

SKRIPSI
KUANTISASI EMISI MEDAN MAGNET PADA ISOLASI
KABEL DAYA BAWAH TANAH DENGAN MATLAB

Disusun dan diajukan oleh:

MARNOLIS YOGI
D041 18 1034



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA
2024



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

KUANTISASI EMISI MEDAN MAGNET PADA ISOLASI KABEL DAYA BAWAH TANAH DENGAN MATLAB

Disusun dan diajukan oleh:

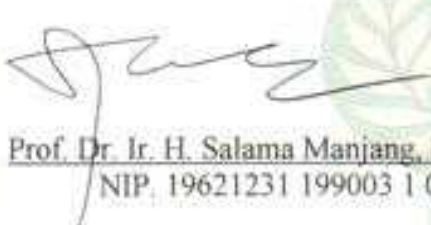
MARNOLIS YOGI
D041 18 1034


Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 13 Maret 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T., IPM
NIP. 19621231 199003 1 024


Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19770322 200501 1 001

Ketua Departemen Teknik Elektro,



Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., IPM
NIP. 19691026 199412 2 001



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Marnolis Yogi

NIM : D04118134

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

KUANTISASI EMISI MEDAN MAGNET PADA ISOLASI KABEL DAYA BAWAH TANAH DENGAN MATLAB

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 13 Maret 2024

Yang Menyatakan



Marnolis Yogi



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat, anugerah dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Kuantisasi Emisi Medan Magnet pada Isolasi Kabel Daya Bawah Tanah dengan MATLAB” ini dengan baik. Penyusunan skripsi ini bertujuan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis dapat menyelesaikan skripsi ini berkat usaha, kemauan penulis, serta adanya bimbingan, arahan, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan ketulusan dan kerendahan hati, penulis hendak mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis yang selalu memberikan doa, motivasi dan dukungan kepada penulis. Kakak penulis yang selalu mendukung, dan mendoakan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, M.T., IPM selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, saran, arahan dan dukungan dalam penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Ir. Tajuddin Waris, M.T. selaku Dosen Penguji I dan Bapak Dr. Ir. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyusunan skripsi ini.
4. Bapak/Ibu dosen yang telah banyak memberikan ilmunya serta staff/pegawai Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas bantuannya selama penulis menempuh proses perkuliahan.
5. Rekan-rekan mahasiswa seperjuangan CAL18RATOR, serta teman-teman Lab Riset Grup Infrastruktur Ketenagalistrikan dan T3 yang telah banyak memberikan bantuan dan masukan kepada penulis.



uarga besar penulis yang selalu memberikan doa, dukungan, dan bantuan
uma penulis menjalani perkuliahan hingga dapat menyelesaikan skripsi

7. Teman-teman serta semua pihak yang telah membantu penulis menyelesaikan skripsi ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Meskipun telah berusaha menyelesaikan skripsi ini sebaik mungkin, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Gowa, 13 Maret 2024

Marnolis Yogi



ABSTRAK

MARNOLIS YOGI. *Kuantisasi Emisi Medan Magnet pada Isolasi Kabel Daya Bawah Tanah dengan MATLAB* (dibimbing oleh Salama Manjang dan Yusri Syam Akil)

Saluran transmisi maupun distribusi bawah tanah menggunakan kabel daya bawah tanah sebagai penghantar arus listrik. Dalam penyaluran energi listrik, arus yang mengalir pada kabel daya bawah tanah ini dapat menghasilkan medan elektromagnetik disekitar kawat penghantarnya. Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI) oleh Badan Standardisasi Nasional, batas paparan medan listrik dan medan magnet 50/60 Hz untuk masyarakat umum sampai 24 jam per hari yaitu, batas medan listrik 5 kV/m, batas medan magnet 0,1 mT. Sedangkan untuk beberapa jam per hari, batas medan listrik 10 kV/m, dan batas medan magnet sebesar 1 mT. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui proses persebaran dan besarnya emisi medan magnet. Penelitian ini juga dilakukan dengan menganalisis kuantisasi emisi medan magnet pada kabel daya bawah tanah dengan menggunakan MATLAB. Besarnya emisi medan magnet yang dihasilkan pada simulasi yang telah dilakukan pada tiap lapisan kabel bergantung pada besarnya arus yang mengalir pada kabel. Besar medan magnet tertinggi yang dihasilkan pada konduktor kabel adalah sebesar 10,838 mT pada arus maksimal sebesar 821 A. Medan magnet terendah pada selubung PVC kabel sebesar 0,705 mT saat arus 100 A. Sedangkan pada simulasi saat kabel ditanam di dalam tanah, besar medan magnet tertinggi adalah sebesar 2052,5 μ T pada jarak 5 cm dari permukaan kabel dengan arus 821 A. Besar medan magnet terendah adalah sebesar 6,6 μ T pada jarak 300 cm dari permukaan kabel dengan arus 100 A. Pada hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada jarak 0-60 cm dari permukaan kabel, nilai medan magnet sudah melebihi ambang batas paparan untuk masyarakat umum. Sehingga sebaiknya kabel di tanam pada kedalaman 80 cm atau lebih.

Kata Kunci: Kabel Tanah, Medan Magnet, MATLAB, Arus.



ABSTRACT

MARNOLIS YOGI. *Quantization of Magnetic Field Emissions in Underground Power Cable Insulation with MATLAB* (supervised by Salama Manjang and Yusri Syam Akil)

Underground transmission and distribution lines are use underground power cables to conduct electric current. In distributing electrical energy, the current flowing in underground power cables can produce an electromagnetic field around the conducting wire. According to the Indonesian National Standard (SNI) by the National Standardization Agency, the exposure limit for electric fields and magnetic fields of 50/60 Hz for the general public up to 24 hours per day, the electric field limit is 5 kV/m, the magnetic field limit is 0.1 mT. Meanwhile, for several hours per day, the electric field limit is 10 kV/m, and the magnetic field limit is 1 mT. This research aims to determine the distribution process and magnitude of magnetic field emissions. This research was also carried out by analyzing the quantization of magnetic field emissions in underground power cables using MATLAB. The amount of magnetic field emission produced in the simulation that has been carried out on each layer of the cable depends on the amount of current flowing in the cable. The highest magnetic field generated in the cable conductor was 10.838 mT at a maximum current of 821 A. The lowest magnetic field in the PVC cable sheath was 0.705 mT when the current was 100 A. Meanwhile, in the simulation when the cable was buried in the ground, the highest magnetic field is 2052.5 μ T at a distance of 5 cm from the cable surface with a current of 821 A. The lowest magnetic field is 6.6 μ T at a distance of 300 cm from the cable surface with a current of 100 A. From the simulation results can be seen that at a distance of 0-60 cm from the cable surface, magnetic field values have exceeded the exposure threshold for the general public. So the cable should be laying at a depth of 80 cm or more.

Keywords: Underground Cable, Magnetic Field, MATLAB, Current.



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	2
1.4 Ruang Lingkup.....	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Kabel Tanah.....	5
2.2. Konstruksi Kabel Bawah Tanah	6
2.3. Jenis-jenis Kabel Daya Bawah Tanah.....	8
2.4. Medan Magnet	15
2.5. Perhitungan Besar Medan Magnet di Sekitar Konduktor Berarus.....	16
2.6. Ambang Batas Medan Listrik dan Medan Magnet	20
2.7. Simulasi Dengan Program MATLAB	21
2.8. Penelitian Terdahulu	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	24
3.1. Rancangan Penelitian.....	24
3.2. Waktu dan Tempat Penelitian.....	24
3.3. Alat dan Bahan.....	24
Parameter Observasi	24
Prosedur Penelitian	24
Diagram Alir Pelaksanaan	27



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	28
4.1. Konstruksi Serta Spesifikasi Kabel Daya Bawah Tanah	28
4.2. Simulasi Kabel Daya Bawah Tanah Pada MATLAB	30
4.3. Hasil Simulasi Emisi Medan Magnet Kabel Daya Bawah Tanah	40
4.4. Perbandingan Emisi Medan Magnet Kabel Daya Bawah Tanah.....	67
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	72
5.1. Kesimpulan	72
5.2. Saran	73
DAFTAR PUSTAKA	74



