

**ANALISIS INTERFERENSI ELEKTROMAGNETIK DARI KABEL
DAYA PADA MOBIL LISTRIK**

(SKRIPSI)

Oleh

**MUH. NUR AQILLA INZAGHI
1915031053**



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

**ANALISIS INTERFERENSI ELEKTROMAGNETIK DARI KABEL
DAYA PADA MOBIL LISTRIK**

Oleh

**MUH. NUR AQILLA INZAGHI
1915031053**

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK
ANALISIS INTERFERENSI ELEKTROMAGNETIK DARI KABEL DAYA
PADA MOBIL LISTRIK

oleh

MUH. NUR AQILLA INZAGHI

Penelitian ini mengkaji interferensi elektromagnetik yang terjadi pada kabel daya mobil listrik akibat adanya proses pensaklaran yang sangat cepat pada inverter. Jenis interferensi elektromagnetik yang dianalisis adalah pada kopling konduksi dan radiasi. Aspek yang diteliti mencakup pengaruh tegangan sumber, jarak dari kabel daya, serta jenis kabel (berpelindung dan tidak berpelindung) terhadap tingkat interferensi elektromagnetik. Inverter tiga fasa sebagai sumber interferensi disimulasikan menggunakan *LTSpice XVII*, sedangkan interferensi elektromagnetik pada kabel daya disimulasikan menggunakan *CST Studio Suite 2019*. Simulasi pada *CST Studio Suite 2019* untuk menghitung tegangan *common mode* pada kopling konduksi, serta medan listrik (E) dan medan magnet (H) pada kopling radiasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kabel berpelindung memiliki tegangan *common mode* yang lebih rendah sebesar 55,63 μV dibandingkan dengan kabel tidak berpelindung sebesar 163,74 μV dengan tegangan input sebesar 400V. Medan listrik dan medan magnet mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak dari kabel. Medan listrik dengan nilai tertinggi tercatat pada jarak 20 cm, yaitu 7,10 mV/m untuk kabel berpelindung dan 18,73 mV/m untuk kabel tidak berpelindung pada tegangan 400 V. Medan magnet dengan nilai tertinggi tercatat pada jarak 10 cm, yaitu 25,21 mA/m untuk kabel berpelindung dan 39,23 mA/m untuk kabel tak berpelindung pada tegangan 400 V. Tegangan sumber memiliki pengaruh yang signifikan terhadap interferensi elektromagnetik, di mana peningkatan tegangan dari 400 V menjadi 800 V menyebabkan tegangan *common mode*, medan listrik, dan medan magnet meningkat hampir dua kali lipat. Jenis kabel juga mempengaruhi tingkat interferensi, di mana kabel berpelindung menghasilkan interferensi yang lebih kecil dibandingkan kabel tidak berpelindung.

KATA KUNCI — Interferensi Elektromagnetik, Kabel Daya, Mobil Listrik, Tegangan *Common Mode*.

ABSTRACT**ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE FROM ELECTRIC
POWER CABLES IN ELECTRIC VEHICLES***by***MUH. NUR AQILLA INZAGHI**

This research studies electromagnetic interference that occurs in electric vehicle power cables due to the very fast switching process in the inverter. The types of electromagnetic interference analyzed are conduction and radiation coupling. The study includes the effect of source voltage, distance from the power cable, and cable type (shielded and unshielded) on the electromagnetic interference level. The three-phase inverter as the interference source was simulated using LT Spice XVII, while the electromagnetic interference on the power cable was simulated using CST Studio Suite 2019. Simulations on CST Studio Suite 2019 to calculate the common mode voltage at the conduction coupling, as well as the electric field (E) and magnetic field (H) at the radiation coupling. The simulation results show that the shielded cable has a lower common mode voltage of 55.63 μV compared to the unshielded cable of 163.74 μV with an input voltage of 400V. The electric field and magnetic field decreased as the distance from the cable increased. The highest electric field at input voltage 400 V is 7.10 mV/m and 18.73 mV/m for the shielded cable and the unshielded cable respectively at a distance of 20 cm. Whereas, the highest magnetic field is 25.21 mA/m for the shielded cable and 39.23 mA/m for the unshielded cable at a distance of 10 cm. The input voltage has a significant influence on electromagnetic interference, which increases the voltage from 400 V to 800 V, causing the common mode voltage, electric field, and magnetic field to double. The cable type also affects the level of interference, where shielded cables produce less interference than unshielded cables.

KEYWORDS—*Electromagnetic Interference, Power Cable, Electric Vehicle, Common Mode Voltage*

Judul Skripsi : **ANALISIS INTERFERENSI
ELEKTROMAGNETIK DARI KABEL DAYA
PADA MOBIL LISTRIK**

Nama Mahasiswa : **MUH. NUR AQILLA INZAGHI**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1915031053**

Program Studi : **Teknik Elektro**

Fakultas : **Teknik**



MENYETUJUI

1. **Komisi Pembimbing**

Pembimbing Pendamping

Herman Halomoan S, S.T.,M.T., Ph.D.
NIP. 197111301999031003

Pembimbing Utama

Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T.
NIP. 197005281998032003

MENGETAHUI

1. **Jurusan Teknik Elektro**

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Sumadi, S.T., M.T.
NIP. 197311042000031001

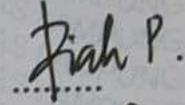
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Herlinawati, S.T.,M.T.
NIP. 197103141999032001

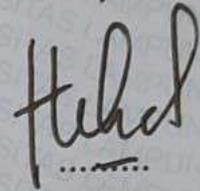
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

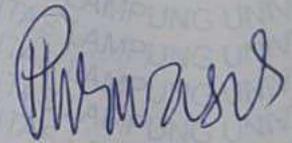
Ketua : **Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T.**



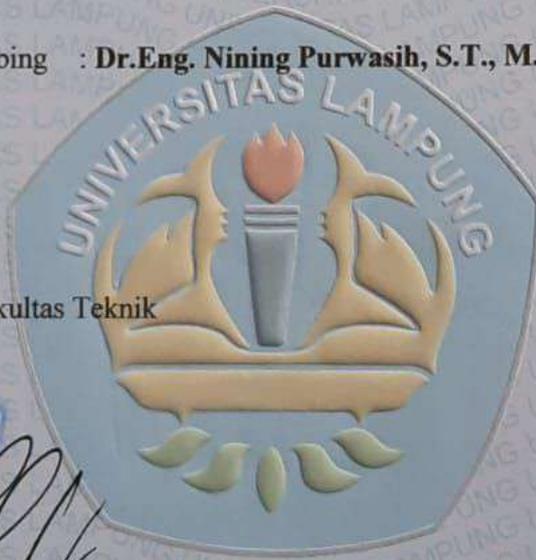
Sekretaris : **Dr. Herman Halomoan S, S.T.,M.T.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr.Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. 
NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **28 Oktober 2024**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan dibawah ini, menyatakan bahwa skripsi saya dengan judul “Analisis Interferensi Elektromagnetik dari Kabel Daya pada Mobil Listrik” dibuat oleh saya sendiri. Semua hasil yang tertuang dala skripsi ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa skripsi ini merupakan salinan atau dibuat oleh pihak lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan hukum atau akademik yang berlaku.

