

SKRIPSI
ANALISIS DISTRIBUSI TEMPERATUR RADIAL KABEL
DALAM KONDISI TRANSIEN DENGAN METODE ELEMEN
HINGGA MENGGUNAKAN MATLAB

Disusun dan Diajukan Oleh:

ONGKI TANGYONG

D041181353



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS DISTRIBUSI TEMPERATUR RADIAL KABEL DALAM KONDISI TRANSIEN DENGAN METODE ELEMEN HINGGA MENGGUNAKAN MATLAB

Disusun dan diajukan oleh

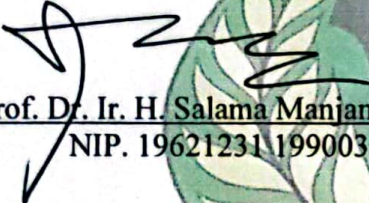
Ongki Tangyong
D041 18 1353

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 12 Agustus 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

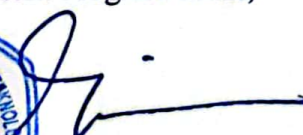
Pembimbing Pendamping,


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


Ir. Tajuddin Waris M.T.
NIP. 19650424 199203 1 003

Ketua Program Studi,




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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Ongki Tangyong
NIM : D041181353
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

ANALISIS DISTRIBUSI TEMPERATUR RADIAL KABEL DALAM KONDISI TRANSIEN DENGAN METODE ELEMEN HINGGA MENGUNAKAN 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, 12 Agustus 2024

Yang Menyatakan



Ongki Tangyong

KATA PENGANTAR

Puji Syukur Kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan bimbingannya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Distribusi Temperatur Radial Kabel Dalam Kondisi Transien Dengan Metode Elemen Hingga Menggunakan Matlab” dapat terselesaikan. Penulis menyadari tanpa adanya kemauan dan usaha serta bantuan dari berbagai pihak, maka skripsi ini tidak dapat diselesaikan dengan baik. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Bapak Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, M.T.,IPM selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Ir.Tajuddin Waris, MT. selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan dalam pengerjaan skripsi ini.
- 2) Ibu Dr. Ir. Sri Mawar Said, MT. selaku Dosen Penguji I dan Bapak Dr. Ir. Ikhlas Kitta, ST, MT. selaku Dosen Penguji II.
- 3) Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., selaku Kepala Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- 4) Bapak/Ibu dosen serta staff/pegawai Departemen Teknik Elektro atas segala ilmu, bantuan, dan kemudahan yang diberikan selama saya menempuh proses perkuliahan.
- 5) Kedua Orang Tua beserta saudara penulis yang selalu mendoakan, memotivasi dan memberikan dukungan dalam menyelesaikan skripsi ini.
- 6) Semua teman-teman seperjuangan CAL18RATOR serta teman-teman Lab Riset Grup Infrastruktur Ketenagalistrikan dan T3 yang telah banyak memberikan bantuan dan masukan kepada penulis.
- 7) Keluarga besar penulis yang selalu memberikan doa, dukungan, dan bantuan selama penulis menjalani proses perkuliahan hingga dapat menyelesaikan skripsi ini
- 8) Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan pada skripsi ini, oleh karena itu penulis mengharapkan para pembaca dapat memberikan kritik dan saran yang membangun agar skripsi ini menjadi lebih baik.

Gowa, 12 Agustus 2024

Ongki Tangyong

ABSTRAK

ONGKI TANGYONG. *Analisis Distribusi Temperatur Radial Kabel Dalam Kondisi Transien Dengan Metode Elemen Hingga Menggunakan MATLAB* (dibimbing oleh Salama Manjang dan Tajuddin Waris)

Saluran transmisi maupun distribusi bawah tanah menggunakan kabel daya bawah tanah sebagai penghantar arus listrik. Dalam penyaluran energi listrik, arus tinggi yang mengalir dapat menghasilkan panas pada sekitar kabel. Arus listrik yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan suhu pada kabel daya, yang dapat memperpendek umur pakai kabel dan bahkan menyebabkan kegagalan kabel secara tiba-tiba. Penyebab kenaikan arus yang tinggi dapat disebabkan oleh hubung singkat, lonjakan tegangan dan lain-lain. Arus transien adalah arus sementara yang terjadi dalam rangkaian listrik saat terjadi perubahan kondisi mendadak. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis bagaimana distribusi temperatur radial kabel bawah tanah dalam kondisi transien dengan metode elemen hingga menggunakan Matlab. Matlab terutama digunakan untuk analisis data, pengembangan algoritma, pemodelan, dan simulasi. Metode Elemen Hingga adalah teknik numerik yang digunakan untuk mencari solusi dari masalah fisika dan teknik yang diformulasikan sebagai persamaan diferensial parsial. Metode ini sangat berguna dalam analisis struktur, perpindahan panas, dinamika fluida, elektromagnetik. Dalam penelitian ini didapatkan bahwa distribusi temperatur dalam kondisi transien atau berubah seiring waktu pada kabel tidak merata dimana temperatur tertinggi dihasilkan pada konduktor dan terendah pada lapisan PVC. Temperatur pada permukaan konduktor tertinggi pada $t = 0,3$ detik dengan arus 706,713 A sebesar $332,923^{\circ}\text{K}$ ($59,773^{\circ}\text{C}$) dan temperatur tertinggi pada permukaan isolasi XLPE saat $t = 0,3$ detik $323,93^{\circ}\text{K}$ ($50,78^{\circ}\text{C}$) sedangkan pada permukaan selubung PVC temperatur tertinggi pada permukaan sebesar $321,99^{\circ}\text{K}$ ($48,84^{\circ}\text{C}$) saat $t = 0,3$ detik. Temperatur yang berbeda terjadi pada ketiga lapisan dengan kondisi batas 305°K (32°C). Perbedaan tersebut disebabkan oleh konduktivitas konduktor yang lebih tinggi daripada isolasi XLPE dan selubung PVC.

Kata Kunci: Kabel Tanah, Arus Transien, Temperatur, Elemen Hingga.

ABSTRACT

ONGKI TANGYONG. *Analysis Of Cable Radial Temperature Distribution In Transient Conditions Using The Finite Element Method Using MATLAB* (supervised by Salama Manjang and Tajuddin Waris)

Underground transmission and distribution lines use underground power cables as conductors of electric current. In distributing electrical energy, the high current that flows can produce heat around the cable. High electric current can cause an increase in the temperature of the power cable, which can shorten the service life of the cable and even cause sudden cable failure. The cause of high current increases can be caused by short circuits, voltage surges and others. Transient current is a temporary current that occurs in an electrical circuit when a sudden change in conditions occurs. This research was conducted to analyze the radial temperature distribution of underground cables in transient conditions using the finite element method using Matlab. Matlab is mainly used for data analysis, algorithm development, modeling, and simulation. The Finite Element Method is a numerical technique used to find solutions to physics and engineering problems formulated as partial differential equations. This method is very useful in structural analysis, heat transfer, fluid dynamics, electromagnetics. In this research, it was found that the temperature distribution in transient conditions or changing over time in the cable was uneven, where the highest temperature was produced in the conductor and the lowest in the PVC layer. The highest temperature on the conductor surface at $t = 0.3$ seconds with a current of 706.713 A was 332.923°K (59.773°C) and the highest temperature on the XLPE insulation surface at $t = 0.3$ seconds was 323.93°K (50.78°C) while on the surface of the PVC sheath the highest temperature on the surface is 321.99°K (48.84°C) when $t = 0.3$ seconds. Different temperatures occur in the three layers with a boundary condition of 305°K (32°C). This difference is caused by the higher conductivity of the conductor than XLPE insulation and PVC sheathing.