DAFTAR TABEL

Tabel 1	Nilai ambang batas medan listrik dan medan magnet	20
Tabel 2	Data konstruksi kabel tanah N2XSY 12/20(24) kV	28
Tabel 3	Data elektris kabel N2XSY 12/20(24) kV	29
Tabel 4	Data permeabilitas relatif material	29
Tabel 5	Besar medan magnet pada permukaan tiap lapisan kabel tanah pada arus 100 A.....	44
Tabel 6	Besar medan magnet kabel N2XSY dalam lapisan tanah dan udara.....	47
Tabel 7	Besar medan magnet pada permukaan tiap lapisan kabel tanah pada arus 300 A.....	50
Tabel 8	Besar medan magnet kabel N2XSY dalam lapisan tanah dan udara.....	52
Tabel 9	Besar medan magnet pada permukaan tiap lapisan kabel tanah pada arus 500 A.....	55
Tabel 10	Besar medan magnet kabel N2XSY dalam lapisan tanah dan udara.....	57
Tabel 11	Besar medan magnet pada permukaan tiap lapisan kabel tanah pada arus 700A.....	60
Tabel 12	Besar medan magnet kabel N2XSY dalam lapisan tanah dan udara.....	62
Tabel 13	Besar medan magnet pada permukaan tiap lapisan kabel tanah pada arus 821A.....	65
Tabel 14	Besar medan magnet kabel N2XSY dalam lapisan tanah dan udara.....	67
Tabel 15	Perbandingan emisi medan magnet pada tiap lapisan kabel tanah dengan besaran arus berbeda-beda	68
Tabel 16	Besar medan magnet kabel N2XSY dalam lapisan tanah dan udara.....	69
Tabel 17	Perbandingan medan magnet hasil simulasi dan pengukuran	71



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Konstruksi Kabel Bawah Tanah.....	6
Gambar 2	Ilustrasi pembentukan XLPE	9
Gambar 3	Bagian-bagian Kabel N2XSY	9
Gambar 4	Bagian-bagian Kabel N2XSEY.....	11
Gambar 5	Bagian-bagian Kabel N2XSEFGbY.....	12
Gambar 6	Bagian-bagian Kabel N2XSEBY	13
Gambar 7	Medan magnet pada konduktor berarus	15
Gambar 8	Kawat konduktor berarus yang menghasilkan medan magnet di sekitarnya.	16
Gambar 9	Gambar Kawat lurus panjang dipandang dari arah datangnya arus (arus mengalir dari belakang kertas kearah depan). Juga digambarkan arah medan magnet pada koordinat (x,y)	17
Gambar 10	Diagram alir pelaksanaan	27
Gambar 11	Bentuk geometri kabel N2XSY.....	30
Gambar 12	Bagian-bagian kabel N2XSY	31
Gambar 13	Bentuk geometri konduktor.....	31
Gambar 14	Bentuk batas konduktor.....	32
Gambar 15	Kotak dialog <i>Boundary Conditions</i>	32
Gambar 16	PDE Mode konduktor.....	34
Gambar 17	Kotak Dialog <i>PDE Specification</i>	34
Gambar 18	Mesh segitiga pada konduktor.....	35
Gambar 19	<i>Triangle Quality</i>	36
Gambar 20	Simulasi distribusi medan magnet pada konduktor kabel N2XSY	37
Gambar 21	Kotak dialog <i>plot selection</i>	38
Gambar 22	Kontur pada konduktor kabel daya bawah tanah	38
Gambar 23	Arah fluks magnet pada konduktor kabel daya bawah tanah.....	39
Gambar 24	Pemodelan penanaman kabel daya bawah tanah.....	39
Gambar 25	Simulasi distribusi medan magnet pada konduktor kabel N2XSY dengan arus 0A.....	40
Gambar 26	Simulasi distribusi medan magnet pada tabir konduktor kabel N2XSY dengan arus 0A.....	40



Gambar 27 Simulasi distribusi medan magnet pada isolasi XLPE kabel N2XSY dengan arus 0A.....	41
Gambar 28 Simulasi distribusi medan magnet pada tabir isolasi kabel N2XSY dengan arus 0A.....	41
Gambar 29 Simulasi distribusi medan magnet pada selubung PVC Kabel N2XSY dengan arus 0A.....	41
Gambar 30 Simulasi Distribusi medan magnet pada konduktor kabel N2XSY dengan arus 100A.....	42
Gambar 31 Simulasi distribusi medan magnet pada tabir konduktor kabel N2XSY dengan arus 100 A.....	43
Gambar 32 Simulasi distribusi medan magnet pada isolasi XLPE kabel N2XSY dengan arus 100A.....	43
Gambar 33 Simulasi distribusi medan magnet pada tabir isolasi kabel N2XSY dengan arus 100A.....	43
Gambar 34 Simulasi distribusi medan magnet pada selubung PVC kabel N2XSY dengan arus 100A.....	44
Gambar 35 Grafik medan magnet tiap lapisan kabel pada arus 100 A.....	45
Gambar 36 Simulasi distribusi medan magnet kabel N2XSY dengan arus 100A (a) di dalam tanah pada kedalaman 1m (b) di udara pada jarak 3m....	46
Gambar 37 Simulasi Distribusi medan magnet pada konduktor kabel N2XSY dengan arus 300A.....	48
Gambar 38 Simulasi distribusi medan magnet pada tabir konduktor kabel N2XSY dengan arus 300 A.....	48
Gambar 39 Simulasi distribusi medan magnet pada isolasi XLPE kabel N2XSY dengan arus 300A.....	48
Gambar 40 Simulasi distribusi medan magnet pada tabir isolasi kabel N2XSY dengan arus 300A.....	49
Gambar 41 Simulasi distribusi medan magnet pada selubung PVC kabel N2XSY dengan arus 300A.....	49
42 Grafik medan magnet tiap lapisan kabel pada arus 300 A.....	50
43 Simulasi distribusi medan magnet kabel N2XSY dengan arus 300A (a) di dalam tanah pada kedalaman 1m (b) di udara pada jarak 3m....	51



Gambar 44 Simulasi distribusi medan magnet pada konduktor kabel N2XSY dengan arus 500 A.....	53
Gambar 45 Simulasi distribusi medan magnet pada tabir konduktor kabel N2XSY dengan arus 500 A.....	53
Gambar 46 Simulasi distribusi medan magnet pada isolasi XLPE kabel N2XSY dengan arus 500 A.....	53
Gambar 47 Simulasi distribusi medan magnet pada tabir isolasi kabel N2XSY dengan arus 500 A.....	54
Gambar 48 Simulasi distribusi medan magnet pada selubung PVC kabel N2XSY dengan arus 500 A.....	54
Gambar 49 Grafik medan magnet tiap lapisan kabel pada arus 500 A.....	55
Gambar 50 Simulasi distribusi medan magnet kabel N2XSY dengan arus 500A (a) di dalam tanah pada kedalaman 1m (b) di udara pada jarak 3m....	56
Gambar 51 Simulasi distribusi medan magnet pada konduktor kabel N2XSY dengan arus 700 A.....	58
Gambar 52 Simulasi distribusi medan magnet pada tabir konduktor kabel N2XSY dengan arus 700 A.....	58
Gambar 53 Simulasi distribusi medan magnet pada isolasi XLPE kabel N2XSY dengan arus 700 A.....	58
Gambar 54 Simulasi distribusi medan magnet pada tabir isolasi kabel N2XSY dengan arus 700 A.....	59
Gambar 55 Simulasi distribusi medan magnet pada selubung PVC kabel N2XSY dengan arus 700 A.....	59
Gambar 56 Grafik medan magnet tiap lapisan kabel pada arus 700 A.....	60
Gambar 57 Simulasi distribusi medan magnet kabel N2XSY dengan arus 700A (a) di dalam tanah pada kedalaman 1m (b) di udara pada jarak 3m....	61
Gambar 58 Simulasi distribusi medan magnet pada konduktor kabel N2XSY dengan arus 821 A.....	63
Gambar 59 Simulasi distribusi medan magnet pada tabir konduktor kabel N2XSY dengan arus 821 A.....	63
50 Simulasi distribusi medan magnet pada isolasi XLPE kabel N2XSY dengan arus 821 A.....	63



Gambar 61 Simulasi distribusi medan magnet pada tabir isolasi kabel N2XSY dengan arus 821 A.....	64
Gambar 62 Simulasi distribusi medan magnet pada selubung PVC kabel N2XSY dengan arus 821 A.....	64
Gambar 63 Grafik medan magnet tiap lapisan kabel pada arus 821 A.....	65
Gambar 64 Simulasi distribusi medan magnet kabel N2XSY dengan arus 821 A (a) di dalam tanah pada kedalaman 1m (b) di udara pada jarak 3m....	66
Gambar 65 Grafik perbandingan emisi medan magnet pada tiap lapisan kabel tanah	68
Gambar 66 Grafik magnet kabel N2XSY dalam lapisan tanah dan udara.....	70
Gambar 67 Grafik perbandingan hasil simulasi dan pengukuran medan magnet kabel tanah pada arus 100 A	71



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam suatu sistem tenaga listrik, upaya penyaluran energi listrik dari pusat-pusat pembangkit listrik hingga ke konsumen menggunakan suatu sistem saluran transmisi dan saluran distribusi. Saluran transmisi dan distribusi ini dapat berupa saluran udara (*overhead line*) maupun saluran bawah tanah (*underground cable*).

