah konduktor (jarak terendah) yang terdapat di saluran transmisi tidak terlalu besar.



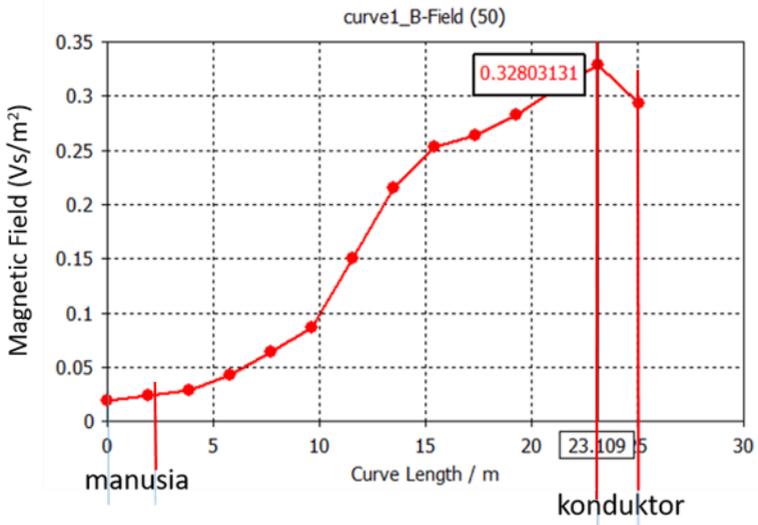
**Gambar 4.10** Garis Kurva pada Konduktor dan Manusia



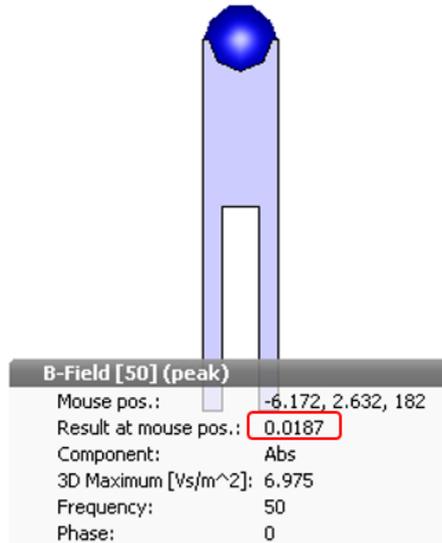
**Gambar 4.11** Hasil Simulasi pada Konduktor dan Manusia

### 4.5.1 Grafik dan Kurva pada Konduktor (Jarak Terendah) dan Manusia

Nilai medan magnet di konduktor saluran transmisi mengalami kenaikan dan sedikit penurunan. Gambar 4.12 pada manusia dengan ketinggian 0 - 2,2 m terlihat garis kurva mengalami sedikit kenaikan dengan nilai medan magnet rata-rata  $0,025 \text{ Vs/m}^2$ , lalu pada ketinggian 10 m mengalami kenaikan yang drastis hingga pada titik puncak di tepi konduktor yaitu di ketinggian 23 m yang bernilai  $0,328 \text{ Vs/m}^2$ . 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  $0,0187 \text{ Vs/m}^2$ .



**Gambar 4.12** Kurva pada Konduktor dan Manusia



**Gambar 4.13** Nilai Medan Magnet pada Manusia di Bawah Konduktor (Jarak Terendah)

#### 4.6. Perbandingan Medan Magnet pada Manusia di Bawah Saluran Transmisi

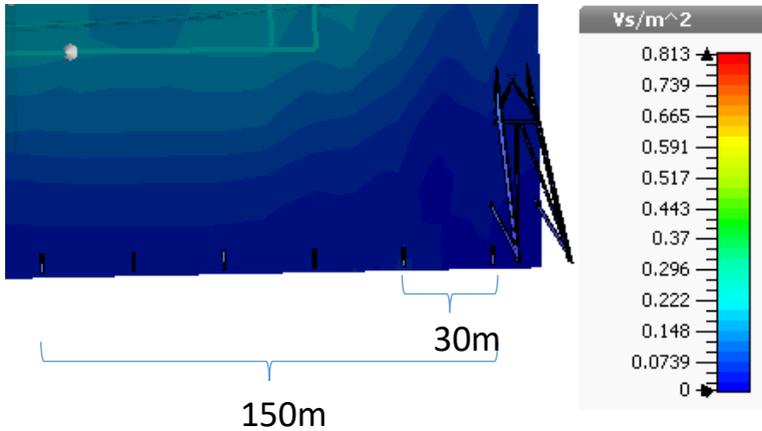
Dalam bahasan ini, akan dilakukan perbandingan antar manusia dengan jarak masing-masing 30 m pada sepanjang saluran transmisi. Pada gambar 4.14 dapat dilihat pemodelan manusia yang berjarak 0, 30, 60, 90, 120, dan 150 meter dari *tower* terdekat.