Bandarlampung, 24 November 2024

Pembuat Pernyataan,



Muh. Nur Aqilla Inzaghi
NPM 1915031053

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 6 Mei 2001. Putra pertama dari dua bersaudara, dari Bapak Nurkholis dan Ibu Sofi Triyana. Pendidikan formal yang pernah diselesaikan oleh penulis adalah SDN 2 Beringin Raya-Bandar Lampung pada tahun 2013. SMPN 1 Ngoro-Jombang-Jawa Timur pada tahun 2016. SMAN 7 Bandar Lampung pada tahun 2019. Penulis terdaftar

sebagai Mahasiswa Program Studi Strata 1 Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam beberapa kegiatan sebagai berikut:

1. Menjadi anggota biasa Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Lampung, Departemen Pengembangan Keteknikan, Divisi Penelitian dan Pengembangan Keteknikan periode 2019/2020 hingga periode 2020/2021.
2. Menjadi Ketua Pelaksana pada acara *Electrical Engineering in Action* pada tahun 2021.
3. Menjadi anggota *Non-Governmental Organization : Wawai Waste Foundation* Divisi *Waste Ranger* pada tahun 2021
4. Melaksanakan Kuliah Kerja Nyata di Desa Rajabasa Raya, Kecamatan Rajabasa, Kota Bandar Lampung pada bulan Januari 2022 sampai dengan Februari 2022.
5. Mengikuti program Magang Bersertifikat Kampus Merdeka dari Kementerian Pendidikan dan Budaya sebagai *Mechanical, Electrical and Plumbing* di PT. Takenaka Indonesia pada tahun 2022

**atas ridho ALLAH dan NABI
MUHAMMAD**

**skripsi
ini**

**untuk ibu,
ayah, adik,
teman-teman,
kampus, &
negara.**

MUH. NUR AQILLA INZAGHI

●●●

demasi masa, sesungguhnya
manusia itu benar-benar
berada dalam kerugian,
kecuali orang-orang yang
beriman dan mengerjakan
amal shalih serta saling
menasihati untuk
kebenaran dan saling
menasihati untuk
kesabaran. (Q.S. 103 : 1-3)

●●●

SANWACANA

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan karunia serta ridha-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi / tugas akhir ini dengan judul “Analisis Interferensi Elektromagnetik dari Kabel daya pada Mobil Listrik”. Tak lupa shalawat serta salam dihaturkan kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarganya, sahabatnya, dan para pengikutnya yakni kaum muslim di seluruh dunia.

Penelitian ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan kurikulum mata kuliah Skripsi pada Program Studi Strata 1 Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Dalam pelaksanaan dan pembuatan Skripsi / Tugas Akhir ini penulis menerima dukungan baik secara moril maupun materil yang sangat berharga dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu, khususnya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, DEA., IPM, selaku Rektor Universitas Lampung
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
4. Bapak Sumadi, S.T.,M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Informatika Universitas Lampung dan telah membantu proses kelancaran pengerjaan penelitian.

5. Bapak Syaiful Alam, S.T., M.T., selaku Pembimbing Akademik penelitian yang selalu meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan dukungan selama perkuliahan disetiap semester.
6. Ibu Dr. Eng., Diah Permata, S.T., M.T. selaku Pembimbing Utama yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberikan pengarahan dan bimbingan dalam mengerjakan penelitian hingga selesai.
7. Bapak Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T. selaku Pembimbing Pendamping yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberikan pengarahan dan bimbingan dalam pembuatan skripsi ini hingga selesai.
8. Ibu Dr. Eng., Nining Purwasih, S.T., M.T. selaku Penguji yang telah memberikan nasihat, arahan, saran, dan motivasi kepada penulis.
9. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Elektro yang telah membagikan ilmunya kepada penulis.
10. Ibu Nurul Maulid dan Segenap Staff di Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik yang telah sangat membantu penulis baik dalam hal administrasi dan hal-hal lainnya.
11. Kedua orang tua yang paling berjasa dalam hidup saya, Ibu Sofi Triyana dan Bapak Nurkholis yang sangat penulis cintai dan sayangi yang telah memberikan segenap do'a, dukungan, nasihat, semangat, serta pengorbanannya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
12. Kepada saudara perempuan saya, Qinthara Shafa Khalisa, Terimakasih atas segala do'a dan dukungan yang telah diberikan selama perkuliahan ini.
13. Sahabat-sahabat penulis dan seluruh teman-teman ETERNITY, Teknik Elektro Angkatan 2019, atas dukungan yang telah diberikan selama menempuh studi di Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
14. Seluruh pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro, terutama untuk pengurus pada periode 2020/2021, atas kesempatannya dalam pengalaman berorganisasi yang sangat bermanfaat bagi penulis.
15. Seluruh teman-teman panitia program kerja *Electrical Engineering in Action* tahun 2021 atas perjuangannya hingga akhir dalam menyukseskan acara tersebut yang merupakan salah satu pengalaman baik bagi penulis.

16. Kepada Bendahara Pelaksana *Electrical Engineering in Action* 2021 terimakasih telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan semangat agar terus maju tanpa kenal kata menyerah. Semoga terus menjadi “dua belas”-ku.
17. Segenap pengurus Laboratorium Sistem Tenaga Listrik Universitas Lampung, Pak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium, Pak Abdurachman Effendi S.T., M.Ti. selaku PLP Laboratorium, dan Pengurus Laboratorium angkatan 2018, 2019, serta 2020. Semoga senantiasa diberikan kesuksesan.
18. Segenap pengurus Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Lampung, Pak Dr. Herman H. Sinaga, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium, Pak Sugiarto S.T. selaku PLP Laboratorium, dan Pengurus Laboratorium angkatan 2018, 2019, serta 2020 atas bantuannya untuk bisa menyelesaikan tugas akhir ini. Semoga senantiasa diberikan kesuksesan.
19. Kepada seluruh pihak lainnya, yang belum bisa disebutkan disini, atas bantuan ilmu, materi, dan sebagainya. Semoga senantiasa diberi kebaikan yang berlimpah.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan penelitian ini masih bisa disempurnakan kembali. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun dari para pembaca. Penulis berharap laporan skripsi ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Bandar Lampung, 24 November 2024



Muh. Nur Aqilla Inzaghi
NPM.1915031053

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	ii
ABSTRAK	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
SURAT PERNYATAAN.....	vii
RIWAYAT HIDUP.....	viii
HALAMAN PERSEMBAHAN	ix
HALAMAN MOTTO	x
SANWACANA.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL.....	xviii
I. PENDAHULUAN	19
1.1 Latar Belakang	19
1.2 Rumusan Masalah	21
1.3 Tujuan.....	21
1.4 Batasan Masalah.....	21
1.5 Manfaat Penelitian.....	22
1.6 Sistematika Penulisan.....	22
II. TINJAUAN PUSTAKA	24
2.1 Gelombang Elektromagnetik.....	24
2.2 Interferensi Elektromagnetik.....	25
2.3 Interferensi Elektromagnetik pada Mobil Listrik.....	30
2.4 Instrumen Pengujian/Simulasi.....	32

III.	METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	35
3.2	Alat dan Bahan	35
3.3	Metode Penelitian.....	36
IV.	ANALISIS DATA HASIL DAN PEMBAHASAN	49
4.1	Data Hasil Simulasi Uji Interferensi Elektromagnetik.....	49
4.1.1.	Simulasi Interferensi Elektromagnetik secara Konduksi.....	49
4.1.2.	Simulasi Interferensi Elektromagnetik secara Radiasi.....	54
4.2	Analisis dan Pembahasan Data Hasil	62
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1	Kesimpulan.....	69
5.2	Saran.....	71
	DAFTAR PUSTAKA	72
	LAMPIRAN.....	74