Saluran udara menggunakan kawat penghantar dengan menggunakan menara atau tiang listrik sebagai penopang. Sedangkan saluran bawah tanah menggunakan kabel daya bawah tanah. Saluran bawah tanah memiliki keuntungan tidak terpengaruh oleh gangguan manusia, pohon maupun kondisi cuaca alam seperti sambaran petir. Selain itu saluran bawah tanah juga tidak mengganggu pandangan. Dengan adanya keuntungan ini maka saluran transmisi dan distribusi bawah tanah banyak digunakan khususnya pada daerah perkotaan maupun perumahan.

Saluran transmisi maupun distribusi bawah tanah ini menggunakan kabel daya bawah tanah sebagai penghantar arus listrik. Dalam penyaluran energi listrik, arus yang mengalir pada kabel daya bawah tanah ini dapat menghasilkan medan elektromagnetik disekitar kawat penghantarnya. Di mana intensitas medan elektromagnetiknya bergantung pada berbagai faktor, seperti besarnya arus yang mengalir, kedalaman penanaman, kondisi tanah, susunan peletakan kabel, pelindung saluran, serta jarak antar kabel. Semakin dekat dengan kawat penghantar, maka semakin besar pula intensitas medan elektromagnetiknya.

Menurut rekomendasi *International Radiation Protection Association* (IRPA) dan WHO yang dirujuk sebagai Standar Nasional Indonesia (SNI) oleh Badan Standardisasi Nasional, batas paparan medan listrik dan medan magnet 50/60 Hz untuk masyarakat umum sampai 24 jam per hari yaitu, batas medan listrik 10 kV/m, batas medan magnet 0,1 mT. Sedangkan untuk beberapa jam per hari batas medan listrik 10 kV/m, dan batas medan magnet sebesar 1 mT.



Berdasarkan rekomendasi tersebut, perlu dilakukan pengukuran serta kuantisasi emisi medan magnet yang dihasilkan oleh kabel daya bawah tanah. Dengan adanya pengukuran dan kuantisasi emisi dari medan magnet ini, dapat diketahui bagaimana pola maupun proses persebaran medan magnet pada kabel daya bawah tanah.

Adapun proses kuantisasi emisi medan magnet yang dihasilkan oleh kabel daya bawah tanah ini dapat disimulasikan dengan menggunakan aplikasi MATLAB yang dapat mempermudah analisis besarnya nilai medan magnet pada kabel daya bawah tanah.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, maka dapat dirumuskan beberapa masalah dalam penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana mengetahui proses persebaran emisi medan magnet pada kabel daya bawah tanah?
2. Bagaimana cara mengetahui besarnya emisi medan magnet pada isolasi kabel daya bawah tanah?
3. Bagaimana menganalisis kuantisasi emisi medan magnet pada kabel daya bawah tanah dengan menggunakan MATLAB?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.3.1 Tujuan

Adapun maksud dan tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui proses persebaran emisi medan magnet pada kabel daya bawah tanah.
2. Untuk mengetahui besarnya emisi medan magnet pada isolasi kabel daya bawah tanah.
3. Menganalisis kuantisasi emisi medan magnet pada kabel daya bawah tanah dengan menggunakan MATLAB.



1.3.2 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini yaitu:

1. Dapat mengetahui proses persebaran emisi medan magnet pada kabel daya bawah tanah.
2. Dapat mengetahui besarnya emisi medan magnet pada isolasi kabel daya bawah tanah.
3. Mempermudah proses analisis kuantisasi emisi medan magnet pada isolasi kabel daya bawah tanah.

1.4 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dalam penelitian ini yaitu :

1. Penelitian ini membahas mengenai kuantisasi emisi medan magnet pada kabel daya bawah tanah dengan jenis isolasi XLPE.
2. Penelitian ini menggunakan kabel N2XSJ 12/20(24) kV berinti tunggal sebagai objek penelitian.
3. Penelitian dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB.
4. Pada penelitian ini hanya hanya berfokus pada satu kabel dan pengaruh medan magnet dari kabel lain diabaikan.
5. Tempat penelitian dilakukan pada Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan.



1.5 Sistematika Penulisan

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

Bab pertama Pendahuluan, merupakan pendahuluan yang meliputi pembahasan latar belakang, perumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, ruang lingkup, serta sistematika penulisan.

Bab kedua Tinjauan Pustaka, membahas tentang landasan teori yang digunakan dalam pengerjaan skripsi ini, serta penelitian terdahulu yang berkaitan dengan skripsi ini.

Bab ketiga Metodologi Penelitian, akan membahas mengenai metodologi yang digunakan dalam pengerjaan penelitian ini. Meliputi, rancangan penelitian, waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, parameter observasi, prosedur penelitian, serta diagram alir pelaksanaan.

Bab keempat Hasil dan Pembahasan, membahas analisis data yang telah diperoleh dari hasil penelitian serta pembahasan hasil dari penelitian.

Bab Kelima Kesimpulan dan Saran, membahas mengenai kesimpulan hasil penelitian serta saran yang berkorelasi dengan penelitian yang telah dilakukan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kabel Tanah

Kabel tanah merupakan saluran listrik dengan konduktor terisolasi yang ditanam langsung di dalam tanah, atau diletakkan di saluran kabel, pipa, atau palung kabel (BSN, 2011). Kabel tanah yang beroperasi dalam tanah termasuk komponennya harus memiliki persyaratan isolasi yang khusus agar dapat beroperasi secara terus menerus. Persyaratan tersebut berfungsi untuk melindungi kabel tanah dari kelembapan tanah serta pengaruh kondisi lainnya di dalam tanah. Kemampuan suatu kabel tanah untuk menghantarkan arus dipengaruhi oleh kondisi pemasangan kabelnya. Kondisi pemasangan kabel ini dapat berupa susunan peletakan kabel, jarak antar kabel, kedalaman penanaman kabel, pentanahan selubung logam (*sheath*) atau pelindung (*shield*), serta kondisi tanah tempat penanaman kabel tanah (Suswanto, 2009).

Penggunaan kabel daya bawah tanah ini memiliki keuntungan yaitu tidak terpengaruh oleh gangguan manusia, serta kondisi alam berupa sambaran petir, badai maupun tertimpa pohon. Selain itu, kabel daya bawah tanah dapat menciptakan keindahan dan kenyamanan lingkungan karena tertanam di dalam tanah. Penggunaan kabel tanah juga memiliki kelemahan yaitu, biaya yang diperlukan dalam investasi pemasangan kabel tanah yang relatif tinggi serta pemeliharaannya cukup rumit. Meskipun memiliki kelemahan, penggunaan kabel tanah tetap akan diperlukan terutama dari segi estetika dan pembebasan tanah.