**Gambar 4.14** Pemodelan manusia

##### 4.6.1. Hasil Simulasi pada Manusia

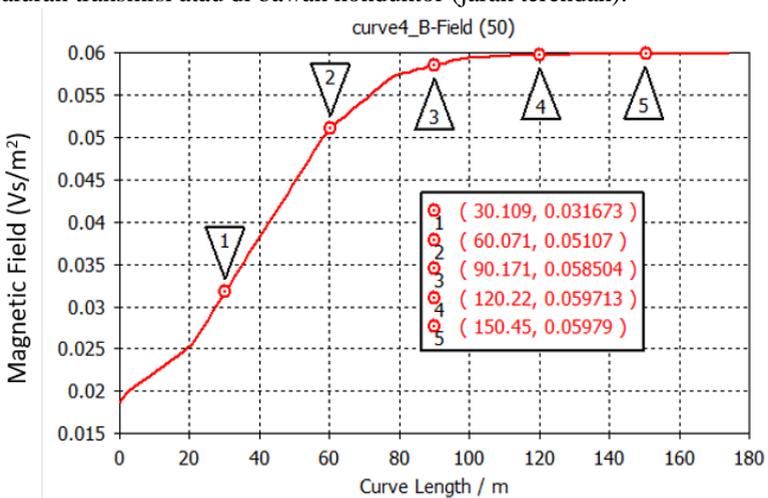
Pada gambar 4.15 dapat dilihat hasil simulasi persebaran medan magnet pada manusia. Dimana terlihat bahwa bertambah jauh jarak manusia di sepanjang saluran transmisi dari *tower* maka nilai medan magnetnya semakin besar.



**Gambar 4.15** Hasil Simulasi pada Manusia

#### 4.6.2. Grafik dan Kurva pada Manusia

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 150 hampir konstan di  $0,06 \text{ Vs/m}^2$ . Ini menandakan bahwa nilai medan magnet terbesar yaitu  $0,06 \text{ Vs/m}^2$  terletak di tengah saluran transmisi atau di bawah konduktor (jarak terendah).



**Gambar 4.16** Kurva pada Manusia

### 4.6.3 Perbandingan Pengukuran Langsung dengan Hasil Simulasi secara Horizontal terhadap Konduktor

Setelah mendapatkan hasil kurva dan grafik dari simulasi *lf solver* dalam *software* CST Studio Suite 2014, 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 langsung medan magnet adalah mengukur jarak yang akan diukur. Jarak pengukuran disesuaikan dengan jarak yang ada di pemodelan simulasi saluran transmisi.

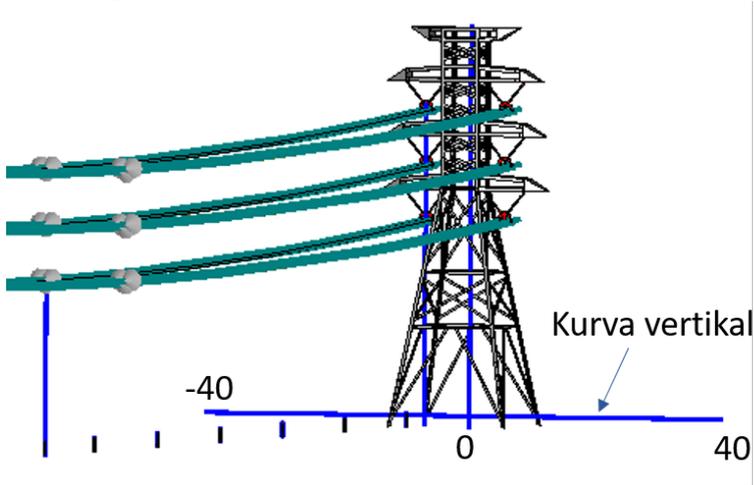
Setelah mendapatkan nilai-nilai medan magnet pada titik-titik yang sudah ditentukan dengan menggunakan simulasi *lf solver* dalam *software* CST Studio Suite 2014 dan pengukuran langsung di Gardu Induk Driyorejo, kita dapat membandingkan nilai-nilai medan magnet tersebut menggunakan grafik. Berikut hasil perbandingan simulasi dengan pengukuran ditunjukkan di tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Perbandingan Hasil Simulasi dengan Pengukuran secara Horizontal terhadap Konduktor