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Gelombang elektromagnetik[2].....	24
Gambar 2.2. Proses Interferensi Elektromagnetik	25
Gambar 2.6. Komponen mobil listrik	30
Gambar 2.7. (a) Karakteristik V-I pada <i>hard switching</i> [7], (b) Respon tegangan transien	31
Gambar 2.8. Tampilan Antarmuka LTSpice XVII	33
Gambar 2.9. Tampilan Antarmuka CST <i>Studio Suite</i> 2019.....	34
Gambar 3.1. Tampilan saat penyusunan komponen	37
Gambar 3.2. Tampilan saat pengaturan nilai komponen.....	37
Gambar 3.5. Gelombang hasil keluaran inverter tiga fasa : (a) 400 V; (b) 800V .	39
Gambar 3.7. Rangkaian simulasi kabel daya berpelingdung	41
Gambar 3.8. Potongan kabel daya tak berpelingdung.....	41
Gambar 3.9. Rangkaian simulasi kabel daya tak berpelingdung	42
Gambar 3.10. Tampilan model tiga dimensi.....	42
Gambar 3.11. Tampilan pendefinisian kabel	43
Gambar 3.13. Tampilan pendefinisian sinyal eksitasi	44
Gambar 3.14. Tampilan <i>import</i> sinyal eksitasi	44
Gambar 3.15. Model simulasi interferensi elektromagnetik secara konduksi pada kabel berpelingdung	45
Gambar 3.16. Model simulasi interferensi elektromagnetik secara konduksi pada kabel tak berpelingdung	46
Gambar 3.17. Tampilan letak <i>victim</i> saat uji radiasi EMI.....	46
Gambar 3.18. Rangkaian uji radiasi EMI (a) kabel berpelingdung (b) kabel tak berpelingdung.....	47
Gambar 4.1. Hasil uji EMI pada kabel berpelingdung saat tegangan sumber 400 V	50
Gambar 4.2. Hasil uji EMI pada kabel berpelingdung saat tegangan sumber 800 V	51

Gambar 4.3. Hasil uji EMI pada kabel tak berpelindung saat tegangan sumber sebesar 400 V	52
Gambar 4.4. Hasil uji EMI pada kabel tak berpelindung saat tegangan sumber sebesar 800 V	53
Gambar 4.5. Medan listrik pada kabel berpelindung saat tegangan sumber 400 V	54
Gambar 4.7. Medan magnet pada kabel berpelindung saat tegangan sumber 400 V	56
Gambar 4.9. Medan listrik pada kabel tak berpelindung saat tegangan sumber sebesar 400 V	58
Gambar 4.11. Medan magnet pada kabel tak berpelindung saat tegangan sumber sebesar 400 V	60
Gambar 4.12. Medan magnet pada kabel tak berpelindung saat tegangan sumber sebesar 800 V	61
Gambar 4.13. Perbandingan hasil interferensi akibat impedansi bersama pada kabel berpelindung dan tak berpelindung	63
Gambar 4.14. Perbandingan besaran medan listrik antara kabel berpelindung dan kabel tak berpelindung	64
Gambar 4.15. Perbandingan besaran medan magnet antara kabel berpelindung dan kabel tak berpelindung	66
Gambar 4.16. Perbandingan besaran medan listrik antara kedua jenis kabel dari hasil simulasi dan perhitungan	67
Gambar 4.17. Perbandingan besaran medan magnet antara kedua jenis kabel dari hasil simulasi dan perhitungan	68

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1. Jadwal Penelitian.....	35
Tabel 4.1. Hasil simulasi interferensi elektromagnetik secara konduksi	62
Tabel 4.2. Medan listrik hasil simulasi interferensi elektromagnetik secara radiasi	63
Tabel 4.3. Medan magnet hasil simulasi interferensi elektromagnetik secara radiasi	65

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kendaraan listrik merupakan sarana transportasi yang dapat memenuhi kebutuhan mobilitas masyarakat dan ramah lingkungan karena tidak memiliki polusi dan sebagainya. Hal ini disambut baik oleh pemerintah Indonesia dengan mengeluarkan Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 55 Tahun 2019 tentang percepatan program kendaraan listrik berbasis baterai untuk transportasi jalan. Secara umum sistem kelistrikan pada kendaraan listrik terutama mobil listrik terdiri dari paket baterai, inverter daya, motor listrik, dan kabel sebagai penghubung setiap komponen. Komponen Motor pada mobil listrik bekerja menggunakan listrik arus bolak balik. Penggunaan inverter sebagai alat konversi listrik arus searah menjadi listrik arus bolak-balik menghasilkan gelombang elektromagnetik yang diakibatkan oleh adanya proses *switching* komponen elektronika daya yaitu MosFET atau IGBT pada frekuensi tinggi.

Berdasarkan hukum Maxwell, proses *switching* yang cepat dalam medan listrik akan menghasilkan medan magnet yang dapat menghasilkan gelombang elektromagnetik dan kemudian merambat menuju komponen lainnya. Gelombang elektromagnetik yang dihasilkan ini memiliki rentang frekuensi yang cukup luas, hal ini dapat memicu adanya interferensi gelombang elektromagnetik terhadap komponen sistem kelistrikan lainnya. Interferensi dapat terkopling ke komponen lain melalui *crosstalk* secara konduksi dan menjalar ke komponen lain secara radiasi atau terpancar[1].

Tegangan arus bolak balik disuplai dari inverter ke motor melalui kabel daya. Walaupun kabel berpelindung digunakan namun interferensi elektromagnetik tidak bisa dihilangkan sama sekali. Interferensi elektromagnetik dapat menjalar secara konduksi dan radiasi dari kabel daya. Salah satu dampak interferensi medan elektromagnetik yakni dapat menyebabkan gangguan pada komponen pencatu daya. Selain itu radiasi interferensi pada frekuensi tinggi dapat mengganggu sistem navigasi pada mobil listrik yang umumnya bekerja secara otomatis. Berdasarkan hal tersebut, perlu dilakukan analisis efek interferensi elektromagnetik yang dihasilkan dari tegangan dan arus luaran inverter. Salah satu cara yang digunakan untuk menganalisa radiasi interferensi elektromagnetik pada kendaraan listrik yakni dengan melakukan simulasi.

Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis besar interferensi elektromagnetik pada kabel daya inverter tiga fasa untuk mobil listrik menggunakan simulasi. Interferensi elektromagnetik menjalar dari sumber ke korban (*victim*) melalui lintasan kopling. Ada dua jenis kopling yang disimulasikan dalam penelitian ini yaitu kopling konduksi dan radiasi. Kopling konduksi terjadi pada dua atau lebih sistem yang menggunakan konduktor yang sama (*common impedance*), umumnya pada jalur pentanahan. Sedangkan pada kopling radiasi interferensi elektromagnetik menjalar tanpa penghantar. Sistem kelistrikan di mobil listrik dimodelkan sesuai dengan penelitian sebelumnya[1] dan disimulasikan menggunakan LTSpice XVII. Parameter yang diukur pada simulasi LTSpice XVII yaitu tegangan dan arus luaran inverter. Tegangan dan arus yang dihasilkan mejadi sumber eksitasi untuk simulasi kabel daya menggunakan CST *Studio Suite* 2019. Hasil simulasi CST *Studio Suite* 2019 berupa tegangan *common mode*, medan listrik (E), dan medan magnet (H).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan dari latar belakang di atas, maka dirumuskan masalah sebagai berikut,

1. Bagaimana hasil simulasi menggunakan CST Studio Suite 2019 dapat menjelaskan perilaku interferensi elektromagnetik pada kabel daya inverter tiga fasa?
2. Apa saja faktor yang mempengaruhi interferensi elektromagnetik yang dihasilkan dari tegangan dan arus luaran inverter pada kabel daya mobil listrik?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Merancang dan melakukan simulasi besar interferensi elektromagnetik dari kabel daya pada kopling konduksi dan radiasi.
2. Menganalisis pengaruh tegangan sumber terhadap besar interferensi elektromagnetik yang dihasilkan baik secara konduksi maupun radiasi.
3. Menganalisis pengaruh jarak ke kabel daya terhadap besar medan magnet dan medan listrik.
4. Menganalisis pengaruh penggunaan jenis kabel (berpelindung dan tak berpelindung) terhadap besar interferensi elektromagnetik yang dihasilkan.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang diterapkan pada penelitian kali ini meliputi beberapa hal, yakni sebagai berikut,

1. Model rangkaian sistem kelistrikan mobil listrik yang digunakan yakni model yang telah dimodifikasi dari kombinasi : literatur [1], *library* LTSpice XVII, dan situs web *GanPower International*.
2. Tidak membahas efek interferensi elektromagnetik terhadap kinerja komponen kelistrikan pada mobil listrik yaitu motor, inverter, dan baterai.
3. Lapisan pelindung (*shielding*) pada kabel berpelindung semuanya diketanahkan.