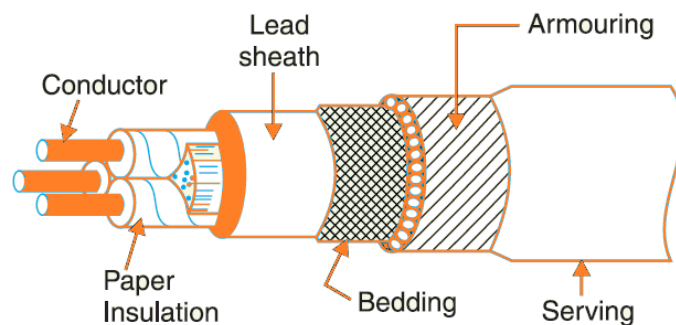
Kabel daya bawah tanah dapat berupa satu atau beberapa bagian dari konduktor listrik yang berisolasi, dan memiliki pelindung mekanis serta mempunyai selubung luar yang digunakan dengan cara dipasang atau ditanam di dalam tanah (PLN, 1995). Pemasangan atau instalasi kabel bawah tanah dapat dilakukan dengan dua cara yaitu, kabel tanah ditanam langsung dalam tanah tanpa saluran pelindung atau cara kedua yaitu, kabel tanah menggunakan saluran

Ɜ yang dapat berupa pipa kemudian ditanam di dalam tanah (Suswanto,



2.2. Konstruksi Kabel Bawah Tanah

Sebagai suatu penghantar daya listrik, kabel tanah terdiri dari beberapa bagian agar dapat menghantarkan daya listrik dengan baik. Konstruksi kabel tanah pada umumnya terdiri dari dua bagian yaitu, bagian utama yang terdiri dari penghantar (*conductor*), isolasi (*insulation*), tabir (*screen*), dan selubung (*sheath*). Serta bagian Pelengkap yang terdiri dari bantalan (*bedding*), perisai (*armour*), bahan pengisi (*filler*), dan sarung kabel (*serving*) (Suswanto, 2009).



Gambar 1 Konstruksi Kabel Bawah Tanah

2.2.1 Bagian Utama Kabel

Bagian utama kabel merupakan bagian yang harus ada pada setiap kabel. Bagian utama pada kebel tanah antara lain:

1) Penghantar (konduktor),

Penghantar merupakan bagian kabel yang menghantarkan arus listrik. Penghantar yang biasa digunakan adalah tembaga polos maupun tembaga berlapis timah dan aluminium (Suswanto, 2009). Penggunaan penghantar pada kabel daya harus memperhatikan transmisi arus (daya) secara ekonomis dan efisien. Pemilihan bahan konduktor, ukuran, dan desain harus mempertimbangkan hal-hal seperti kuat hantar arus, tegangan, rugi-rugi pada konduktor, fleksibilitas, material serta sifat mekanis konduktor. Ada beberapa jenis logam dengan resistivitas rendah dan memiliki konduktivitas tinggi yang dapat digunakan sebagai konduktor pada kabel listrik. Secara umum, Tembaga dan aluminium menjadi pilihan yang utama yang digunakan dalam industri kabel daya. masing-masing memiliki kelebihan yang mungkin lebih besar daripada yang lain dalam kondisi tertentu. Pemilihan antara konduktor tembaga atau aluminium harus dilakukan dalam membandingkan sifat-sifat kedua logam (Thue, 2005).



2) Isolasi (*Insulation*)

Isolasi ialah bahan yang digunakan untuk memisahkan penghantar yang berdekatan secara elektrik, sehingga kebocoran arus tidak terjadi. Beberapa jenis isolasi yang digunakan pada kabel, dapat digolongkan menjadi isolasi karet, thermoplastik, dan thermosetting (Suswanto, 2009). Bahan isolasi listrik digunakan untuk mengisolasi listrik pada konduktor kabel bawah tanah. Bahan isolasi melindungi konduktor secara fisik yang terdiri dari bahan polimer sintetik atau alami. Jenis isolasi yang dipilih untuk digunakan dapat bervariasi dengan besar tegangan kabel konduktor (Thue, 2005).

3) Tabir (*screen*)

Tabir atau *screen* biasanya digunakan pada kabel tegangan tinggi. Tabir berupa suatu lapisan pada kabel yang dipasang setelah bahan isolasi (Suswanto, 2009). Tujuan dari penggunaan tabir pada konduktor adalah memperhalus permukaan lapisan kabel untuk mengurangi konsentrasi tegangan pada permukaan konduktor (Thue, 2005).

4) Selubung (*sheath*)

Selubung berfungsi untuk melindungi inti kabel dari gangguan luar, melindungi kabel dari korosi, menahan gaya mekanis, serta mencegah air atau cairan masuk ke dalam bagian kabel.

2.2.2 Bagian Pelengkap

Bagian pelengkap digunakan untuk memperkuat serta melindungi kabel tanah. Pada umumnya bagian pelengkap terdiri dari:

1) Bantalan (*Bedding*)

Bantalan (*bedding*) berupa lapisan serat-serat digunakan sebagai tempat bagian perisai (*armour*) dan melindungi bagian dalam dengan mencegah proses elektrolis. Pita kapas (*cotton tape*), goni (*jute*) dan pita kertas (*paper tape*) merupakan bahan bantalan yang sering digunakan.

2) Perisai (*Armour*)

Perisai (*armour*) adalah bagian yang digunakan untuk melindungi usakan mekanis pada bahan isolasi. Pada umumnya perisai perisai yang



digunakan dapat berupa perisai kawat baja (*steel wire armour*) dan perisai pita baja (*steel tape armour*).

3) Bahan Pengisi (*Filler*)

Bahan pengisi adalah bahan yang berfungsi untuk mengisi celah kosong pada pemasangan inti agar inti dapat berbentuk bulat khususnya pada kabel berinti tiga. Bahan pengisi disesuaikan dengan isolasi yang digunakan, pada isolasi kertas digunakan goni (*jute*) sedangkan pada isolasi sintetis digunakan goni (*jute*) dan karet *buttle*.

4) Sarung kabel (*serving*)

Sarung kabel merupakan bagian terluar yang bersentuhan langsung dengan tanah sehingga mudah terkena pengaruh luar. Sarung kabel dipasang pada bagian luar perisai kabel. Sarung kabel terbuat dari bahan serat yang memiliki campuran yang kedap air. Goni adalah bahan yang umumnya digunakan sebagai sarung kabel.

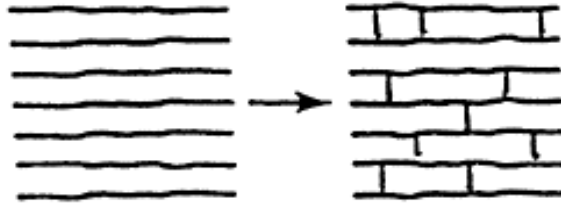
2.3. Jenis-jenis Kabel Daya Bawah Tanah

Bahan isolasi *cross-linked polyethylene* atau yang biasa disebut XLPE merupakan bahan isolasi yang pada umumnya digunakan pada kabel daya tegangan menengah. XLPE sendiri merupakan penggabungan rantai polyethylene yang berbeda-beda melalui suatu proses reaksi kimia. Proses ini menghasilkan bahan yang lebih kuat dan lebih tahan terhadap perubahan temperatur (Thue, 2005).

Penggabungan rantai *polyethylene* yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah. XLPE dapat dianggap sebagai *polyethylene* yang bercabang di mana ujung cabang terhubung ke rantai PE yang berbeda. *Crosslinking* memberikan sifat tertentu yang diinginkan pada *polyethylene* yang memungkinkan polimer mempertahankan stabilitas bentuknya pada kenaikan temperatur. Keuntungan lain dari XLPE ini adalah adanya peningkatan nilai kekuatan tarikan, dan Modulus

la dibandingkan dengan PE atau *polyethylene* (Thue, 2005).