Keywords: Ground Cable, Transient Current, Temperature, Finite Element.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Perpindahan Panas	5
2.1.1. Konduksi	5
2.1.2. Perpindahan Panas Konveksi	5
2.1.3. Perpindahan Panas Radiasi	6
2.2. Kabel Pada Sistem Tenaga Listrik	6
2.3. Kabel Bawah Tanah	6
2.4. Kabel Tanah	7
2.5. Kontruksi Kabel Tanah	7
2.5.1. Bagian Utama.....	7
2.5.2. Komponen Pelengkap	8
2.6. Jenis Isolasi Kabel Tanah.....	10
2.6.1. Kabel Isolasi XLPE.....	10
2.7. N2XSY/ NA2XSY	12
2.7.1. Kontruksi kabel N2XSY	13
2.7.2. Materi Penyusun Kabel.....	15
2.8. Resistivitas Dan Konduktivitas Panas Jenis Tanah.....	16
2.9. Transien.....	17
2.9.1. Penyebab Transien Pada Rangkaian Listrik.....	17

2.9.2. Rangkaian RL.....	18
2.10. Kemampuan Hantaran Arus pada Kabel.....	19
2.10.1. Perhitungan Kemampuan Hantaran Arus pada Kabel	20
2.11. Metode Elemen Hingga.....	21
2.12. Program Matlab.....	24
2.13. TOOLBOX PERSAMAAN DIFERENSIAL PARSIAL (PDE)	25
2.13.1. Implementasi.....	26
2.13.2. Mendefinisikan Suatu Masalah PDE	27
2.13.3. Penyelesaian Masalah PDE.....	27
2.13.4. Simulasi.....	27
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	28
3.1. Jenis, Tempat, dan Waktu Penelitian	28
3.2. Alat dan Bahan.....	28
3.3. Parameter Observasi.....	28
3.4. Prosedur Penelitian.....	29
3.5. Diagram Alur Pelaksanaan.....	30
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1. Simulasi Kabel Daya Bawah Tanah Pada MATLAB pada menu PDE	32
4.1.1. Menu Draw.....	32
4.1.2. Menu Boundary.....	33
4.1.3. Menu PDE.....	34
4.1.4. Menu Mesh.....	36
4.1.5. Menu Solve	37
4.1.6. Menu Plot.....	38
4.2. Hasil Simulasi Distribusi Temperatur Dalam Kondisi Transien Kabel Daya Bawah Tanah.....	41
4.2.1. Simulasi Distribusi Temperatur Dalam Kondisi Transien Arus Kabel Daya Bawah Tanah saat $t = 0,01$ detik	41
4.2.2. Simulasi Distribusi Temperatur Dalam Kondisi Transien Arus Kabel Daya Bawah saat $t = 0,03$ detik	45
4.2.3. Simulasi Distribusi Temperatur Dalam Kondisi Transien Arus Kabel Daya Bawah saat $t = 0,05$ detik	49
4.2.4. Simulasi Distribusi Temperatur Dalam Kondisi Transien Arus Kabel Daya Bawah saat $t = 0,07$ detik	53
4.2.5. Simulasi Distribusi Temperatur Dalam Kondisi Transien Arus Kabel Daya Bawah saat $t = 0,09$ detik	57

4.2.6. Simulasi Distribusi Temperatur Dalam Kondisi Transien Arus Kabel Daya Bawah saat $t = 0,3$ detik	61
4.3. Perbandingan Distribusi Temperatur Dalam Kondisi Transien Kabel Daya Bawah Tanah.....	65
4.3.1. Perbandingan Besar Kenaikan Arus Pada Kabel Tanah dalam Kondisi Transien.....	66
4.3.2. Perbandingan Besar Temperatur pada Tiap Lapisan Kabel N2XS _Y Dalam Kondisi Transien	67
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	69
5.1. Kesimpulan	69
5.2. Saran.....	69
DAFTAR PUSTAKA	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Bagian utama kabel (Sumber : Daman Suswanto,2009).....	8
Gambar 2 Bagian pelengkap Kabel (Sumber : Daman Suswanto,2009)	9
Gambar 3 Konstruksi kabel XLPE (Sumber : Salama Manjang, 2006)	11
Gambar 4 Struktur Kabel N2XSY (Sumber : SNI IEC 60502-2 dan SPLN 43-5) 13	13
Gambar 5 Kontruksi kabel N2XSY (Sumber : SNI IEC 60502-2).....	13
Gambar 6 Rangkaian RL.....	18
Gambar 7 Peralihan arus transien menuju arus steady state	19
Gambar 8 Diskritisasi elemen segitiga (Sumber : Salama Manjang, 2006)	23
Gambar 9 Diagram alur penelitian	30
Gambar 10 Bentuk geometri dan bagian kabel N2XSY	32
Gambar 11 Bentuk geometri konduktor.....	33
Gambar 12 Bentuk batas konduktor.....	33
Gambar 13 Boundary condition.....	34
Gambar 14 PDE mode pada konduktor	35
Gambar 15 PDE specification.....	35
Gambar 16 Mesh segitiga pada konduktor.....	37
Gambar 17 Triangle quality	37
Gambar 18 Simulasi distribusi temperatur pada konduktor kabel N2XSY saat t=0,01 detik.....	38
Gambar 19 Plot selection	39
Gambar 20 Kontur pada konduktor kabel N2XSY saat t = 0,01 detik	39
Gambar 21 Arah fluks panas pada konduktor kabel N2XSY saat t = 0.01 detik..	40
Gambar 22 Gambar ilustrasi penanaman kabel daya bawah tanah.....	41
Gambar 23 Simulasi distribusi temperatur pada konduktor kabel N2XSY dalam kondisi transien saat t = 0,01 detik	42
Gambar 24 Simulasi distribusi temperatur pada isolasi XLPE kabel N2XSY dalam kondisi transien saat t = 0,01 detik	42
Gambar 25 Simulasi distribusi temperatur pada selubung PVC kabel N2XSY dalam kondisi transien saat t = 0,01 detik	43
Gambar 26 Simulasi distribusi temperatur pada lapisan tanah saat t = 0,01 detik.	43
Gambar 27 Simulasi distribusi temperatur semua lapisan kabel dan lapisan tanah pada t = 0,01 detik	44
Gambar 28 Grafik temperatur transien pada tiap lapisan kabel dan tanah saat t = 0,01 detik	45
Gambar 29 Simulasi distribusi temperatur pada konduktor kabel N2XSY dalam kondisi transien saat t = 0,03 detik	46
Gambar 30 Simulasi distribusi temperatur pada isolasi XLPE kabel N2XSY dalam kondisi transien saat t = 0,03 detik	46
Gambar 31 Simulasi distribusi temperatur pada selubung PVC kabel N2XSY dalam kondisi transien saat t = 0,03 detik	47
Gambar 32 Simulasi distribusi temperatur pada lapisan tanah saat t = 0,03 detik.	47
Gambar 33 Simulasi distribusi temperatur semua lapisan kabel dan lapisan tanah pada t = 0,03 detik	48
Gambar 34 Grafik temperatur transien pada tiap lapisan kabel dan tanah saat t = 0,03 detik	49

Gambar 35 Simulasi distribusi temperatur pada konduktor kabel N2XSY dalam kondisi transien saat $t = 0,05$ detik	50
Gambar 36 Simulasi distribusi temperatur pada isolasi XLPE kabel N2XSY dalam kondisi transien saat $t = 0,05$ detik	50
Gambar 37 Simulasi distribusi temperatur pada selubung PVC kabel N2XSY dalam kondisi transien saat $t = 0,05$ detik	51
Gambar 38 Simulasi distribusi temperatur pada lapisan tanah saat $t = 0,05$ detik.	51
Gambar 39 Simulasi distribusi temperatur semua lapisan kabel dan lapisan tanah pada $t = 0,05$ detik	52
Gambar 40 Grafik temperatur transien pada tiap lapisan kabel saat $t = 0,05$ detik	53
Gambar 41 Simulasi distribusi temperatur pada konduktor kabel N2XSY dalam kondisi transien saat $t = 0,07$ detik	54
Gambar 42 Simulasi distribusi temperatur pada isolasi XLPE kabel N2XSY dalam kondisi transien saat $t = 0,07$ detik	54
Gambar 43 Simulasi distribusi temperatur pada selubung PVC kabel N2XSY dalam kondisi transien saat $t = 0,07$ detik	55
Gambar 44 Simulasi distribusi temperatur pada lapisan tanah saat $t = 0,07$ detik.	55
Gambar 45 Simulasi distribusi temperatur semua lapisan kabel dan lapisan tanah pada $t = 0,07$ detik	56
Gambar 46 Grafik temperatur transien pada tiap lapisan kabel saat $t = 0,07$ detik	57
Gambar 47 Simulasi distribusi temperatur pada konduktor kabel N2XSY dalam kondisi transien saat $t = 0,09$ detik	58
Gambar 48 Simulasi distribusi temperatur pada isolasi XLPE kabel N2XSY dalam kondisi transien saat $t = 0,09$ detik	58
Gambar 49 Simulasi distribusi temperatur pada selubung PVC kabel N2XSY dalam kondisi transien saat $t = 0,09$ detik	59
Gambar 50 Simulasi distribusi temperatur pada lapisan tanah saat $t = 0,09$ detik.	59
Gambar 51 Simulasi distribusi temperatur semua lapisan kabel dan lapisan tanah pada $t = 0,09$ detik	60
Gambar 52 Grafik temperatur transien pada tiap lapisan kabel saat $t = 0,09$ detik	61
Gambar 53 Simulasi distribusi temperatur pada konduktor kabel N2XSY dalam kondisi transien saat $t = 0,3$ detik	62
Gambar 54 Simulasi distribusi temperatur pada isolasi XLPE kabel N2XSY dalam kondisi transien saat $t = 0,3$ detik	62
Gambar 55 Simulasi distribusi temperatur pada selubung PVC kabel N2XSY dalam kondisi transien saat $t = 0,3$ detik	63
Gambar 56 Simulasi distribusi temperatur pada lapisan tanah saat $t = 0,3$ detik.	63
Gambar 57 Simulasi distribusi temperatur semua lapisan kabel dan lapisan tanah pada $t = 0,3$ detik	64
Gambar 58 Grafik temperatur transien pada tiap lapisan kabel saat $t = 0,3$ detik.	65
Gambar 59 Besar kenaikan arus pada kabel tanah dalam kondisi transien.....	66
Gambar 60 Grafik Perbandingan besar temperatur pada tiap lapisan kabel tanah dalam kondisi transien	67