4. Panjang kabel daya yang disimulasikan pada perangkat lunak CST *Studio Suite* 2019 adalah 0,5 m.
5. Jalur pentanahan dalam simulasi menggunakan kawat berisolasi.
6. Jarak diukur secara vertical dari titik tengah kabel daya ke posisi *field probe*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini terhadap perkembangan teknologi mobil listrik yakni :

1. Mengetahui besar interferensi elektromagnetik berupa tegangan *common mode*, medan listrik (E) dan medan magnet (H).
2. Mengetahui pengaruh besar tegangan sumber terhadap nilai tegangan *common mode*, medan listrik (E) dan medan magnet (H) yang dihasilkan sehingga dapat digunakan untuk memperkirakan besar interferensi saat memilih besar tegangan input.
3. Mengetahui pengaruh jarak terhadap besar medan listrik dan medan magnet sehingga dapat digunakan untuk menentukan jarak yang aman.
4. Mengetahui pengaruh jenis kabel besar terhadap besar tegangan *common mode*, medan listrik (E) dan medan magnet (H).

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan akhir bertujuan supaya memberikan suatu gambaran secara sederhana terkait pembahasan yang ada di dalam tugas akhir skripsi serta untuk memudahkan dalam memahami isi yang disajikan dalam skripsi ini. Adapun sistematika yang digunakan oleh penulis adalah sebagai berikut,

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini berisikan latar belakang dan masalah, tujuan penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian, hipotesis, dan sistematika penelitian.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan teori pendukung materi tugas akhir yang merupakan pengantar dalam pemahaman terkait materi tugas akhir yang dikutip dari berbagai sumber

ilmiah, seperti jurnal, proseding, dan buku yang digunakan sebagai panduan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.

BAB III. METODE PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang waktu dan tempat penelitian tugas akhir, alat dan bahan yang digunakan dalam menyelesaikan tugas akhir ini, metode yang digunakan, dan pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan tugas akhir.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan tentang hasil dan pembahasan data simulasi dan memaparkan data yang didapat dari tugas akhir ini.

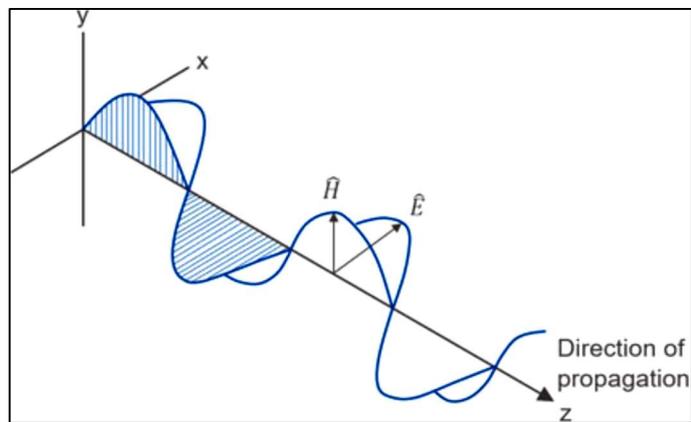
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan tentang kesimpulan yang diperoleh dari pembahasan pada laporan tugas akhir dan saran yang berhubungan dengan pokok-pokok pembahasan pada tugas akhir ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik merupakan salah satu jenis gelombang yang terjadi akibat adanya peristiwa osilasi pada medan listrik dan medan magnet[2]. Berbeda dengan gelombang bunyi dan gelombang lainnya, gelombang ini memiliki karakteristik yaitu medan listrik dan medan magnet akan selalu saling tegak lurus dan memiliki arah propagasi yang sama. Kedua medan ini akan selalu dalam nilai fasa yang sama. Gelombang elektromagnetik dapat dihasilkan oleh muatan listrik yang bergerak dan mengalami percepatan.



Gambar 2.1. Gelombang elektromagnetik[2]

Muatan listrik yang diam hanya menghasilkan medan listrik. Ketika muatan listrik tersebut bergerak dan mengalami percepatan, maka muatan tersebut tidak hanya menghasilkan medan listrik, tetapi juga menghasilkan medan magnet. Hal ini berdasarkan pada hukum *Ampere-Maxwell* bahwa medan listrik yang berubah atau berosilasi dapat menghasilkan medan magnet. Sehingga muatan listrik yang diam atau bergerak tanpa dipercepat (konstan) tidak dapat menghasilkan gelombang elektromagnetik secara signifikan. Selain itu, gelombang elektromagnetik

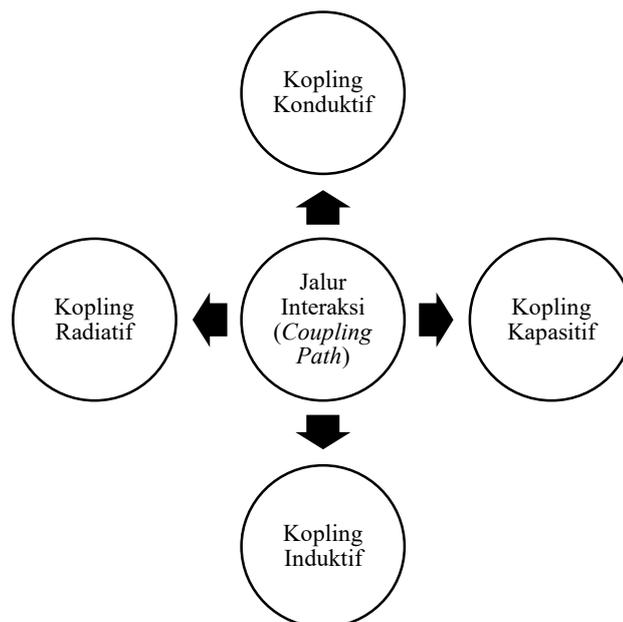
memiliki beberapa karakteristik sifat gelombang. Salah satu sifat gelombang tersebut adalah gelombang ini dapat mengalami pemantulan, pembiasan, difraksi, dan interferensi.

2.2 Interferensi Elektromagnetik



Gambar 2.2. Proses Interferensi Elektromagnetik

Interferensi Elektromagnetik merupakan gangguan yang dihasilkan oleh salah satu peralatan sebagai sumber gangguan yang mempengaruhi peralatan lainnya yang berada di sekitar peralatan sumber gangguan[3]. Hal ini menjadi tantangan yang cukup besar untuk mendesain sebuah peralatan elektronik. Interferensi ini mempunyai dampak yang dapat menurunkan kinerja peralatan hingga dapat menghentikannya untuk berfungsi jika terjadi dalam rentang waktu yang lama dan jumlah yang besar, salah satu contoh dampak tersebut yakni terdapat pada hasil penelitian yang dilakukan oleh Li Zhai *et al*[4] menyatakan bahwa interferensi pada inverter mengganggu kinerja baterai. Interferensi Elektromagnetik dapat dihasilkan melalui sumber alami dan buatan. Beberapa contoh peristiwa interferensi elektromagnetik yakni sistem pengapian, jaringan telepon seluler, osilasi pada komponen listrik, petir, dan aurora[5]. Gangguan ini sering mempengaruhi beberapa peralatan listrik lainnya bahkan terhadap manusia disekitarnya.