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

#### 4.6.4 Perbandingan Pengukuran Langsung dengan Hasil Simulasi secara Vertikal terhadap Konduktor

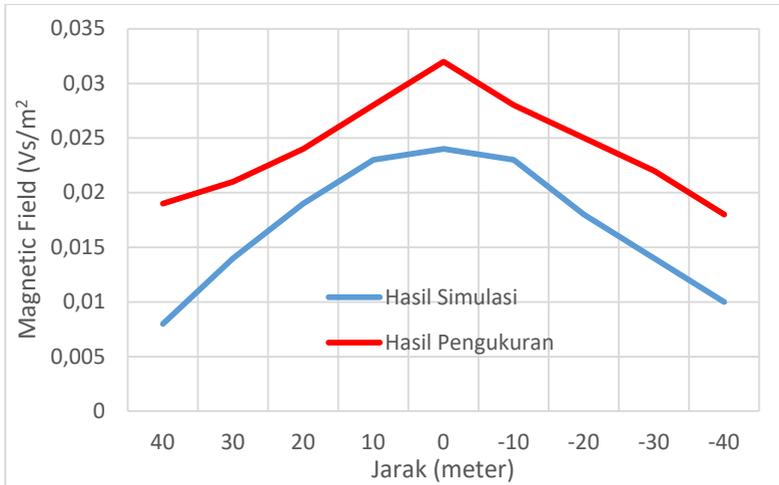
Pada bahasan ini, akan dibahas pengukuran langsung secara vertikal atau tegak lurus terhadap konduktor untuk mengetahui berapa jarak aman terhadap manusia. Pada gambar 4.17 dapat dilihat kurva vertikal terhadap konduktor yang berjarak 80 m dengan ketinggian 2 m. Dan hasil dari pengukuran ditunjukkan di tabel 4.2 dan gambar 4.18.



**Gambar 4.17** Garis Kurva Vertikal terhadap Konduktor

**Tabel 4.2** Perbandingan Hasil Simulasi dengan Pengukuran secara Vertikal terhadap Konduktor

Jarak (meter)	Hasil Simulasi (Vs/m <sup>2</sup> )	Hasil Pengukuran (Vs/m <sup>2</sup> )
40	0,008	0,019
30	0,014	0,021
20	0,019	0,024
10	0,023	0,028
0	0,024	0,032
-10	0,023	0,028
-20	0,018	0,025
-30	0,014	0,022
-40	0,010	0,018



**Gambar 4.18** Grafik Perbandingan Hasil Simulasi dengan Pengukuran secara Vertikal terhadap Konduktor

Pada gambar 4.18 dapat dilihat nilai perbandingan hasil simulasi dengan hasil pengukuran langsung dan terlihat bahwa gambar grafik yang dihasilkan sama, tetapi nilai pengukuran memiliki nilai lebih tinggi daripada nilai simulasi, ini dikarenakan pada hasil simulasi masih terdapat nilai error.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil simulasi dan analisa data, dapat diambil beberapa kesimpulan dari distribusi medan magnet pada saluran transmisi dan pengaruhnya terhadap operator adalah sebagai berikut:

1. Nilai medan magnet terbesar pada saluran transmisi terletak di bagian samping kanan dan kiri dari menara transmisi yaitu sebesar  $0,83 \text{ Vs/m}^2$  dan yang terkecil terletak pada manusia yang berada di bawah konduktor yaitu sebesar  $0,0187 \text{ Vs/m}^2$ . 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.
2. 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.
3. 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.
4. Dari hasil pengukuran secara vertikal terhadap konduktor diketahui bahwa jarak aman terhadap manusia berjarak 20 m dari titik tengah tower atau 11 m dari sisi tower yang bernilai  $0,024 \text{ Vs/m}^2$ .

#### **5.2 Saran**

Saran untuk kedepannya apabila menggunakan *software* CST Studio Suite 2014 agar mempelajari dulu sebelumnya atau mengikuti pelatihan tentang *software* tersebut dan memperhatikan dalam pemodelan dan variasi simulasi yang terdapat di *software*. Sehingga dalam melakukan perhitungan nilai medan magnet, hasil yang

didapatkan bisa memuaskan dan sesuai dengan yang diharapkan. Untuk studi selanjutnya dapat dilakukan pemodelan lain untuk perhitungan distribusi medan magnet.

## 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, "*Analisa 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
- [9] I Made Yulistya Negara, "*Teknik Tegangan Tinggi Prinsip dan Aplikasi Praktis*", Graha Ilmu, 2013
- [10] Irwan Prasetyo, "*Analisis Kuat Medan Listrik dan Medan Magnet Pada Perencanaan Pengoperasian SUTT 150 kV Perean-Ubud*", Universitas Udayana, 2004
- [11] Suwitno dan Fri Murdiyah, "*Kajian Medan Magnet dan Medan Listrik Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV Kampar-Pekanbaru Berdasarkan Rekomendasi IRPA/INIRC WHO*", Universitas Riau, 2010

*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*

## RIWAYAT HIDUP



**Aditya Dwinugraha**, lahir di Bandung, 21 Desember 1994. Merupakan anak kedua dari tiga saudara dan merupakan anak dari pasangan Sastra Viqaya dan Herlina Agustina. Riwayat pendidikan penulis yaitu, SDN Cijagra 1 Bandung (2000-2003), lalu melanjutkan di SDN Gedongan 4 Mojokerto (2004-2006), melanjutkan studinya di SMP Taruna Nusa Harapan dan lulus pada tahun 2009 Kemudian melanjutkan di SMA Taruna Nusa Harapan dan lulus pada tahun 2012. Kemudian melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2012.

Selama kuliah, penulis aktif di organisasi KALPATARU Elektro ITS sebagai Kepala Divisi Kekelurgaan. Penulis mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga dan fokus pada riset mengenai pengaruh medan pada tiang transmisi.

Penulis dapat dihubungi melalui email :  
adithelits@gmail.com

*-Halaman ini sengaja dikosongkan-*