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Karakteristik bahan isolasi	11
Tabel 2 Spesifikasi Kabel N2XSY	14
Tabel 3 Spesifikasi elektris kabel N2XSY dengan Nom. Cross Section Area 630 mm ²	14
Tabel 4 Data sheet material penyusun kabel	15
Tabel 5 Resistivitas Thermal dan Koefisien Temperatur	15
Tabel 6 Resistansi Thermal Bahan Isolasi dan Selubung	15
Tabel 7 Resistivitas Jenis Tanah	16
Tabel 8 Konduktivitas Panas Jenis Tanah	16
Tabel 9 Besar temperatur pada permukaan tiap lapisan kabel dalam kondisi transien saat t = 0,01 detik	44
Tabel 10 Besar temperatur pada permukaan tiap lapisan kabel dalam kondisi transien saat t = 0,03 detik	48
Tabel 11 Besar temperatur pada permukaan tiap lapisan kabel dalam kondisi transien saat t = 0,05 detik	52
Tabel 12 Besar temperatur pada permukaan tiap lapisan kabel dalam kondisi transien saat t = 0,07 detik	56
Tabel 13 Besar temperatur pada permukaan tiap lapisan kabel dalam kondisi transien saat t = 0,09 detik	60
Tabel 14 Besar temperatur pada permukaan tiap lapisan kabel dalam kondisi transien saat t = 0,3 detik	64
Tabel 15 Besar kenaikan arus pada kabel tanah dalam kondisi transien	66
Tabel 16 Perbandingan besar temperatur pada tiap lapisan kabel tanah dalam kondisi transien	67

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kabel adalah suatu alat yang berfungsi untuk menyalurkan arus dari suatu titik ke titik lain pada suatu sistem tenaga listrik. Kabel memiliki berbagai macam jenis tergantung dari kebutuhannya. Penyaluran tenaga listrik umumnya dibagi menjadi menjadi dua, yaitu transmisi dan distribusi. Transmisi adalah penyaluran listrik dari suatu titik ke titik lain pada saluran tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi. Di Indonesia saluran transmisi tegangan tinggi menggunakan tegangan 30 kV-150kV, sedangkan saluran tegangan ekstra tinggi menggunakan tegangan 200 kV- 500 kV. Distribusi adalah penyaluran listrik dengan tegangan menengah dan rendah. Tegangan menengah yang digunakan adalah 6kV, 12 kV dan 20 kV, sedangkan tegangan rendah yang digunakan adalah 220 V dan 380 V. Berdasarkan pemasangannya pada umumnya dibagi menjadi dua, yaitu pemasangan saluran udara dan saluran bawah tanah (Daman Suswanto, 2009).

Kabel daya adalah komponen penting dalam sistem listrik yang digunakan untuk menghantarkan listrik dari pembangkit listrik ke konsumen. Kabel daya sering digunakan dalam kondisi lingkungan yang ekstrim dan bekerja pada kapasitas penuh, sehingga rentan terhadap kerusakan akibat panas yang berlebihan. Salah satu faktor yang mempengaruhi panas yang dihasilkan oleh kabel daya adalah arus listrik yang melewatinya. Arus listrik yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan suhu pada kabel daya, yang dapat memperpendek umur pakai kabel dan bahkan menyebabkan kegagalan kabel secara tiba-tiba. Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk menganalisis temperatur kabel dalam kondisi transien, yaitu ketika suhu pada kabel berubah seiring waktu. Metode analisis yang umum digunakan untuk menganalisis temperatur kabel adalah metode elemen hingga, yang membagi geometri kabel menjadi beberapa elemen kecil dan memperhitungkan suhu pada setiap elemen dengan persamaan dasar yang menggambarkan perpindahan panas. Metode ini dapat memberikan hasil yang akurat dalam simulasi temperatur kabel. Proses perpindahan panas terbagi 3 yaitu perpindahan panas secara konduksi, konveksi dan radiasi. Perpindahan panas

merupakan energi yang berpindah dikarenakan oleh adanya perbedaan suhu (F.P Incropera dan D.P Dewitt, 1990).

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan metode penelitian analisis temperatur kabel dalam kondisi transien dengan metode elemen hingga menggunakan MATLAB serta diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik tentang perilaku termal kabel dalam kondisi transien, yang dapat berguna dalam desain dan pengembangan sistem kabel yang efisien dan handal. Dalam penelitian ini akan dilakukan pemodelan geometri kabel dan akan dianalisis dengan metode elemen hingga. Persamaan dasar untuk simulasi elemen hingga akan diimplementasikan ke dalam MATLAB menggunakan bahasa pemrograman yang tepat. Hasil simulasi akan disajikan dalam bentuk plot atau animasi untuk memudahkan interpretasi hasil. Metode elemen hingga ini dipilih karena memiliki keunggulan yaitu dapat diaplikasikan untuk pemodelan yang rumit seperti geometri dari kabel.

Metode elemen hingga adalah salah satu metode numerik yang banyak digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial pada permasalahan ilmu rekayasa dan matematika fisik seperti perpindahan panas, analisis struktur, aliran fluida, transportasi massa dan potensial elektromagnetik. Proses dari metode elemen hingga adalah membagi masalah yang kompleks menjadi elemen-elemen agar lebih mudah mendapatkan solusi. Solusi dari tiap elemen kemudian digabungkan sehingga menjadi solusi masalah secara keseluruhan (P.B Kosasih, 2012).

Berdasarkan permasalahan tersebut maka untuk mengetahui distribusi temperatur radial pada kabel dalam kondisi transien maka diperlukan suatu analisa untuk dapat mengetahui hal tersebut dengan menggunakan metode elemen hingga. Untuk itu di lakukan penelitian ini dengan judul “ Analisis Distribusi Temperatur Radial Kabel dalam Kondisi Transien dengan Metode Elemen Hingga menggunakan Matlab”.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam tugas akhir ini yaitu :

1. Bagaimana distribusi temperatur radial kabel dalam kondisi transien?

2. Bagaimana mengetahui besar temperatur radial kabel tanah dalam kondisi transien?
3. Bagaimana menganalisis distribusi temperatur radial kabel dalam kondisi transien dengan metode elemen hingga menggunakan MATLAB?

1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai adalah :

1. Untuk mengetahui bagaimana distribusi temperatur radial kabel dalam kondisi transien.
2. Untuk mengetahui bagaimana besar temperatur pada kabel bawah tanah dalam kondisi transien.
3. Menganalisis distribusi temperatur radial kabel dalam kondisi transien dengan metode elemen hingga menggunakan MATLAB.

Adapun manfaat yang akan dicapai adalah :

1. Dapat mengetahui bagaimana distribusi temperatur radial kabel dalam kondisi transien.
2. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik tentang perilaku termal kabel dalam kondisi transien, yang dapat berguna dalam desain dan pengembangan sistem kabel yang efisien dan handal.
3. Dapat mengetahui cara menganalisis distribusi temperatur radial kabel dalam kondisi transien dengan metode elemen hingga menggunakan MATLAB.
4. Dapat mengetahui besar temperatur pada kabel bawah tanah dalam kondisi transien.

1.4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini membahas tentang analisis distribusi temperatur radial kabel dalam kondisi transien dengan metode elemen hingga menggunakan MATLAB.