Gambar 2.3. Kopling derau pada interferensi elektromagnetik

Terlihat pada gambar 2.3, interferensi gelombang elektromagnetik dapat terjadi melalui konduksi atau kabel yang terhubung, melalui radiasi, atau kombinasi dari keduanya. Terdapat tiga komponen yang mempengaruhi terjadinya interferensi elektromagnetik :

1. Sumber/*Source*. Terdapat sumber listrik yang tidak diinginkan dari peralatan elektronik. Ha ini disebut dengan derau elektromagnetik. Komponen ini penyebab awal terjadinya interferensi.
2. Jenis kopling. Komponen ini merupakan cara sinyal listrik itu mengalir menuju *victim*. Perbedaan cara sinyal tersebut melakukan kopling, maka langkah mitigasinya pun berbeda.
3. Penerima/*Victim*. Komponen ini merupakan penerima atau reseptor dari sinyal derau tersebut yang dapat menyebabkan interferensi.

Jenis kopling merupakan komponen yang cukup penting untuk diperhatikan dalam menganalisis interferensi elektromagnetik. Hal ini dikarenakan dengan mengetahui jenis kopling yang terjadi maka dapat diketahui juga cara melakukan mitigasi terhadap permasalahan tersebut. Adapun jenis kopling pada interferensi elektromagnetik adalah sebagai berikut:

1. Kopling Konduktif

Kopling konduktif adalah salah satu cara interferensi elektromagnetik dapat memasuki suatu perangkat atau sistem. Kopling ini terjadi ketika dua atau lebih rangkaian saling berbagi konduktor yang sama sehingga timbul juga impedansi bersama yang dirasakan oleh masing masing rangkaian. Ketika dua sistem saling terhubung melalui konduktor, tegangan dan arus gangguan yang terjadi pada sistem tersebut akan merambat melalui jalur konduktif ke sistem lain[5]. Tegangan dan arus tersebut dapat disebut dengan tegangan dan arus *common mode*. Tegangan dan arus *common mode* mengalir secara bersamaan melalui lebih dari satu konduktor dalam arah yang sama, yakni menuju *ground*.

Tegangan *common mode* adalah tegangan yang terdapat pada dua atau lebih jalur konduktor relatif terhadap *ground*. Tegangan *common mode* dapat dirumuskan sebagai rata-rata dari tegangan pada dua atau lebih konduktor yang relative terhadap *ground*.

$$V_{CM} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

Sedangkan, arus *common mode* adalah arus yang mengalir melalui masing masing konduktor dalam arah yang sama menuju *ground*. Sama halnya dengan tegangan *common mode*, arus *common mode* merupakan rata-rata arus yang mengalir pada dua atau lebih konduktor.

$$i_{CM} = \frac{i_1 + i_2 + i_3}{3}$$

Kemudian untuk menghitung tegangan dan arus *common mode* yang terdapat pada *ground plane*, maka dapat digunakan hukum Ohm.

$$V_{CM} = i_{CM} \times Z_{ground}$$

Adapun langkah mitigasi yang perlu dilakukan untuk mengurangi jenis kopling ini adalah memisahkan arus *loop* dari arus *loop* pada *victim*. Kemudian mengurangi impedansi kopling serendah mungkin, seperti mengurangi induktansi dan resistansi. Selain itu, dapat menambahkan rangkaian filter pada sebelum *victim*.

2. Kopling Induktif

Kopling induktif adalah salah satu cara interferensi elektromagnetik dapat memasuki suatu perangkat atau sistem. Ini terjadi ketika medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh sumber gangguan memotong konduktor dan menginduksi tegangan di dalamnya. Langkah mitigasi yang diperlukan untuk mengatasi kopling jenis ini yaitu dengan mengurangi area arus *loop*, melakukan pemisahan secara spasial, menambahkan material pelindung, dan melakukan perubahan orientasi pada rangkaian.

3. Kopling Kapasitif

Kopling kapasitif adalah salah satu cara interferensi elektromagnetik dapat memasuki suatu perangkat atau sistem. Ini terjadi ketika gangguan elektromagnetik ditransmisikan melalui kapasitansi parasit antara dua konduktor. Berikut ini langkah mitigasi yang dilakukan untuk mencegah jenis kopling ini yakni dengan mengurangi transien dari sumber derau, mengurangi kopling kapasitansi dengan cara menambahkan material pelindung, pemisahan rangkaian, serta merubah orientasinya, dan menambahkan rangkaian filter pada bagian *victim*.

4. Kopling Radiatif/Elektromagnetik

Kopling elektromagnetik adalah salah satu cara interferensi elektromagnetik dapat memasuki suatu perangkat atau sistem. Kopling elektromagnetik terjadi ketika medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh sumber gangguan memotong konduktor dan menginduksi tegangan di dalamnya[3]. Kopling ini terjadi pada jarak yang cukup jauh antara sumber dan *victim*. Oleh karena itu kopling ini terjadi secara radiasi. Berdasarkan literatur mengenai EMI secara radiasi[3], arus *common mode* pada konduktor atau kabel dapat diasumsikan sebagai arus pada antena. Hal ini disebabkan oleh radiasi yang dihasilkan pada *common mode* lebih besar daripada *differential mode*. Dalam menganalisis hal tersebut, medan yang dipancarkan dapat dijelaskan dengan menggunakan komponen medan listrik dan medan magnet. Besar medan listrik yang dirasakan pada titik uji diperkirakan melalui persamaan berikut ini,

$$|E_{C,max}| = 4,19 \times 10^{-7} \frac{|I_{probe}| \cdot f \cdot l}{d}$$

di mana :

I_{probe} adalah arus pada konduktor atau kabel (A)

l adalah panjang konduktor atau kabel (m)

d adalah jarak uji dari kabel (m)

Sedangkan, besar medan magnet yang dirasakan pada titik uji dapat diperkirakan melalui rumus berikut ini,

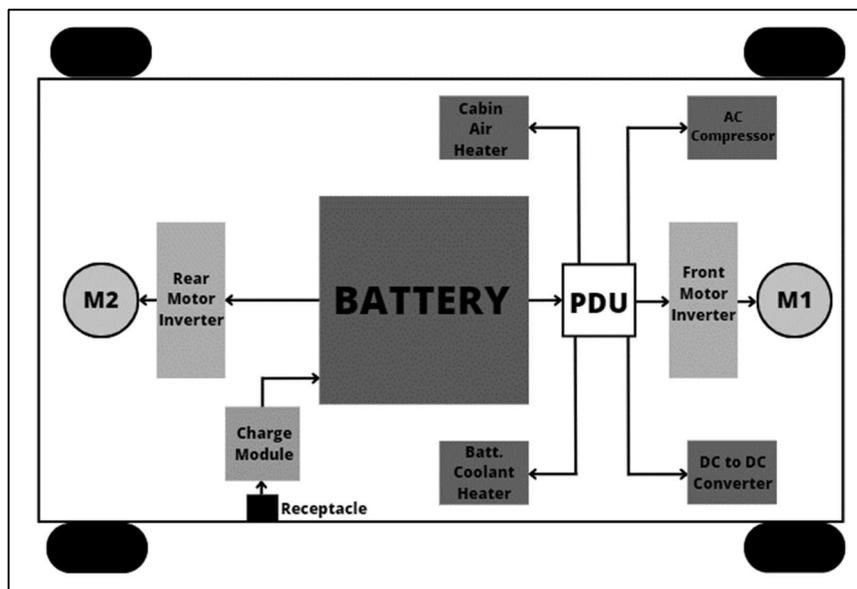
$$|H_{C,max}| = \frac{|E_{C,max}|}{Z_0}$$

di mana Z_0 adalah impedansi intrinsik pada ruang hampa ($Z_0 = 377 \Omega$)

Adapun untuk mencegah kopling ini yakni dengan menambahkan komponen filter seperti *ferrite beads*, kemudian menambahkan material pelindung, serta melakukan pentanahan.