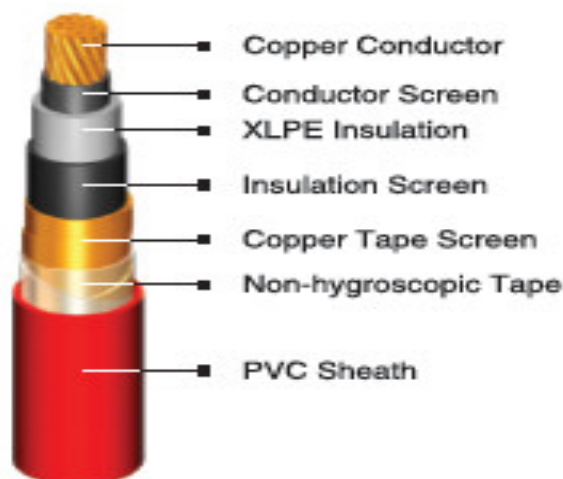


Gambar 2 Ilustrasi pembentukan XLPE

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI), bahan konduktor kabel tegangan menengah secara umum dibagi menjadi dua, yaitu kabel dengan konduktor aluminium dan tembaga. Pada dasarnya lapisan perlindungan dan isolasinya sama pada kedua jenis konduktor tersebut. Adapun jenis kabel yang biasa digunakan khususnya pada tegangan menengah adalah (Sijabat,2017):

2.3.1. N2XSY/NA2XSY

Kabel N2XSY/ NA2XSY merupakan kabel tegangan menengah yang memiliki satu inti kabel. Dari kode nama kabel ini kita bisa mengetahui bagian-bagian yang terdapat pada kabel ini. Kode nama menunjukkan bahan yang digunakan pada konduktor N atau NA. N untuk tembaga, dan NA untuk aluminium. 2X adalah kode untuk bahan isolasi yang berupa XLPE pada konduktor. S adalah kode untuk bahan lapisan metalik yang melindungi bahan isolasi, sedangkan Y merupakan kode untuk bahan PVC sebagai lapisan terluar dari kabel.



Gambar 3 Bagian-bagian Kabel N2XSY



ada Gambar 3 menunjukkan tujuh bagian lapisan pada kabel ini. Bagian merupakan konduktor yang dibungkus dengan bahan karet yang spesifik 'R' atau *Ethyl-propylene rubber* sebagai *conductor screen*. Lapisan

selanjutnya adalah bahan isolasi utama yaitu XLPE yang kemudian dilapisi dengan *insulation screen* yang juga berbahan karet yang sama dengan *conductor screen* yaitu EPR. Lapisan selanjutnya adalah lapisan metalik yang berbahan tembaga yang dilapisi oleh sebuah pita yang berfungsi sebagai penghalang agar tidak ada cairan yang dapat masuk kedalam kabel. Sementara pada lapisan terluar adalah bagian pelindung kabel yang terbuat dari bahan PVC.

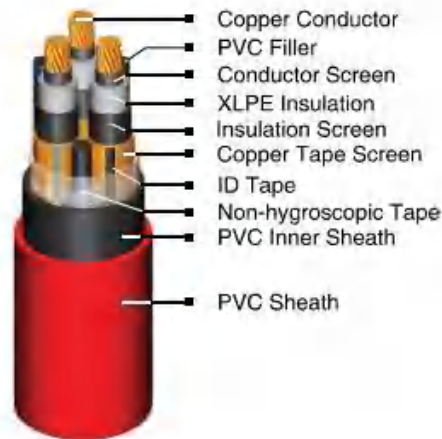
Kabel jenis ini biasa digunakan untuk keperluan seperti distribusi bawah tanah, pembangkit dan *switchgear*. Kabel ini digunakan pada rentang tegangan 6 kV sampai dengan 30 kV. Ukuran konduktor dari kabel ini juga memiliki beberapa pilihan, dari 25 mm² sampai 630 mm².

2.3.2. N2XSEY/ NA2XSEY

Kabel ini merupakan kabel tegangan menengah yang terdiri dari tiga inti kabel. Dari kode nama kabel ini kita bisa mengetahui bagian-bagian yang terdapat pada kabel ini. Kode N atau NA menunjukkan bahan dari konduktor yang digunakan. N untuk tembaga, dan NA untuk aluminium. 2X adalah kode untuk bahan isolasi dari konduktor yang berupa XLPE. SE merupakan kode untuk bahan lapisan metalik yang melindungi bahan isolasi, perbedaannya dengan kode S adalah SE artinya lapisan metalik ini melapisi masing-masing bahan isolasi pada ketiga inti kabel. Sedangkan Y adalah kode untuk lapisan terluar dari kabel yang berbahan PVC.

Pada Gambar 4 dapat kita lihat lapisan sepuluh bagian dari kabel ini. Bagian pertama adalah tiga buah konduktor yang masing-masing kemudian dibungkus dengan *conductor screen* yang berbahan karet yang spesifik yaitu EPR atau *Ethylpropylene rubber*. Lapisan selanjutnya adalah bahan isolasi utama yaitu XLPE yang kemudian dilapisi dengan *insulation screen* yang juga berbahan karet yang sama dengan *conductor screen* yaitu EPR. Lapisan selanjutnya adalah lapisan metalik yang berbahan tembaga yang kemudian diberi *ID tape* yang berfungsi untuk pemberian kode kabel. Seluruh lapisan di atas melapisi masing-masing konduktor yang berjumlah tiga buah.





Gambar 4 Bagian-bagian Kabel N2XSEY

Ketiga konduktor yang sudah dilapisi dengan lapisan pelindung kemudian ditambahkan dengan PVC *filler* untuk menjaga bentuk kabel lalu disatukan dengan *non-hygroscopic tape* yaitu pita pelindung yang berfungsi untuk mencegah air atau minyak masuk ke dalam kabel. Setelah itu kabel dilapisi dengan dua buah lapisan PVC, satu di bagian dalam dan satu di bagian luar. Lapisan PVC yang di bagian dalam berfungsi untuk mengikat ketiga inti kabel sedangkan lapisan PVC ini bertujuan untuk memberikan kekuatan fisik pada kabel tersebut.

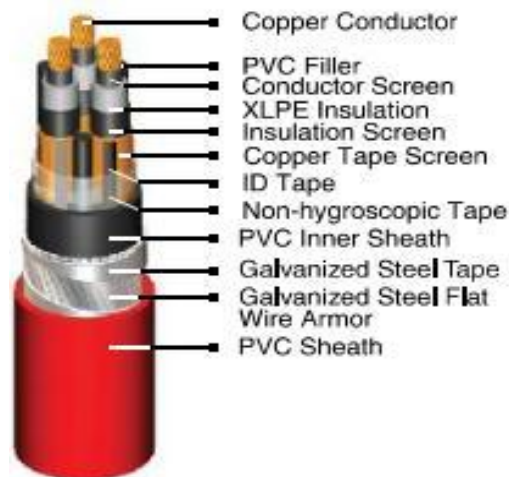
Kabel ini biasa digunakan untuk keperluan seperti distribusi bawah tanah, pembangkit dan *switchgear*. Kabel ini digunakan pada rentang tegangan 6 kV sampai dengan 30 kV. Ukuran konduktor dari kabel ini juga memiliki beberapa pilihan, dari 25 mm² sampai 300 mm².

2.3.3. N2XSEFGbY/ NA2XSEFGbY

Kabel jenis ini merupakan kabel tegangan menengah yang memiliki tiga inti kabel. Dari kode nama kabel ini kita bisa mengetahui bagian-bagian yang terdapat pada kabel ini. Kode N atau NA menunjukkan bahan dari konduktor yang digunakan. N untuk tembaga, dan NA untuk aluminium. 2X adalah kode untuk bahan isolasi dari konduktor yang berupa XLPE. SE merupakan kode untuk bahan netalik yang melindungi bahan isolasi, perbedaannya dengan kode S E artinya lapisan metalik ini melapisi masing-masing bahan isolasi pada i kabel. Pada kabel ini dilengkapi dengan *armour* yang ditandai dengan kode F dan Gb. Kode F adalah simbol untuk *armour* yang berbentuk *flat*



wire, sedangkan kode Gb adalah untuk *steel tape* yaitu pita metalik yang berfungsi untuk mengikat lapisan *flat wire*. Baik *flat wire* dan *steel tape* keduanya terbuat dari bahan baja yang sudah melalui proses galvanisasi. Kode Y adalah untuk lapisan terluar dari kabel yang berbahan PVC



Gambar 5 Bagian-bagian Kabel N2XSEFGbY

Pada Gambar 5 dapat kita lihat dua belas bagian lapisan dari kabel ini. Bagian pertama adalah tiga buah konduktor yang masing-masing kemudian dibungkus dengan *conductor screen* yang berbahan karet yang spesifik yaitu EPR atau *Ethyl-propylene rubber*. Lapisan selanjutnya adalah bahan isolasi utama yaitu XLPE yang kemudian dilapisi dengan *insulation screen* yang juga berbahan karet yang sama dengan *conductor screen* yaitu EPR. Lapisan selanjutnya adalah lapisan metalik yang berbahan tembaga yang kemudian diberi *ID tape* yang berfungsi untuk pemberian kode kabel. Seluruh lapisan di atas melapisi masing-masing konduktor yang berjumlah tiga buah.