2. Penelitian ini menggunakan kabel N2XSY 12/20 (24) kV berinti tunggal dengan sumber tegangan 20 kV.
3. Penelitian ini hanya menganalisis distribusi temperatur kabel dalam kondisi transien.
4. Penelitian ini menganalisis distribusi temperatur pada lapisan kabel yaitu konduktor, isolasi XLPE dan PVC.
5. Penelitian dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB
6. Tempat penelitian dilakukan pada Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat, ruang lingkup, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan teori-teori pendukung materi penelitian yang diambil dari berbagai sumber ilmiah yang digunakan dalam penulisan laporan penelitian

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini membahas tentang tahap-tahap dalam melakukan penelitian ini.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tentang data yang telah diperoleh dan analisis dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini membahas tentang kesimpulan dan hasil penelitian serta saran yang berkaitan dengan penelitian ini.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Perpindahan Panas

Perpindahan panas merupakan energi yang berpindah dikarenakan oleh adanya perbedaan suhu. Perpindahan panas terjadi dengan tiga cara, yaitu : konduksi (hantaran), konveksi (aliran) dan radiasi (pancaran) (F.P Incropera dan D.P Dewitt, 1990).

Pada Tugas Akhir ini dikaji suatu permasalahan yang berkaitan dengan perpindahan panas konduksi.

2.1.1. Konduksi

Konduksi adalah proses perpindahan panas yang terjadi dimana panas mengalir dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah pada medium tetap. Persamaan umum dari laju perpindahan panas secara konduksi menurut Hukum Fourier dinyatakan pada persamaan (1) (Rohsenow, W. M. et al, 1998).

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana :

q : laju perpindahan panas konduksi (W/m²)

A : luas penampang (m²)

$\frac{dT}{dx}$: gradien suhu (°C/m)

k : konduktivitas panas (W/m.K)

2.1.2. Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi dari suatu permukaan media padat atau *fluida* yang diam menuju fluida yang mengalir atau bergerak. Perpindahan kalor ini umumnya terjadi dari benda padat ke fluida (baik cair maupun gas). Persamaan perpindahan kalor konveksi pertama kali di nyatakan oleh New-ton pada tahun 1701, dan selanjutnya disebut sebagai hukum newton tentang pendinginan dinyatakan pada persamaan (2) (Rohsenow, W. M. et al, 1998).

$$\frac{q}{A} = h\Delta T \dots\dots\dots(2)$$

Dimana :

q : Laju perpindahan panas (Watt)

A : Luas daerah yang tegak lurus terhadap arah aliran panas (m^2)

ΔT : Beda temperatur antar permukaan dan fluida ($^{\circ}C$)

h : Koefisien perpindahan kalor konveksi ($Watt/m^2.k$)

2.1.3. Perpindahan Panas Radiasi

Radiasi merupakan perpindahan kalor melalui gelombang dari suatu zat ke zat yang lain tanpa membutuhkan medium perantara. Proses perpindahan kalor radiasi terjadi dengan perantaraan foton dan juga gelombang elektromagnet. Persaman perpindahan panas radiasi dinyatakan pada persamaan (3) (Rohsenow, W. M. et al, 1998).

$$\frac{q}{A} = e\sigma T^4 \dots\dots\dots(3)$$

Dimana :

q : Laju perpindahan kalor (Watt)

A : luas daerah yang tegak lurus terhadap arah aliran panas (m^2)

σ : konstanta Stefan-Boltzman = $5,675 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$

T : Temperatur absolut (K)

e : Emisi benda

2.2. Kabel Pada Sistem Tenaga Listrik

Kabel listrik adalah kawat penghantar berisolasi sebagai media untuk menyalurkan energi listrik dari satu tempat ke tempat yang lain. Untuk dapat menyalurkan arus listrik, maka dibutuhkan sebuah konduktor, dan harus dipastikan bahwa arus yang mengalir pada kabel tidak mengalir ke arah yang tidak diinginkan.

2.3. Kabel Bawah Tanah

Dalam sistem kelistrikan saluran distribusi merupakan rantai penghubung antara pusat-pusat pembangkit tenaga menuju pusat beban melalui gardu induk transmisi dan distribusi. Berdasarkan cara pemasangannya saluran sistem distribusi dapat dibagi dalam tiga kelompok, yaitu: saluran udara (*overhead line*), saluran kabel bawah laut (*submarine cable*) dan saluran kabel tanah. Pada sistem saluran

kabel bawah tanah, penyaluran tenaga listrik melalui kabel-kabel seperti kabel bawah laut dengan berbagai macam isolasi pelindungnya. Saluran kabel bawah tanah ini dibuat untuk menghindari resiko bahaya yang terjadi pada pemukiman padat penduduk tanpa mengurangi keindahan lingkungan. Inti dari suatu kabel adalah penghantar, berikutnya pelindung penghantar, isolator kabel, selanjutnya pelindung isolator, netral dan terakhir lapisan pembungkus. Kebanyakan kabel distribusi adalah penghantar tunggal. Jenis kabel yang biasanya digunakan ada dua jenis, yaitu kabel netral konsentris (*concentric neutral cable*) dan kabel daya (*power cable*) (Daman Suswanto, 2009).

2.4. Kabel Tanah

Kabel tanah merupakan salah satu penghantaran yang berisolasi, berpelindung mekanis dan berselubung luar yang dalam penggunaannya dipasang di dalam tanah.

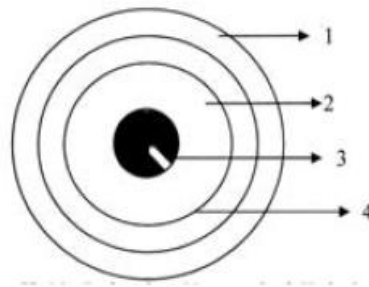
Kabel Tanah merupakan kawat yang diisolasikan, sehingga tahan terhadap tegangan tertentu antara penghantar yang satu dengan penghantar yang lain ataupun penghantar dengan tanah serta dibungkus dengan pelindung, sehingga terhindar dari pengaruh-pengaruh kimia lain yang ada dalam tanah. Oleh sebab itu kabel tanah tersebut beroperasi dalam tanah, maka komponen termasuk kabel harus mampu beroperasi secara terus menerus karena memiliki persyaratan isolasi yang khusus untuk melindunginya dari pengeruh-pengaruh yang ada dalam tanah. (Daman Suswanto, 2009).

2.5. Kontruksi Kabel Tanah

Sebagai penghantar kabel memiliki dua bagian yaitu bagian utama dan bagian pelengkap (Daman Suswanto, 2009):

2.5.1. Bagian Utama

Kabel adalah komponen penting dalam berbagai sistem listrik dan elektronik yang kita andalkan setiap hari. Di balik kesederhanaannya, kabel memiliki struktur kompleks yang dirancang untuk memastikan kinerja optimal dan keamanan. Bagian utama kabel dapat dilihat pada Gambar 1 yang terdiri dari empat bagian utama :



Gambar 1 Bagian utama kabel (Sumber : Daman Suswanto,2009)

1. Selubung (sheath)

Selubung (sheath) berfungsi untuk melindungi inti kabel dari pengaruh luar, misalnya : pelindung terhadap korosi, penahan gaya mekanis, mencegah keluarnya minyak dan mencegah masuknya uap air kedalam kabel.

2. Isolasi (Insulation)

Isolasi adalah sifat atau bahan yang dapat memisahkan secara elektrik beberapa buah penghantar yang berdekatan, sehingga mencegah terjadinya arus bocor.

3. Penghantar (konduktor)

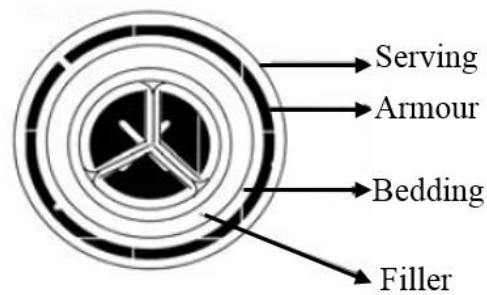
Konduktor berfungsi sebagai tempat atau media mengalirnya arus listrik.

4. Tabir (screen)

Tabir adalah suatu lapisan yang dipasang sesudah bahan isolasi, dimana tabir ini biasa dipasang pada kabel tegangan tinggi.

2.5.2. Komponen Pelengkap

Kabel adalah komponen esensial dalam sistem listrik dan elektronik, tetapi keberhasilan kinerjanya tidak hanya bergantung pada bagian utamanya seperti konduktor dan isolasi. Ada beberapa komponen pelengkap yang juga berperan penting dalam memastikan kabel dapat berfungsi dengan optimal dan aman. Komponen pelengkap kabel dapat dilihat pada Gambar 2 yang terdiri dari empat bagian pelengkap yaitu :



Gambar 2 Bagian pelengkap Kabel (Sumber : Daman Suswanto,2009)

- Sarung kabel (serving)
Sarung kabel merupakan suatu lapisan bahan serat yang tahan terhadap air. Sarung kabel ini biasanya dipasang diatas armour, yang berfungsi adalah selain untuk bertahan bagi perisai, juga sebagai kompen yang berhubungan langsung dengan tanah, sehingga sarung kabel adalah bagian pertama yang berhubungan dengan pengaruh luar.
- Perisai (Armour)
Perisai ini berfungsi untuk melindungi bahan isolasi dari kerusakan mekanis.
- Bantalan (Bedding)
Bantalan adalah lapisan yang terbuat dari serat – serat yang berfungsi sebagai dudukan perisai (armour) dan juga berfungsi mencegah proses elektrolisa sehingga tidak merusak bagian dalamnya.
- Bahan Pengisi (Filler)
Bahan pengisi ini biasanya dipergunakan pada konstruksi kabel yang berinti tiga yaitu di gunakan untuk mengisi celah yang kosong sewaktu pemasangan intinya, sehingga dapat berbentuk bulat.