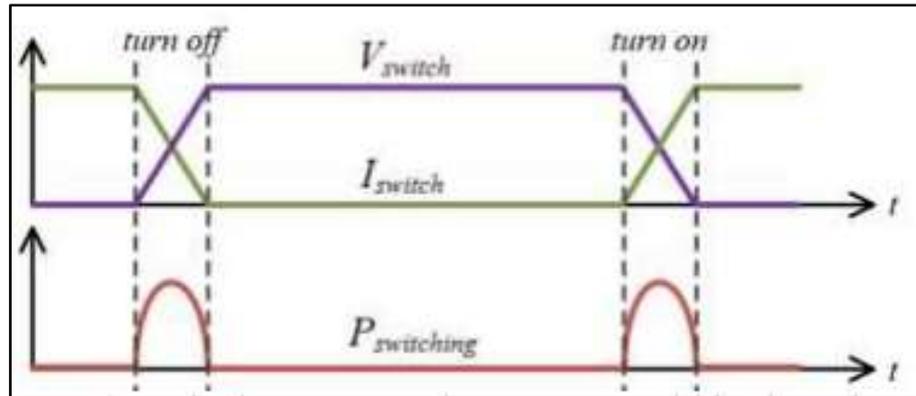
2.3 Interferensi Elektromagnetik pada Mobil Listrik

Mobil listrik merupakan salah satu jenis kendaraan yang menggunakan tenaga listrik sebagai energi utama untuk bergerak. Penggunaan energi listrik ini menjadikan mobil listrik sebagai kendaraan yang ramah lingkungan karena tidak menimbulkan polusi udara dan dapat mengurangi efek rumah kaca [6]. Pada umumnya, komponen utama penggerak pada mobil listrik ada 3 komponen yakni baterai, inverter, dan motor sinkron magnet permanen. Ketiga komponen ini saling terhubung dan tersusun menjadi sebuah sistem utama yang biasa disebut dengan *Motor Drive System*. Akan tetapi, penggunaan inverter pada sistem ini menimbulkan masalah terkait adanya gangguan atau interferensi gelombang elektromagnetik terhadap komponen dan sistem lainnya yang ada di dalam mobil listrik tersebut.

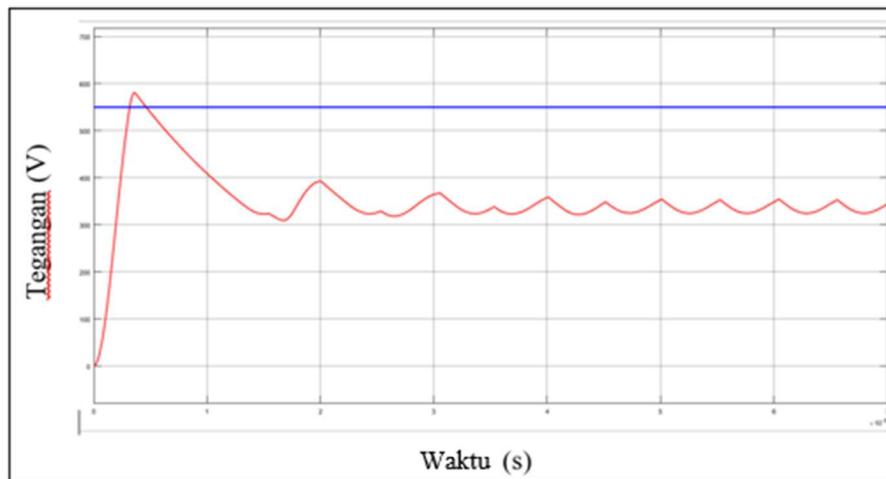


Gambar 2.6. Komponen mobil listrik

Hal ini disebabkan oleh adanya proses *switching* yang terjadi pada cara kerja inverter[7]. Pensaklaran ini dilakukan untuk melakukan *inverting* atau perubahan arus searah menjadi arus bolak-balik. Ketika proses pensaklaran berlangsung, maka terjadi proses buka-tutup yang menyebabkan adanya perubahan yang dapat dikenal dengan tegangan dan arus transien seperti yang tertera pada gambar 2.7.



(a)



(b)

Gambar 2.7. (a) Karakteristik V-I pada *hard switching*[7], (b) Respon tegangan transien

Ketika arus listrik berubah secara cepat dalam sebuah rangkaian, maka medan magnet di sekitarnya juga berubah dengan cepat. Hal ini sesuai dengan hukum Maxwell yang menyatakan bahwa perubahan dalam medan listrik akan menghasilkan medan magnet, dan perubahan dalam medan magnet akan menghasilkan medan listrik. Perubahan medan listrik dan medan magnet secara bersamaan akan menimbulkan medan yang dikenal dengan medan elektromagnetik. Kemudian medan elektromagnetik bergerak dengan merambat melalui jalur konduktif dan radiasi dan terkopling ke sistem lainnya. Sehingga berdasarkan hukum Maxwell, ketika proses *switching* pada inverter, tegangan dan arus yang mengalami perubahan terhadap satuan waktu tersebut bergerak mengalir di dalam konduktor, maka medan elektromagnetik dapat dihasilkan.

Medan ini bergerak terpancar melalui udara dan dapat memengaruhi komponen lain. Ketika hal ini terjadi maka ini dapat disebut dengan interferensi elektromagnetik. Oleh karena itu, inverter dapat dikatakan sebagai sumber interferensi elektromagnetik akibat adanya perubahan tegangan dan arus dari proses *switching* yang mengalir melalui kabel daya. Kemudian kabel daya ini menghasilkan radiasi medan elektromagnetik akibat perubahan tegangan dan arus tersebut sehingga dapat mengganggu komponen penting lainnya seperti baterai, dan motor listrik. [6].

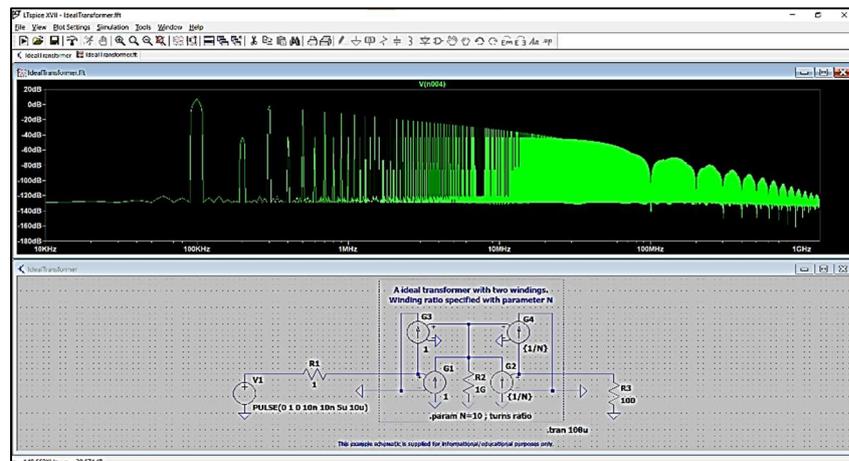
2.4 Instrumen Pengujian/Simulasi

Metode yang digunakan untuk melakukan pengujian atau simulasi radiasi pada kabel ini berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kazuo Yamamoto *et al* [8], pada penelitian ini melakukan analisis terhadap kabel atau konduktor yang dialiri arus berupa arus petir yang menyambar. Beberapa *software* komputer dapat digunakan untuk membantu penyelesaian simulasi ini. Adapun instrumen yang digunakan dalam penelitian kali ini yakni sebagai berikut,