Ketiga konduktor yang sudah dilapisi dengan lapisan pelindung kemudian ditambahkan dengan PVC *filler* untuk menjaga bentuk kabel lalu disatukan dengan *non-hygroscopic tape* yaitu pita pelindung yang berfungsi untuk mencegah air atau minyak masuk ke dalam kabel. Setelah itu kabel dilapisi dengan lapisan PVC yang berfungsi untuk mengikat ketiga inti kabel. Kemudian kabel dilapisi lagi dengan *armour* yang berfungsi untuk memberikan perlindungan

uatan fisik pada kabel. *Armour* ini terbuat dari lapisan baja galvanis yang < kabel pipih yang kemudian diikat dengan pita yang juga terbuat dari anis untuk memastikan kabel pipih pada armour terikat rapat dan tidak

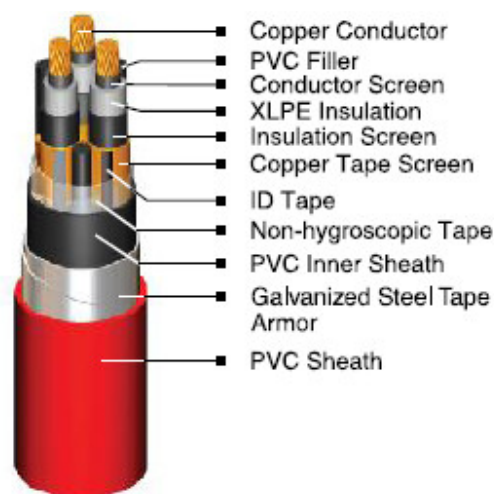


bergerak. Kemudian di lapisan terluar dilapisi dengan lapisan PVC yang bertujuan untuk memberikan kekuatan fisik pada kabel tersebut.

Kabel ini biasa digunakan untuk keperluan seperti distribusi bawah tanah, pembangkit dan *switchgear*. Adanya *armour* pada kabel membuat kabel ini bisa digunakan untuk pemasangan pada kondisi medan yang cukup rawan seperti pada pemasangan kabel bawah tanah di bawah jalan raya. Kabel ini digunakan pada rentang tegangan 6 kV sampai dengan 30 kV. Ukuran konduktor dari kabel ini juga memiliki beberapa pilihan, dari 25 mm² sampai 300 mm².

2.3.4. N2XSEBY / NA2XSEBY

Kabel jenis ini merupakan kabel tegangan menengah yang memiliki tiga inti kabel. Dari kode kabel ini kita bisa mendapatkan penjelasan mengenai bentuk kabel ini. Kode N atau NA menunjukkan bahan dari konduktor yang digunakan. N untuk tembaga, dan NA untuk aluminium. 2X adalah kode untuk bahan isolasi dari konduktor yang berupa XLPE. SE merupakan kode untuk bahan lapisan metalik yang melindungi bahan isolasi, perbedaannya dengan kode S adalah SE artinya lapisan metalik ini melapisi masing-masing bahan isolasi pada ketiga inti kabel. Pada kabel ini dilengkapi dengan *armour* yang ditandai dengan adanya kode B. Kode B adalah simbol untuk *armour* yang berupa *steel tape* atau pita metalik yang membungkus kabel dan berfungsi untuk memberikan kekuatan fisik pada kabel. *Steel tape* tersebut terbuat dari bahan baja yang sudah melalui proses galvanisasi. Kode Y adalah untuk lapisan terluar dari kabel yang berbahan PVC.



Gambar 6 Bagian-bagian Kabel N2XSEBY



Pada Gambar 6 dapat kita lihat sebelas bagian lapisan dari kabel ini. Bagian pertama adalah tiga buah konduktor yang masing-masing kemudian dibungkus dengan *conductor screen* yang berbahan karet yang spesifik yaitu EPR atau *Ethyl-propylene rubber*. Lapisan selanjutnya adalah bahan isolasi utama yaitu XLPE yang kemudian dilapisi dengan *insulation screen* yang juga berbahan karet yang sama dengan *conductor screen* yaitu EPR. Lapisan selanjutnya adalah lapisan metalik yang berbahan tembaga yang kemudian diberi *ID tape* yang berfungsi untuk pemberian kode kabel. Seluruh lapisan di atas melapisi masing-masing konduktor yang berjumlah tiga buah.

Ketiga konduktor yang sudah dilapisi dengan lapisan pelindung kemudian ditambahkan dengan PVC filler untuk menjaga bentuk kabel lalu disatukan dengan *non-hygroscopic tape* yaitu pita pelindung yang berfungsi untuk mencegah air atau minyak masuk ke dalam kabel. Setelah itu kabel dilapisi dengan lapisan PVC yang berfungsi untuk mengikat ketiga inti kabel. Kemudian kabel dilapisi lagi dengan *armour* yang berfungsi untuk memberikan perlindungan serta kekuatan fisik pada kabel. *Armour* ini terbuat dari lapisan baja galvanis berbentuk pita yang menyelembungi seluruh kabel. Kemudian di lapisan terluar dilapisi dengan lapisan PVC yang bertujuan untuk memberikan kekuatan fisik pada kabel tersebut.

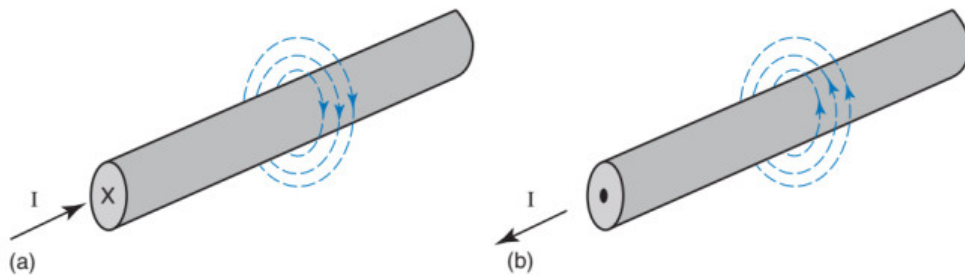
Kabel ini biasa digunakan untuk keperluan seperti distribusi bawah tanah dengan pemasangan langsung, pembangkit dan *switchgear*. Adanya *armour* pada kabel membuat kabel ini bisa digunakan untuk pemasangan pada kondisi medan yang cukup rawan seperti pada pemasangan kabel bawah tanah di bawah jalan raya. Kabel ini digunakan pada rentang tegangan 6 kV sampai dengan 30 kV. Ukuran konduktor dari kabel ini juga memiliki beberapa pilihan, dari 25 mm² sampai 300 mm².



2.4. Medan Magnet

Medan magnet merupakan bagian pokok dari medan elektromagnetik yang dicirikan oleh kuat medan magnet (H) dengan satuan A/m (amper per meter) dan rapat fluks magnet (B) dengan satuan Tesla (T) (BSN, 2003). Suatu medan yang terbentuk karena adanya gerakan muatan listrik (arus listrik) yang mengakibatkan timbulnya gaya pada muatan listrik yang bergerak merupakan medan magnet. Oersted menyatakan arus listrik (muatan listrik) pada suatu penghantar akan menimbulkan medan magnet di sekitarnya (Gornick, 2001). Medan magnet dapat dihasilkan oleh arus listrik yang mengalir melalui konduktor serta suatu magnet permanen (Robertson, 2008).

Arus listrik dapat menghasilkan medan magnet di mana kekuatan medan ini berbanding lurus dengan besarnya nilai arus. Medan magnet merupakan sebuah besaran vektor. Pola medan magnet yang dihasilkan oleh arus yang mengalir melalui konduktor lurus diilustrasikan pada Gambar 7.