2.6. Jenis Isolasi Kabel Tanah

2.6.1. Kabel Isolasi XLPE

Pada tegangan menengah kabel yang digunakan pada umumnya adalah kabel dengan bahan isolasi XLPE atau *cross linked polyethylene*. XLPE adalah hasil reaksi kimia dari bahan *polyethylene* yang berbeda-beda sehingga menghasilkan rangkaian *polyethylene* yang lebih kuat dan lebih tahan terhadap kenaikan temperatur (S. Kahourzade et al., 2011).

Cross linked polyethylene (XLPE) banyak digunakan sebagai bahan isolasi listrik dalam distribusi bawah tanah dan kabel transmisi selama hampir empat dekade, karena kekuatan dielektrik yang sangat baik, dielektrik rendah permitivitas dan faktor kerugian, stabilitas dimensi yang baik, ketahanan pelarut dan perilaku termo-mekanis. Namun, sekarang dipahami bahwa pengalaman XLPE penuaan ketika mengalami berbagai tekanan seperti listrik, termal, mekanik, yang dapat berubah komposisi kimia dan morfologi fisiknya dan bahkan mengarah pada kegagalan.

Dari segi isolasi, kabel isolasi sintesis mempunyai kelebihan di bandingkan dengan isolasi kertas yaitu :

- a. Lebih bersih.
- b. Ringan, karena tak memerlukan selubung logam.
- c. Perbaikan dan pemeliharaannya mudah.
- d. Cara penyambungannya sederhana.
- e. Suhu kerjanya lebih tinggi (khusus XLPE), karena itu kapasitas penyalurannya besar.

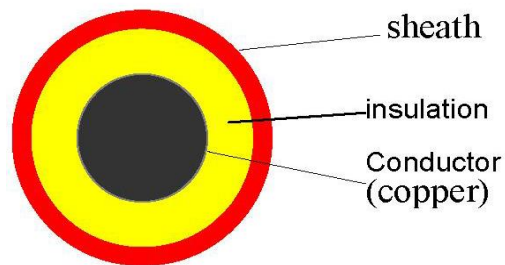
Isolasi XLPE digunakan pada kabel yang bertegangan mencapai 110 kV atau biasa digunakan pada kabel tegangan menengah.

Keuntungan dari isolasi XLPE adalah :

- a. Suhu kerja lebih tinggi sehingga dapat dialiri arus yang lebih tinggi.
- b. Bobot yang ringan.
- c. Bisa digunakan pada frekuensi tinggi.

Namun juga memiliki kekurangan seperti lebih sensitif terhadap pelepasan muatan (*partial discharges*), serta umur bahan yang tidak terlalu lama (Daman Suswanto, 2009).

Kabel XLPE (Cross-Linked Polyethylene) adalah jenis kabel yang sangat populer digunakan dalam aplikasi listrik karena ketahanannya yang tinggi terhadap panas, tegangan listrik, dan kondisi lingkungan yang ekstrem. Konstruksi kabel XLPE terdiri dari beberapa komponen utama yang dirancang untuk memastikan kinerja optimal dan daya tahan yang lama. Kontruksi kabel XLPE dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Konstruksi kabel XLPE (Sumber : Salama Manjang, 2006)

Menurut hasil penelitian: Naim (1999):

1. Kemampuan bahan isolasi XLPE mempertahankan sifat dan fisik termal pengaruh suhu sampai dengan dengan suhu 118,5 °C
2. Titik leleh isolasi bahan XLPE terjadi pada suhu 118.5 °C
3. Bahan isolasi XLPE akan mengalami degradasi polimer pada suhu 242,3 °C.

Karakteristik masing-masing bahan isolasi dapat dilihat pada Tabel

1.

Tabel 1 Karakteristik bahan isolasi

Isolasi	KI	PVC	PE	XLPE	EPR
Temperatur kerja maksimum (°C)					
1. Normal	65	70	70	90	90
2. Beban lebih	75	-	-	130	-
3. Akhir hubung singkat	150	160	150	250	250
Ketahanan terhadap :					
1. Zat kimia	-	sb	c	sb	sb
2. Kelembaban	brk	sb	sb	sb	sb
3. Api	brk	b	brk	c	c

Isolasi	KI	PVC	PE	XLPE	EPR
Kelenturan	brk	c	c	c	sb
Batas tegangan (kV)	630/750	10	400	225	132

Sumber : Ngapuli, 1988:04

Keterangan :

KI = kertas impregnasi

B = baik

Brk = buruk

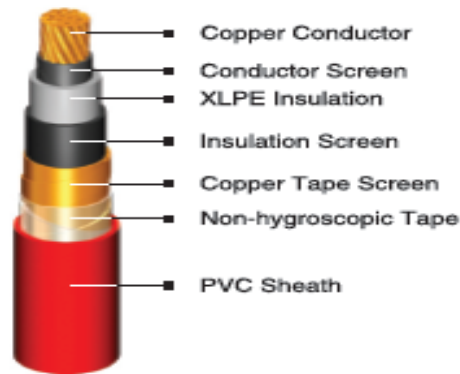
C = cukup

Sb = sangat baik

2.7. N2XSY/ NA2XSY

Kabel jenis ini adalah kabel tegangan menengah yang memiliki satu 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. S merupakan kode untuk bahan lapisan metalik yang melindungi bahan isolasi, sedangkan Y adalah kode untuk lapisan terluar dari kabel yang berbahan PVC.

Pada gambar 4 dapat kita lihat lapisan dari kabel ini terdiri dari tujuh bagian. Bagian pertama adalah konduktor yang 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 dilapisi oleh sebuah pita yang berfungsi sebagai penghalang agar tidak ada cairan yang dapat masuk ke dalam kabel. Sementara pada lapisan terluar adalah bagian pelindung kabel yang terbuat dari bahan PVC.

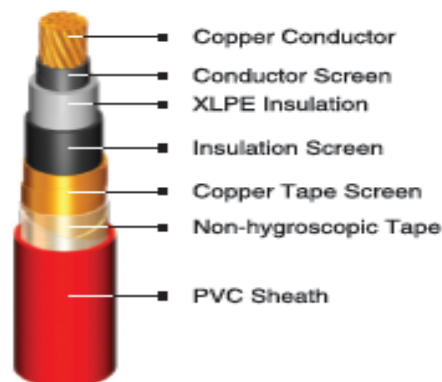


Gambar 4 Struktur Kabel N2XSY (Sumber : SNI IEC 60502-2 dan SPLN 43-5)

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 630 mm².

2.7.1. Kontruksi kabel N2XSY

Kabel N2XSY adalah jenis kabel tegangan tinggi yang sering digunakan dalam instalasi listrik untuk distribusi daya. Kabel ini dikenal karena kemampuannya untuk mengalirkan arus listrik secara andal dan efisien dalam kondisi lingkungan yang keras. Konstruksi kabel N2XSY terdiri dari beberapa komponen utama yang dirancang untuk memastikan kinerja optimal dan daya tahan yang lama Kontruksi kabel N2XSY dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Kontruksi kabel N2XSY (Sumber : SNI IEC 60502-2)

Dalam tugas akhir ini, kabel yang akan disimulasikan adalah kabel bawah tanah dengan tipe N2XSY dengan rating tegangan 20 kV sesuai dengan standart (IEC 60502-2). Untuk spesifikasi kabel dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Spesifikasi Kabel N2XSY

Spesifikasi	Satuan	Nilai
Ketebalan Conductor screen	mm	1.016
Ketebalan Isolasi XLPE	mm	5.5
Ketebalan Insulation Screen	mm	2.032
Ketebalan Copper Tape Screen	mm	0.127
Ketebalan Non-hygroscopic Tape	mm	2.5
Voltage Class	KV	20
Nom. Cross Section Area	mm ²	630
Overall Kabel Diameter	Mm	53
(Approx)		
Cable Net. Weight (Approx)	Kg/km	7.700
Diameter Konduktor (Approx)	Mm	30.3
Diameter Isolasi (Approx)	mm	44.1
Ketebalan PVC Sheath	mm	2.5