2.4.1. LTSpice XVII

LTSpice XVII adalah perangkat lunak simulasi rangkaian analog gratis yang dikembangkan oleh *Linear Technology*, yang sekarang menjadi bagian dari Analog Devices. Ini memungkinkan pengguna untuk mensimulasikan dan menganalisis perilaku sirkuit elektronik, termasuk penguat operasional, dioda, transistor, dan komponen lainnya. Dengan LTSpice, pengguna dapat membuat skema rangkaian menggunakan antarmuka pengguna grafis (GUI) atau dengan memasukkan netlist secara langsung. Spadacini *et al.*[1] melakukan simulasi SPICE untuk memprediksi fenomena emisi terkonduksi yang dihasilkan oleh *inverter* mobil listrik pada domain waktu. Metode simulasi pengujian ini menyesuaikan pada metode yang telah diatur pada standar CISPR 25 dengan melakukan pemodelan rangkaian yang mendekati keadaan sebenarnya. Pemodelan rangkaian ini dikembangkan dari berbagai literatur, mulai dari baterai, inverter, dan motor sinkron magnet permanen serta kabel penghubung atau *power bus*. Simulasi ini digunakan untuk mengukur besar arus yang mengalir pada *power bus* arus searah dengan melihat bentuk gelombang pada titik masukan dan titik keluaran *power bus*. Titik ini digunakan

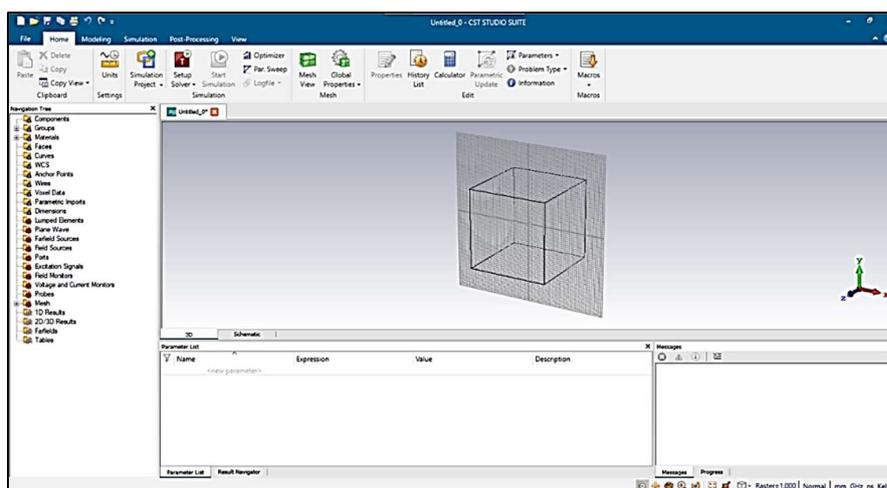
untuk menyesuaikan standar CISPR 25 yakni titik uji arus interferensi pada 0-75 cm dari sumber interferensi. Kemudian, Li Zhai *et al.*[4] dalam penelitian “*Impact of Electromagnetic Interference from Power Inverter Drive System on Batteries in Electric Vehicle*” menyatakan bahwa interferensi elektromagnetik merupakan tantangan besar dalam melakukan perancangan sistem pada mobil listrik. Hal ini disebabkan adanya tegangan dan arus keluaran dari komponen pengubah daya yang dapat menghasilkan arus gangguan. Sehingga dapat mengganggu komponen penting lainnya seperti baterai dan motor listrik nya. Penelitian ini disimulasikan menggunakan model rangkaian sistem mobil listrik melalui aplikasi SPICE. Kemudian, hasil simulasi ini diverifikasi dengan melakukan pengujian. Simulasi dan pengujian ini dilakukan dalam dua scenario yakni menggunakan filter dan tanpa filter. Hasil menunjukkan bahwa rentang fluktuasi tegangan baterai ketika tanpa filter lebih tinggi daripada menggunakan filter. Sehingga hal ini dapat mengakibatkan pengurangan siklus pakai baterai karena adanya masalah peningkatan suhu akibat dampak arus gangguan yang tinggi.



Gambar 2.8. Tampilan Antarmuka LTSpice XVII

2.4.2. CST Studio Suite

CST Studio Suite adalah perangkat lunak elektromagnetik tiga dimensi yang digunakan untuk merancang, menganalisis, dan mengoptimalkan sistem dan komponen elektromagnetik. Keuntungan menggunakan software *CST Studio Suite* yaitu dapat dengan mudah mensimulasikan satu komponen atau gabungan beberapa komponen ke dalam sebuah sistem dan mendapatkan hasil perhitungan yang ringkas dan akurat. Mingcheng Dong *et al.*[9] melakukan penelitian interferensi elektromagnetik terpancar pada mobil listrik yang timbul melalui kabel daya inverter tiga fasa. Permasalahan pada penelitian ini akibat adanya arus *common-mode* yang dihasilkan pada kabel daya inverter tersebut. Ketika arus tersebut mengalir melalui kabel daya, komponen tersebut dapat bekerja sebagai antena karena kabel tersebut memiliki panjang. Sehingga sinyal listrik akan menjalar ke ruang melalui udara dan dapat menginterferensi komponen lainnya. Penelitian ini dilakukan secara simulasi menggunakan aplikasi *CST Studio Suite 2019* untuk melihat bentuk propagasi yang dipancarkan oleh kabel daya tersebut dengan membandingkan hasil simulasi pada kabel DC dan kabel AC. Sebelum dilakukan simulasi, peneliti melakukan perhitungan dan pengukuran sesuai teori yang berlaku. Pada hasil simulasi ditemukan bahwa besar medan elektrik melonjak hingga mencapai 40 dBuA.



Gambar 2.9. Tampilan Antarmuka *CST Studio Suite 2019*

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun pelaksanaan penelitian kali ini dilakukan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dimulai dari bulan April hingga September 2023 seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut ini,

Tabel 3.1. Jadwal Penelitian

NO	Kegiatan	Bulan					
		April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September
1	Studi Literatur						
2	Seminar Proposal						
3	Pemodelan Rangkaian Mobil Listrik						
4	Uji coba dan Pengumpulan data simulasi						
5	Penulisan laporan dan analisa data						
6	Seminar Hasil						

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah sebagai berikut,

1. Laptop
2. *Software* LTSpice XVII dan CST *Studio Suite* 2019

3.3 Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, masalah yang dihadapi adalah bagaimana cara mensimulasikan interferensi elektromagnetik pada kabel daya yang disebabkan oleh proses pensaklaran pada inverter. Gelombang tegangan dan arus luaran inverter akan menjadi sumber eksitasi kabel daya. Hasil simulasi berupa tegangan *common mode*, medan magnet, dan medan listrik radiasi pada domain frekuensi. Hal ini dilakukan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Kazuo Yamamoto *et al* [8]. Adapun tahapan untuk menyelesaikan permasalahan tersebut adalah sebagai berikut:

3.3.1. Studi Literatur

Pada tahap ini, dipelajari dan dikumpulkan literatur mengenai sistem kelistrikan pada mobil listrik dan pemodelan rangkaian mobil listrik sebagai rangkaian yang akan digunakan pada simulasi menggunakan *software*. Literatur tersebut berasal dari beberapa sumber seperti buku, jurnal ilmiah, dan beberapa halaman situs web.