Gambar 7 Medan magnet pada konduktor berarus

Pada gambar ilustrasi, arus mengalir menjauhi pengamat ditandai dengan tanda silang (X) dan arus yang mengalir menuju pengamat ditandai dengan tanda titik (\bullet). Arah fluks magnet yang dihasilkan oleh arus yang menjauhi pengamat (X) adalah searah putaran jarum jam. Sebaliknya, arah fluks magnet yang dihasilkan oleh arus yang mendekati pengamat (\bullet) adalah berlawanan arah putaran jarum jam. Fluks medan magnet akan dihasilkan di sepanjang konduktor selama konduktor dialiri oleh arus. Selain itu, pola fluks magnet meluas dari pusat hingga ke luar dalam sebuah lingkaran konsentris. Namun besarnya medan akan berkurang sebanding dengan jarak dari titik pusatnya (Robertson,



2.5. Perhitungan Besar Medan Magnet di Sekitar Konduktor Berarus

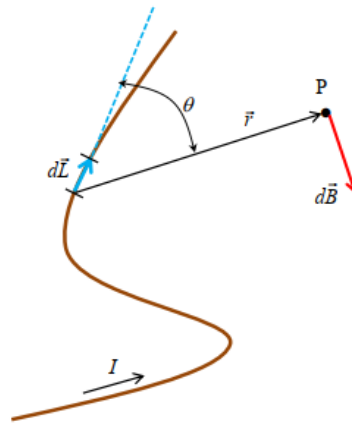
2.5.1. Besar medan magnet

Pada ruang bebas, kerapatan flux magnetik B definisikan sebagai :

$$B = \mu_0 H \dots\dots\dots (1)$$

di mana B diukur dalam Weber per meter persegi (Wb/m^2) atau dalam satuan baru yang diadopsi dalam Sistem Satuan Internasional, Tesla (T).. Sedangkan besar μ_0 dalam satuan Henry per meter (H/m) di mana μ_0 merupakan permeabilitas ruang bebas sebesar $4\pi \times 10^{-7}$ H/m (Hayt, 2012).

Hukum Biot-Savart dapat digunakan untuk menentukan besarnya medan magnet pada sekitar arus listrik (Ghani et al, 2014). Pada Gambar 8 dapat dilihat sebuah elemen kawat konduktor yang dialiri arus dengan besar I dan konduktor tersebut memiliki panjang L .



Gambar 8 Kawat konduktor berarus yang menghasilkan medan magnet di sekitarnya.

Pada titik P yang memiliki jarak r dari elemen kawat konduktor berarus dapat ditentukan besar medan magnetnya oleh hukum Biot-Savart yakni: (Abdullah, 2017).

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\vec{L} \times \vec{r}}{r^2} \dots\dots\dots (2)$$

di mana:

- B = medan magnetik (T)
- μ_0 = permeabilitas udara/vakum ($4\pi \times 10^{-7}$ T m/A)
- I = kuat arus yang melalui penghantar (A)
- r = jarak titik ke penghantar (m)



Semua elemen sepanjang kawat menghasilkan medan magnet total yang dapat diperoleh dengan mengintegalkan persamaan (1) menjadi:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{d\vec{L} \times \vec{r}}{r^2} \dots\dots\dots (3)$$

Hukum Biot-Savart juga dapat dinyatakan dalam bentuk sumber terdistribusi, seperti kerapatan arus J dan kerapatan arus permukaan K . Dengan demikian elemen arus diferensial IdL , di mana dL searah dengan arus, dapat dinyatakan dalam kerapatan arus permukaan K (A/m) atau kerapatan arus J (A/m^2) (Effendi dkk, 2007).

$$IdL = KdS = Jdv \dots\dots\dots (4)$$

di mana:

dS = elemen luas permukaan (m^2) bidang yang dilalui arus permukaan K .

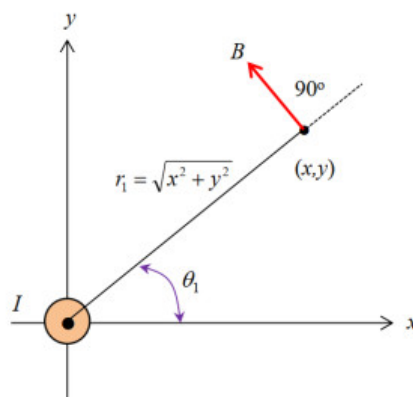
dv = elemen penambahan volume (m^3),

maka hukum Biot Savart dapat ditulis:

$$B = \int \frac{\mu \times KdS \times \vec{r}}{4\pi r^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$B = \int \frac{\mu \times Jdv \times \vec{r}}{4\pi r^2} \dots\dots\dots (6)$$

Gambar 9 di bawah menunjukkan profil komponen medan magnet yang dihasilkan oleh kawat lurus panjang pada berbagai posisi di sekitar kawat. Perhatikan Gambar, sebuah kawat lurus panjang dialiri arus I . Kita tempatkan kawat pada pusat koordinat. Perhatikan titik dengan koordinat (x,y) . Jarak titik tersebut ke kawat adalah $r = \sqrt{x^2 + y^2}$



Gambar 9 Gambar Kawat lurus panjang dipandang dari arah datangnya arus arus mengalir dari belakang kertas kearah depan). Juga digambarkan arah medan magnet pada koordinat (x,y)



Dengan demikian, besar medan magnet di titik (x,y) adalah

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \dots\dots\dots (7)$$

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{\sqrt{x^2+y^2}} \dots\dots\dots (8)$$

Dengan memperhatikan gambar maka medan tersebut membentuk sudut $\theta_1 + 90^\circ$ terhadap arah horizontal. Maka komponen medan dalam arah x dan y adalah

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y}{(x^2+y^2)} \dots\dots\dots (9)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{x}{(x^2+y^2)} \dots\dots\dots (10)$$

Besar medan magnet yang dihasilkan kawat konduktor pada suatu titik dapat dilihat bahwa berbanding lurus dengan kuat arus dan berbanding terbalik dengan jarak terdekat titik tersebut ke kawat konduktor (Abdullah, 2017).

2.5.2. Permeabilitas Magnetik

1) Permeabilitas Ruang Bebas (μ_0)

Dalam elektrostatika, permitivitas dielektrik adalah ukuran 'kemampuan' dielektrik untuk memungkinkan adanya medan listrik di dalamnya. Dalam sirkuit magnetik, besaran yang sesuai adalah permeabilitas material. Jika medan magnet berada dalam ruang hampa, maka perbandingan kerapatan fluks terhadap kuat medan magnet adalah suatu konstanta yang disebut permeabilitas ruang bebas.

$$\mu_0 = \frac{B}{H} \text{ henry/meter} \dots\dots\dots (11)$$

Nilai dari $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. μ_0 dijadikan sebagai titik acuan atau tingkat referensi untuk mengukur permeabilitas dari semua bahan lainnya.

(Robertson, 2008).



2) Permeabilitas Relatif (μ_r)

Ambil contoh sebuah solenoid yang berisi udara dan dialiri arus tetap. MMF (Magneto-Motive Force) akan menghasilkan kerapatan fluks tertentu pada inti udara ini. Namun, jika inti tersebut diganti dengan besi, teramatilah bahwa kerapatan fluks mengalami peningkatan yang signifikan. Untuk memperhitungkan perbedaan hasil ini untuk berbagai bahan inti, digunakan suatu parameter yang disebut permeabilitas relatif. Permeabilitas relatif didefinisikan sebagai rasio antara kerapatan fluks yang dihasilkan dalam besi dengan kerapatan fluks yang dihasilkan dalam udara, dengan nilai MMF yang diterapkan tetap.

$$\mu_r = \frac{B_2}{B_1} \dots\dots\dots (12)$$

dimana B_2 adalah kerapatan fluks yang dihasilkan pada besi dan B_1 adalah kerapatan fluks yang dihasilkan di udara. Sedangkan μ_r tidak memiliki satuan karena hanya berupa rasio. Untuk udara atau bahan non-magnetik lainnya, $\mu_r = 1$. Dengan kata lain, semua bahan non-magnetik mempunyai sifat kemagnetan yang sama dengan ruang hampa. (Robertson, 2008).