Sumber: PT Sucaco, (2021); Sijabat, (2017); SPLN, (1995)

Tabel 3 Spesifikasi elektrik kabel N2XSY dengan Nom. Cross Section Area 630 mm²

Spesifikasi	Satuan	Nilai		
Konduktor	Resistansi DC saat 20 ⁰ C	Ω/km	0.0283	
	Resistansi AC saat 20 ⁰ C	Ω/km	0.041	
Induktansi	Trifoil	mH/km	0.299	
	Berjajar	mH/km	0.483	
Ampacity saat 30° C	Trifoil	Di Udara	A	1009
		Di Tanah	A	782
	Berjajar	Di Udara	A	1090
		Di Tanah	A	821
Arus Singkat Saat 1 detik	Hubung Konduktor	kA/sec	90.83	
	Screen	kA/sec	7.01	

Spesifikasi	Satuan	Nilai	
isolasi	Resistansi DC saat 20 ⁰ C	MΩ/km	500
Kapasitansi per fasa		μΩ/km	0.4830

Sumber: PT Sucaco, (2021)

Pada Tabel 3 dapat kita lihat data elektris dari kabel N2XSY dengan *nominal cross section area* 630 mm². Data ini digunakan untuk menghitung panas yang muncul pada konduktor akibat adanya arus yang mengalir.

2.7.2. Materi Penyusun Kabel

Material atau bahan penyusun kabel yang digunakan pada simulasi terdiri dari beberapa jenis material yang berbeda dengan spesifikasi yang berbeda.

Tabel 4 Data sheet material penyusun kabel

Unit	Material		
	Copper	XLPE	PVC
Density (kg/m ³)	7700	920	1450
Therm. Conductivity (W/m.K)	401	0,4	0,16
Heat Cap. (J/m ³ . ⁰ K)	0,384	2,4*10 ⁻⁶	2,4*10 ⁻⁶

Sumber : PT Sucaco, (2021, Ghoneim, (2021)

Tabel 5 Resistivitas Thermal dan Koefisien Temperatur

Material	Resistivitas Thermal (Koefisien Temperatur
	ρ_{20}). 10 ⁻⁸ Ω.m	(α_{20}).10 ⁻³ per ⁰ C
Tembaga	1,7241	3,93
Aluminium	2,8264	4,03

Sumber : Walangare. F.A.Y. dkk, (2019)

Tabel 5 menunjukkan resistivitas thermal dan koefisien temperatur dari material tembaga dan aluminium.

Tabel 6 Resistansi Thermal Bahan Isolasi dan Selubung

Material	Resistivitas Thermal (ρ_{20}) [K.m/W]
XLPE (Cross-linked Polyethylen)	3,5
PVC (Polyviny Chloride)	5,0
PE (Polyethylen)	3,5

Sumber : Ghoneim, (2021)

Tabel 6 berisi resistansi thermal bahan isolasi dan selubung yaitu XLPE, PVC dan PE.

2.8. Resistivitas Dan Konduktivitas Panas Jenis Tanah

Resistivitas dan konduktivitas pada berbagai jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8 :

Tabel 7 Resistivitas Jenis Tanah

Deskripsi Tanah	Resistivitas Tanah (Ohm-meter)
Kerikil tinggi, campuran kerikil dan pasir, kerapatan rendah dan tidak halus	600-1000
Kerikil dan tandus, campuran kerikil dan pasir kerapatan rendah dan tidak halus	1000-2500
Kerikil dan liat, tandus, campuran tanah liat dan pasir	200-400
Pasir berlumpur, campuran pasir dan lumpur	100-500
Pasir liat, campuran pasir dan tanah liat, tandus	50-200
Pasir halus berlumpur dan liat mengandung plastik konsentrasi rendah	30-80
Pasir halus atau tanah lumpur, lumpur elastik	80-300
Liat berkerikil, liat berpasir, liat berlumpur	25-60
Liat aborganik dengan kandungan plastic tinggi	10-55

Sumber : IEEE Std 142-1991

Tabel 8 Konduktivitas Panas Jenis Tanah

Konduktivitas Panas Tanah (K m /W)	Kondisi Tanah	Kondisi Suhu
0.7	Sangat lembab	Selalu lembab
1.0	Lembab	Curah hujan tinggi
2.0	Kering	Curah hujan rendah
3.0	Sangat Kering	Tidak ada curah hujan / sedikit sekali curah hujan

Sumber : George F, (1997)

2.9. Transien

Gejala peralihan atau transien adalah perubahan sesaat dalam nilai tegangan atau arus, atau keduanya, dari keadaan tunaknya selama periode waktu tertentu (dalam orde mikrodetik). Hal ini dapat disebabkan oleh faktor lingkungan atau eksternal seperti sambaran petir, dan juga dapat disebabkan oleh penggunaan sistem itu sendiri atau faktor internal seperti koneksi. Kondisi transien dapat berupa tegangan atau arus (Roger C Dugan, 2003).

2.9.1. Penyebab Transien Pada Rangkaian Listrik

Fenomena transien disebabkan oleh perubahan parameter sirkuit, biasanya karena pensaklaran, open circuit atau short circuit, perubahan operasi sumber, dll. Transien adalah perubahan tegangan dan arus yang terjadi selama transisi dari keadaan stabil ke keadaan lainnya. Perubahan arus dan tegangan selama proses transien tidak instan dan membutuhkan waktu, meskipun perubahan ini terjadi dengan cepat dalam milidetik atau bahkan mikrodetik (Roger C Dugan, 2003).

Namun, perubahan yang sangat cepat ini tidak dapat segera terjadi, karena proses transisi dicapai dengan pertukaran energi, yang biasanya disimpan dalam medan magnet induktansi dan/atau medan listrik kapasitansi. Perubahan energi tidak dapat terjadi secara mendadak karena akan menghasilkan daya yang tidak terbatas (daya adalah turunan dari energi, $P = dW/dt$), yang tidak mungkin terjadi dalam keadaan sesungguhnya. Semua parameter yang berubah selama transien (juga disebut respons transien), kemudian menghilang dan keadaan tunak baru muncul (Dwi Febrianto, FT UI, 2008).

Dalam hal ini, transien dapat didefinisikan sebagai perilaku rangkaian diantara dua keadaan tunak, yaitu keadaan tunak yang lama (sebelum perubahan) dan keadaan tunak yang baru.

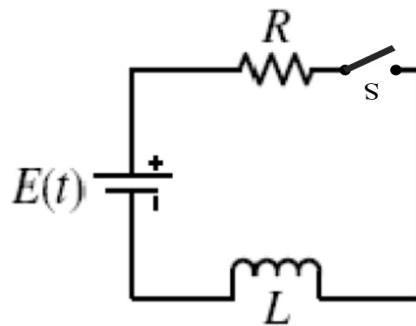
Penyebab terjadinya transient antara lain :

- a) Load switching (penyambungan dan pemutusan beban)
- b) Rangkaian terbuka (open circuit)
- c) Hubung singkat (short circuit)
- d) Perubahan dalam operasi sumber

Transien yang terjadi pada saat pembukaan saklar maka akan terjadi perubahan besar nya arus. (B. Ravindranath & M. Chander, 1977).

2.9.2. Rangkaian RL

Rangkaian RL adalah salah satu dari banyak konfigurasi dasar yang digunakan dalam analisis rangkaian listrik. Rangkaian ini terdiri dari dua komponen utama yang dihubungkan secara seri atau paralel: resistor (R) dan induktor (L). Gambar 6 menunjukkan rangkaian RL dimana R adalah resistansi dan L adalah induktansi.