3) Permeabilitas Absolut (μ)

Permeabilitas absolut suatu material adalah rasio kerapatan fluks terhadap kekuatan medan magnet (Robertson, 2008). sehingga,

$$\mu_0 = \frac{B}{H} \text{ henry/meter}$$

karena μ_0 merupakan nilai referensi, maka dapat dituliskan

$$\mu = \mu_0 \mu_r \dots\dots\dots (13)$$



2.6. Ambang Batas Medan Listrik dan Medan Magnet

Berdasarkan hasil penelitian medan magnet dan medan listrik pada saluran udara tegangan tinggi (SUTT) dan saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) dengan frekuensi 50/60 Hz, ditetapkan nilai ambang batas medan magnet dan medan listrik didasarkan pada orientasi kepada kesehatan manusia serta makhluk hidup di sekitarnya. Nilai ambang batas medan listrik dinyatakan dalam kuat medan listrik (E) dan nilai ambang batas medan magnet dinyatakan oleh rapat fluks magnet (B). Nilai ambang batas medan listrik dan medan magnet berturut-turut dapat dilihat pada Tabel 1 (BSN, 2003).

Tabel 1 Nilai ambang batas medan listrik dan medan magnet

Karakteristik Pemaparan	Kuat medan listrik (kV/m) efektif	Medan magnet /Rapat fluks magnet (mT) efektif
Masyarakat pekerja - sepanjang hari kerja - jangka pendek	10 30 ^a	0,5 5 ^b
Masyarakat umum - sampai dengan 24 jam/hari ^c - beberapa jam/hari ^d	5 10	0.1 1

Sumber: BSN (2003); IRPA (1990)

Keterangan:

- Durasi paparan medan antara 10 kV/m dan 30 kV/m dapat dihitung dari rumus $t \leq 80/E$, dengan t adalah durasi dalam jam/hari kerja dan E adalah kuat medan listrik dalam kV/m.
- Durasi paparan maksimum adalah 2 jam per hari kerja.
- Pembatasan ini berlaku untuk ruang terbuka di mana anggota masyarakat umum dapat secara wajar diperkirakan menghabiskan sebagian besar waktu selama satu hari, seperti kawasan rekreasi, lapangan untuk bertemu dan lain-lain yang semacam itu.
- Nilai kuat medan listrik dan medan magnet dapat dilampaui untuk durasi beberapa menit/hari, asalkan diambil tindakan pencegahan untuk nencegah efek kopling tak langsung.



2.7. Simulasi Dengan Program MATLAB

2.7.1. Program MATLAB

MATLAB merupakan salah satu bahasa pemrograman berkinerja tinggi untuk melakukan komputasi teknis. Nama MATLAB adalah sigkatan dari *Matrix Laboratory* (Houcque, 2005). MATLAB memiliki lingkungan kerja yang merupakan integrasi dari komputasi, visualisasi, dan pemrograman yang mudah digunakan di mana masalah dan solusinya diekspresikan dalam notasi matematika yang sudah dikenal (The MathWorks Inc, 2005).

Pada umumnya, MATLAB dapat digunakan dalam berbagai kebutuhan seperti menyelesaikan masalah matematika dan komputasi, pengembangan algoritma, dan akuisisi data. Selain itu, MATLAB juga dapat digunakan dalam pemodelan, simulasi, dan pembuatan prototipe analisis, eksplorasi, dan visualisasi data maupun pembuatan grafik ilmiah dan rekayasa. (The MathWorks Inc, 2005).

2.7.2. MATLAB Partial Differential Equation (PDE) Toolbox

MATLAB PDE Toolbox merupakan salah satu toolbox pada MATLAB menyediakan fungsi untuk menyelesaikan masalah geometri 2D dan 3D seperti difusi, elektrostatik, dan magnetostatik, mekanika struktural, perpindahan panas, serta masalah persamaan diferensial parsial umum (PDE) dengan menggunakan analisis elemen hingga (Abibintar, 2019).

Berikut fungsi-fungsi tools terkait pada PDEtoolbox:

1. Mode Draw

Tools draw dapat digunakan untuk menggambarkan bentuk-bentuk geometri berupa blok bangunan padat (persegi, persegi panjang, lingkaran, elips, dan poligon) yang dapat digabungkan untuk membuat bentuk gambar yang diinginkan.

2. Mode Boundary

Boundary digunakan untuk menentukan jenis kondisi batas PDE pada objek geometri. Kondisi batas pada PDEToolbox, yaitu Dirichlet dan

mann



3. Mode PDE (*Partial Differential Equation*)

PDE (*Partial Differential Equation*) digunakan untuk menentukan berbagai jenis skalar termasuk masalah *elliptic, parabolic, hyperbolic, dan eigenvalue*.

4. Mode Mesh

Mesh berfungsi untuk menampilkan data dalam bentuk permukaan 2D. Mesh memiliki ciri berupa grid yang menghubungkan dua titik terdekat dalam ruang 2D.

5. Mode Solve

Solve digunakan untuk menentukan parameter yang dibutuhkan dalam memecahkan masalah PDE. Parameter pada fungsi ini, yaitu *Elliptic Equations, Parabolic Equations, Hyperbolic Equations, dan Eigenvalue Equations*.

6. Mode Plot

Plot berisi beberapa parameter pelengkap yang dibutuhkan dan dapat ditampilkan saat proses solving selesai. Mode plot dapat memberikan tiga solusi plot yang berbeda pada waktu yang bersamaan, yaitu : warna, tinggi, dan plot bidang vektor. Bentuk permukaan, mesh, kontur, dan arah panah plot juga tersedia untuk memberikan hasil simulasi yang lebih baik.

2.8. Penelitian Terdahulu

Pertama, penelitian yang dilakukan oleh Sudharma (2016) dengan judul “Distribusi Medan Magnet Pada Solenoid”. Penelitian ini merupakan penelitian analitik yang menganalisis distribusi medan magnet pada suatu solenoida dengan menggunakan MATLAB untuk menghasilkan gambar distribusi medan magnet solenoid. Hasil penelitian dengan menggunakan MATLAB menunjukkan distribusi medan magnet pada solenoid. Medan magnet pada setiap lilitan menghasilkan resultan fluks pada sisi dalam solenoid yang saling berdekatan dan lurus. Sedangkan pada sisi luar solenoid fluks magnet membentuk suatu lingkaran tertutup yang memanjang. Sisi dalam solenoid memiliki kerapatan fluks magnet yang lebih besar dibandingkan pada sisi luar solenoid. Sehingga pada bagian solenoid dapat diberikan inti untuk meningkatkan medan magnetnya.



Penelitian yang dilakukan oleh Abibintar (2019) dengan judul “Simulasi Medan Magnet Pada Generator Magnet Permanen Menggunakan Metode Elemen Hingga”. Penelitian ini melakukan analisis pada generator melalui simulasi medan magnet dalam MATLAB PDEtool dengan menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method). Hasil dari simulasi yang telah dilakukan berupa visualisasi gambar topologi generator yang dilengkapi dengan arah aliran medan magnet dan analisis hasil simulasi dengan menggunakan metode elemen hingga.

Kemudian penelitian yang dilakukan Ruswir (2020) dengan judul “Distribusi Medan Magnet pada Multikoil Rektangular Secara Simultan Dengan Simulasi MATLAB”. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *Non Destructive Testing* untuk mengevaluasi tanpa merusak bahan objek penelitian. Simulasi pada MATLAB serta pengukuran langsung pada alat percobaan dilakukan untuk melihat distribusi medan magnet dengan input arus bervariasi mulai dari 0,2A, 0,26A, dan 0,33A. Serta jarak pengukuran 0,3 cm, 0,6cm, dan 1cm. Jumlah lilitan yang digunakan sebanyak 120 lilitan kawat berdiameter 0,5 mm. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah pada variasi 0,33 A dan jarak pengamatan 0,3 cm terlihat homogenitas tertinggi yaitu 0,954 pada simulasi dengan MATLAB dan 0,944 pada pengukuran eksperimen secara langsung. Kondisi ideal homogenitas berpengaruh pada simulasi MATLAB sehingga memiliki nilai medan magnet yang lebih besar dan distribusi yang lebih merata, jika dibandingkan pengukuran alat eksperimen secara langsung.

Beberapa hasil penelitian sebelumnya memperlihatkan hasil simulasi maupun pengukuran medan magnet pada berbagai objek penelitian seperti solenoida dan generator. Penelitian-penelitian terdahulu juga menggunakan aplikasi perangkat lunak dalam membantu peneliti melakukan simulasi objek penelitian.