Gambar 6 Rangkaian RL

Hukum kirchoff 1:

$$L \frac{di}{dt} + RI = E(t) \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}I = \frac{E}{L}(t) \dots \dots \dots (5)$$

Jawaban umum persamaan adalah :

$$I(t) = \frac{E_0}{R} + Ce^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

Apabila kondisi awal $I(0) = 0$, maka diperoleh jawaban khusus dengan

mendapatkan nilai $C = -\frac{E_0}{R}$

Maka persamaan untuk menghitung arus transien yaitu :

$$I(t) = \frac{E_0}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \dots \dots \dots (7)$$

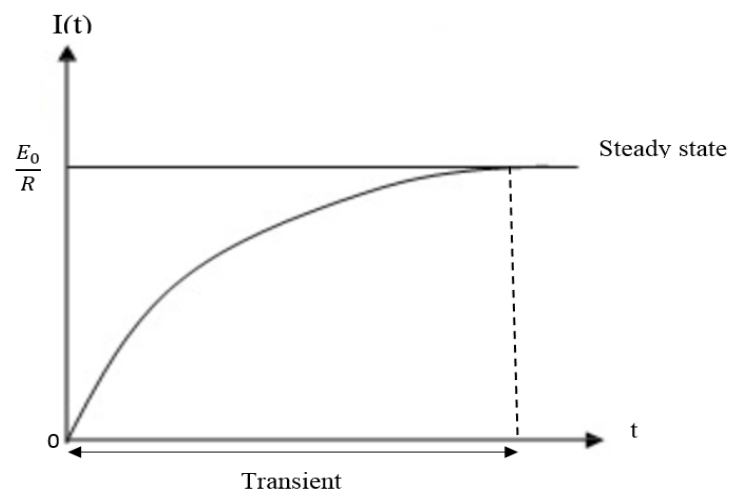
Dimana : E_0 = Tegangan (volt)

R = Resistansi (ohm/m)

L = Induktansi (henry/m)

t = waktu (detik)

Gambar 7 menunjukkan arus transien menuju ke kondisi stabil pada rangkaian RL.



Gambar 7 Peralihan arus transien menuju arus *steady state*

Pada gambar 7 dapat dilihat bahwa perubahan arus dari kondisi transien (0) berubah seiring waktu hingga mencapai kondisi steady state (E_0/R).

2.10. Kemampuan Hantaran Arus pada Kabel

Kemampuan hantaran arus atau yang biasa dikenal dengan istilah *ampacity* pada kabel adalah jumlah arus maksimal yang dapat dibawa sebuah kabel pada kondisi normal tanpa mempertimbangkan penurunan kondisi lingkungan sekitar yang terjadi secara tiba-tiba. Istilah *ampacity* ini pertama kali diperkenalkan oleh William Del Mar pada tahun 1950an awal ketika istilah *current carrying capacity* dinilai terlalu panjang untuk diucapkan (A.T. William, 2005).

Ketika kabel dilalui oleh arus, maka kabel tersebut akan menjadi sebuah sumber panas. Energi panas ini menyebabkan suhu pada kabel meningkat, dan harus dijaga agar suhu pada kabel tidak melewati batas yang diijinkan. Ada beberapa sumber panas dalam sebuah kabel, seperti *losses* pada konduktor akibat aliran arus, *dielectric loss* pada bahan isolasi, dan arus yang mengalir pada pelindung ataupun *armour*.

Sumber panas hasil dari kenaikan suhu pada kabel harus dialirkan keluar kabel melewati material yang memiliki resistansi beragam terhadap panas tersebut. Resistansi tersebut meliputi bahan isolasi kabel, pelindung bahan isolasi, pelapis terluar kabel, udara, tanah, dan lain-lain.

Kemampuan hantar arus kabel baik jenis multi core maupun single core dibatasi oleh ketentuan sebagai berikut (PT PLN (Persero), 2010) :

- suhu tanah 30⁰C
- resistance panas jenis tanah 100⁰C, cm/W.
- digelar sendiri / hanya 1 kabel
- suhu penghantar maksimum 90⁰C untuk kabel dengan isolasi XLPE dan 65⁰C untuk kabel tanah berisolasi PVC.
- Kabel ditanam sedalam 70 cm di bawah permukaan tanah.

2.10.1. Perhitungan Kemampuan Hantaran Arus pada Kabel

Rumus yang digunakan untuk perhitungan kapasitas hantar arus untuk kabel yang ditanam secara langsung di dalam tanah adalah:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right] \dots\dots\dots(8)$$

Dimana

- ρ_s : Resistivitas thermal tanah (K.m/W) = 1 K.m/W
 L : Kedalaman kabel (mm) = 500 mm
 De : Diameter terluar kabel (mm) = 85 mm
 I : Arus / Kapasitas hantar arus (A)
 $\Delta\theta$: Temperatur (C)
 Wd : Rugi-rugi dielektrik (W/m)
 T1 : Tahanan panas per inti antara konduktor dan sheath

- (K.m/W)
- T2 : Tahanan panas antara sheath dan armor (K.m/W)
- T3 : Tahanan panas dari lapisan terluar/serving (K.m/W)
- T4 : Tahanan panas sekeliling kabel (K.m/W)
- R : Tahanan AC dari konduktor saat pengoperasian pada temperature maksimal (°/m)
- λ_1, λ_2 : Perbandingan total rugi-rugi daya pada sheath dan armor
- n : Jumlah inti kabel

Adapun pada tahun 1957 Jack Neher dan Martin McGrath menerbitkan tulisan ilmiah yang berisi metode perhitungan kemampuan hantaran arus pada kabel. Pada tahun 1995 IEEE merevisi dan menerbitkan sebuah buku yang dikenal dengan istilah *black book* yang berisi tabel mengenai kemampuan hantaran kabel yang dihitung berdasarkan teori dari Jack Neher dan Martin McGrath. Teori dasar mengenai perpindahan panas pada saat kondisi *steady state* sama dengan hukum Ohm dimana perpindahan panas arahnya beragam seperti suhu dan berbanding terbalik dengan resistansi termal

$$I = \sqrt{\frac{T_C - T_A - \Delta T_D}{R_{el} \times R_{th}}} \times 10^{-3} \dots \dots \dots (9)$$

dimana:

- I = Kemampuan Hantaran Arus pada kabel (A)
- T_C = Suhu maksimal yang diperbolehkan pada konduktor (°C)
- T_A = Suhu tanah disekitar kabel (°C)
- ΔT_D = Kenaikan suhu akibat rugi-rugi dielektrik (°C)
- R_{el} = Resistansi elektrik konduktor pada T_C (Ω /ft)
- R_{th} = Resistansi termal dari konduktor ke lingkungan (Ω /ft)

2.11. Metode Elemen Hingga

Untuk menganalisa kondisi termal pada kabel bawah tanah maka perlu dilakukan simulasi persebaran panas pada kabel dan daerah disekitarnya. Simulasi dilakukan menggunakan Matlab, basis metode yang digunakan adalah Metode Elemen Hingga atau FEM (*Finite Element Method*). Prinsip dasar dari metode elemen hingga adalah proses diskritisasi. Dalam proses diskretisasi, suatu benda

atau daerah yang dianalisis dibagi kedalam bentuk *mesh* (kumpulan elemen) yang saling terhubung, dan kemudian dimodelkan kedalam bentuk satu, dua atau tiga dimensi.

Analisis penyelesaian FEM dapat dibagi menjadi dua, yaitu (P.B Kosasih, 2012). :

1. Analisis struktur digunakan untuk menganalisis tegangan pada struktur rangka, getaran, *buckling*.
2. Analisis non-struktur. Analisis non-struktur digunakan untuk menganalisis kejadian transfer panas, aliran fluida, distribusi dari potensial medan magnet dan medan listrik.

Dalam tugas akhir ini analisis yang digunakan untuk mensimulasikan distribusi panas pada kabel bawah tanah adalah analisis non-struktur.

FEM (*Finite Element Method*) adalah sebuah metode numerik yang digunakan untuk melakukan pendekatan perhitungan medan listrik ataupun temperatur pada suatu objek dengan proses diskritisasi. Untuk memulai pemodelan numerik terhadap sebuah objek, maka terlebih dahulu dilakukan pemodelan secara fisik dari objek tersebut. Setelah melakukan pemodelan, maka dilakukan langkah langkah selanjutnya yaitu (P.B Kosasih, 2012) :

1. Proses Diskritisasi

Diskritisasi adalah proses membagi benda dalam bagian kecil secara keseluruhan dan masih memiliki sifat yang sama dengan benda yang utuh sebelum terbagi dalam bagian yang kecil. Bagian kecil ini memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana yang disebut elemen.

2. Penentuan Bentuk Fungsi Aproksimasi

Jenis-jenis fungsi yang sering digunakan adalah fungsi linier, fungsi kuadrat, fungsi kubik atau fungsi polinomial. Fungsi interpolasi yang digunakan bergantung pada jenis elemen yang ditetapkan.

3. Penentuan Sistem Koordinat

Sistem koordinat digunakan untuk menentukan letak suatu titik/node dalam suatu space. Dalam metode elemen hingga sering dipakai istilah atau sebutan koordinat lokal, koordinat global dan koordinat natural.

4. Perhitungan Properti Elemen

Fungsi interpolasi yang telah ditentukan kemudian disubstitusi kembali pada persamaan-persamaan diferensial dan diproses guna mendapatkan sistem persamaan linier atau sistem matriks yang merupakan properti dari elemen terkait.

5. Pembentukan Sistem Persamaan Linier

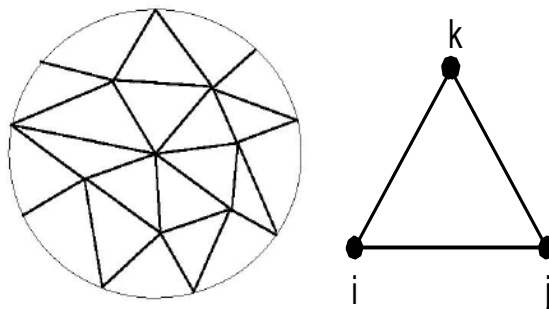
Matriks-matriks elemen yang terbentuk kemudian digabungkan menjadi matriks global. Ukuran matriks elemen adalah jumlah node per elemen dikalikan jumlah degree of freedom (dof) setiap node.

6. Menyelesaikan Persamaan Sistem

Sistem global yang terbentuk pada tahap sebelumnya dapat berupa sistem persamaan linier atau sistem persamaan non linier. Jika sistem yang terbentuk berupa sistem persamaan linier, teknik-teknik umum untuk menyelesaikan sistem dapat digunakan.

7. Post process hasil

Setelah solusi diperoleh pada tahap sebelumnya, hasil dapat ditampilkan berupa grafik kontur atau plot. Jika ada parameter lain yang bergantung pada hasil maka parameter ini akan dihitung setelah hasil diperoleh.



Gambar 8 Diskritisasi elemen segitiga (Sumber : Salama Manjang, 2006)

Diskritisasi elemen segitiga dapat dilihat pada Gambar 8 dan persamaan diferensial yang diterapkan pada distribusi temperatur pada kondisi tunak dan transien adalah:

$$-\nabla(k\nabla T) = Q + h(T_{ext} - T) \dots \dots \dots (10)$$

$$\rho C \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot (k\nabla T) = Q + h(T_{ext} - T) \dots \dots \dots (11)$$

Dimana:

- T_{ext} = suhu eksternal ($^{\circ}\text{K}$)
 T = suhu Konduktor ($^{\circ}\text{K}$)
 k = konduktivitas Panas ($\text{W/m} \cdot ^{\circ}\text{K}$)
 h = Perpindahan Panas Konveksi
 Q = Sumber Panas
 C = Panas Spesifik ($\text{J/m}^3 \cdot ^{\circ}\text{K}$)
 ρ = Massa Spesifik (Kg/m)
 t = waktu

Perhitungan sumber panas untuk konduktor tembaga (Q) menggunakan persamaan:

$$Q = I^2 \times R_{DC} \dots \dots \dots (12)$$

$$R_{DC} = \frac{1.02 \times 10^6 \times \rho_{20}}{S} (1 + \alpha_{20} [\theta - 20]) \dots \dots \dots (13)$$

Dimana :

- Q = Sumber Panas (Watt/m)
 R_{DC} = Resistansi DC (Ohm/m)
 ρ_{20} = Resistivitas termal tembaga pada 20° (Ω/m)
 α_{20} = Koefisien termal tembaga pada 20° ($1/^{\circ}\text{C}$)
 S = *Cross section area* konduktor (mm^2)

2.12. Program Matlab

Matlab (*Matrix Laboratory*) adalah bahasa pemrograman komputer generasi keempat yang dapat digunakan untuk mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan pemrograman seperti seperti notasi matematika rumit. Matlab juga dikenal sebagai salah satu sistem interaktif yang elemen data dasarnya adalah array dan tidak memerlukan dimensi. Matlab memungkinkan untuk manipulasi matriks, pem-plot-an fungsi dan data, implementasi algoritma, pembuatan antarmuka pengguna, peng-antarmuka-an dengan program dalam bahasa lainnya. (Mochammad Ariyanto, 2011).

Adapun karakteristik dari Matlab itu sendiri adalah sebagai berikut :

1. Bahasa pemrogramannya berdasarkan pada matriks.
2. Tersedia banyak *toolbox* untuk aplikasi-aplikasi khusus seperti, *simulink*, *neural network*, *state flow*, *data acquisition toolbox*, *communications*

blockset, fuzzy logic toolbox, image acquisition toolbox, signal processing blockset, dan lain-lain.

3. Tidak harus mendeklarasikan array terlebih dahulu dalam bahasa pemrogramannya.
4. Dibandingkan dengan pemrograman tradisional seperti Fortran dan C, Matlab memiliki waktu pengembangan program yang lebih cepat.

Berikut adalah langkah-langkah dasar yang perlu diketahui saat menggunakan program Matlab :

- a. Penunjuk *command prompt* “>>”

Untuk memulai menulis kode Matlab diawali dengan mengklik pada penunjuk *command prompt*.

- b. Tombol “*enter*”

Untuk selesai penulisan kode digunakan tekan “*enter*” menjalankan program (*run*).

- c. Tanda koma “,”

Digunakan sebagai pemisah dalam penulisan beberapa kode perintah dalam satu baris kode.

- d. Koreksi otomatis

Digunakan untuk melakukan koreksi kode saat terjadi kesalahan ketik dan dapat mengulang eksekusi perintah tersebut.

- e. Memanggil kode sebelumnya ↓ ↑

Digunakan untuk mengambil ulang kode yang telah dieksekusi sebelumnya dengan menggunakan tombol ke arah atas dan ke arah bawah.

- f. Memenggal kode yang panjang (...)

Digunakan apabila kode perintah terlalu panjang dan dapat ditulis di baris setelahnya. Ini dapat dilakukan dengan menulis tiga titik pada baris sebelumnya.

2.13. TOOLBOX PERSAMAAN DIFERENSIAL PARSIAL (PDE)

Toolbox persamaan diferensial parsial (PDE) merupakan salah satu *toolbox* dari MATLAB yang memberikan kemudahan untuk menyelesaikan persamaan

diferensial parsial. Persamaan diferensial parsial didiskritkan di dalam Metode Elemen Hingga (FEM).

Adapun fungsi-fungsi *toolbox* PDE adalah :

- Mendefinisikan suatu masalah PDE dengan menggambarkan daerah 2-D, menentukan syarat batas, dan menentukan koefisien PDE.
- Menyelesaikan suatu masalah PDE dengan menghasilkan mesh atau mata jaring yang tidak terstruktur dan dengan mendiskritkan persamaan-persamaan diferensial parsial sehingga menghasilkan suatu penyelesaian yang mendekati.
- Menvisualisasikan hasilnya.

Toolbox PDE juga dapat digunakan untuk menyelesaikan beberapa masalah pada aplikasi-aplikasi dibawah ini :

- Mekanika struktural – Plane stress
- Mekanika struktural – Plane strain
- Elektrostatik
- Magnet statik
- Daya elektromagnetik AC
- Media konduktif DC
- Perpindahan panas
- Difusi

2.13.1. Implementasi

Persamaan ellips dan persamaan parabola digunakan untuk :

- Perpindahan panas stabil dan tidak stabil didalam benda padat
- Aliran difusi dan media penyerapan
- Elektrostatis pada media dielektrik dan media konduktif
- Aliran potensial

Persamaan hiperbola digunakan untuk :

- Perambatan gelombang harmonis dan transient dalam bentuk gelombang suara dan medan listrik.
- Gerak transversal dari selaput

Masalah nilai eigen digunakan untuk :

- Menentukan getaran statis alami dalam selaput dan permasalahan mekanika struktural

2.13.2. Mendefinisikan Suatu Masalah PDE

Ada tiga mode atau langkah-langkah yang berbeda yang digunakan untuk mendefinisikan suatu masalah PDE, yaitu :

1. Mode *Draw*, yaitu mode untuk menggambarkan bentuk geometris (segiempat, lingkaran, ellips, atau poligon)
2. Mode *Boundary*, yaitu mode untuk menentukan syarat batas.
3. Mode PDE, menentukan secara interaktif jenis PDE dan koefisien c , a , f , dan d . Koefisien c , a , f , dan d ditentukan untuk masing-masing subdomain secara bebas.

2.13.3. Penyelesaian Masalah PDE

Ada dua mode utama yang digunakan untuk menyelesaikan masalah PDE :

1. Mode *Mesh*, mode untuk menghasilkan mesh segitiga dan mengontrol parameter mesh secara otomatis
2. Mode *Solve*, untuk masalah ellips, penyelesaian non linier dapat dikontrol. Untuk masalah parabolik dan hiperbolik dengan menentukan nilai awal untuk menghasilkan keluaran. Untuk penyelesaian nilai eigen dengan menentukan interval untuk mencari nilai eigen.

2.13.4. Simulasi

Dari GUI, kita dapat menggunakan mode plot pada *pdetool* untuk membuat simulasi. 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.