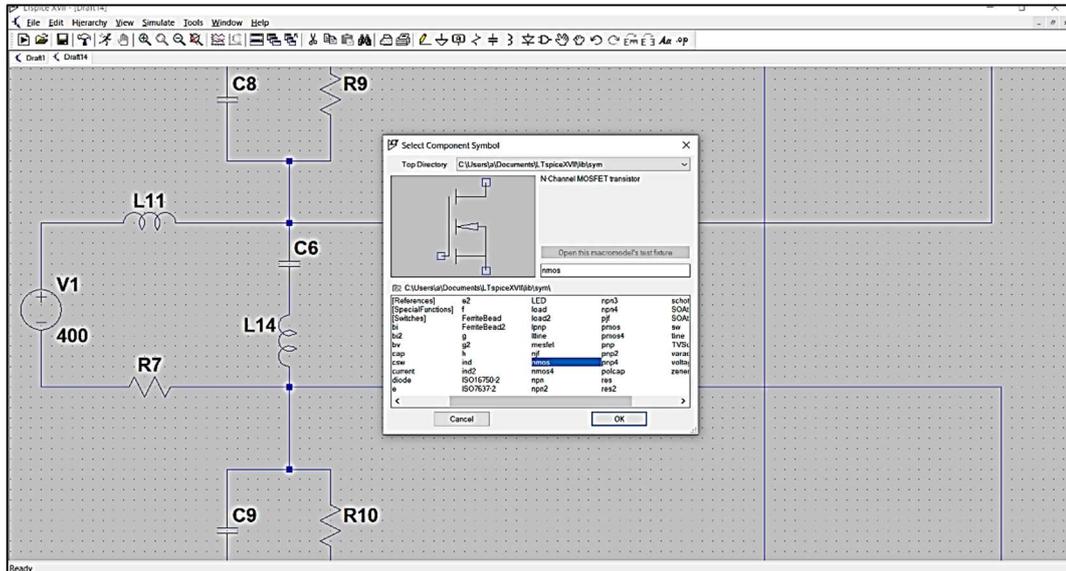
3.3.2. Perancangan dan Simulasi Inverter Tiga Fasa menggunakan *LTSpice XVII*

Pada tahap ini, dilakukan perancangan model rangkaian inverter tiga fasa pada mobil listrik yang akan digunakan sebagai rangkaian simulasi menggunakan *software* LTSpice XVII. Perancangan ini digunakan untuk mendapatkan gelombang tegangan dan arus hasil keluaran inverter yang akan digunakan sebagai sinyal eksitasi. Gelombang tersebut merupakan parameter yang dibutuhkan untuk menjalankan simulasi interferensi elektromagnetik pada CST *Studio Suite* 2019. Adapun perancangan rangkaian inverter ini merupakan hasil penyusunan ulang dari kombinasi beberapa referensi mengenai rangkaian inverter tersebut yakni *library* LTSpice XVII, literatur/jurnal ilmiah oleh Spadacini *et al.*[1], dan situs web *GanPower International*.

Berikut ini merupakan tahapan pembentukan rangkaian yang akan digunakan dalam penelitian kali ini,

1. Penyusunan komponen

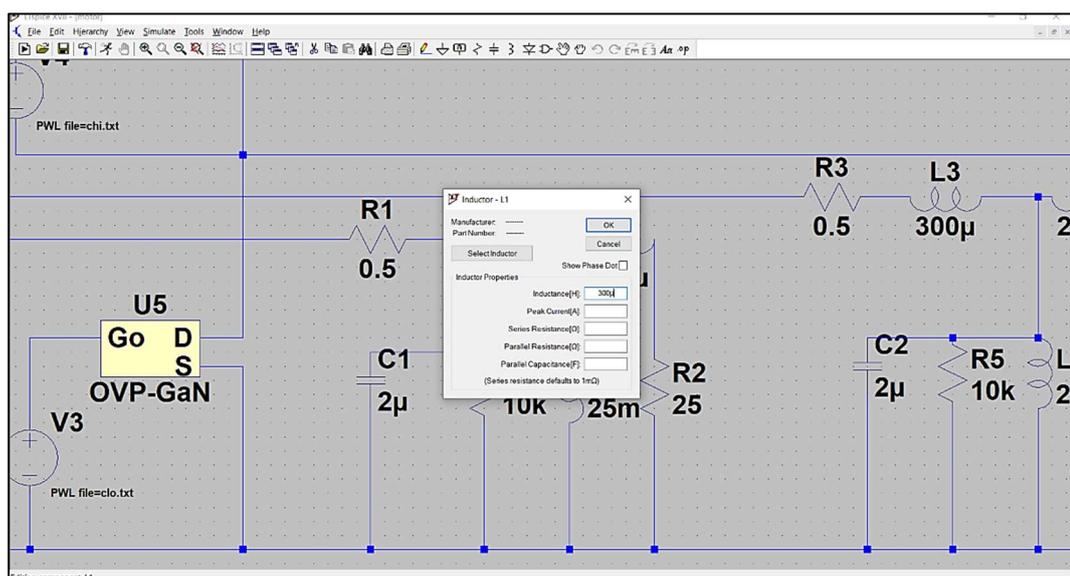
Setelah mendapatkan referensi mengenai rangkaian inverter dari berbagai sumber, selanjutnya yakni melakukan penyusunan komponen pada *worksheet* LTSpice XVII. Tampilan pada saat penyusunan komponen disajikan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Tampilan saat penyusunan komponen

2. Pengaturan nilai komponen

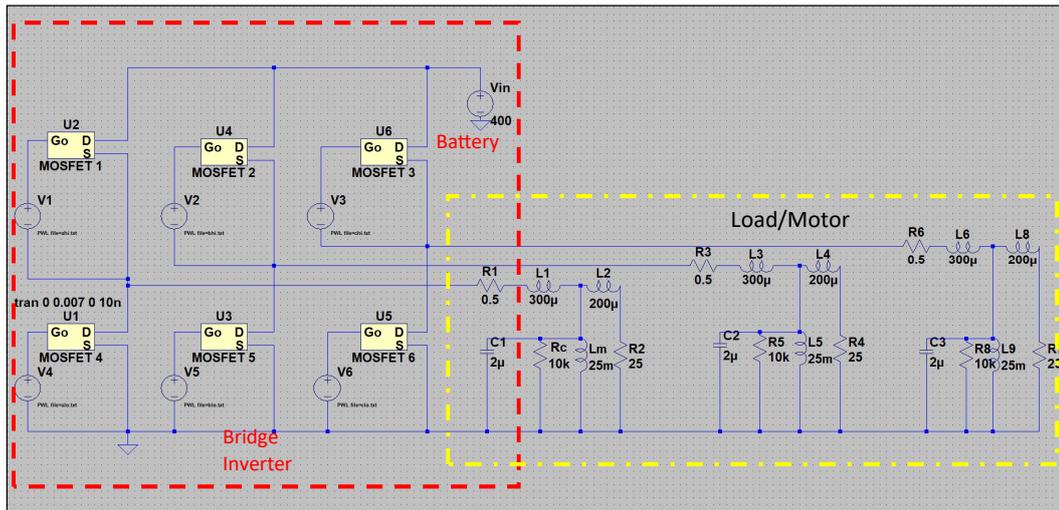
Tahap ini adalah mengatur nilai komponen yang akan digunakan untuk melakukan simulasi berdasarkan referensi yang telah didapat seperti yang ditampilkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2. Tampilan saat pengaturan nilai komponen

3. Rangkaian Inverter Tiga Fasa

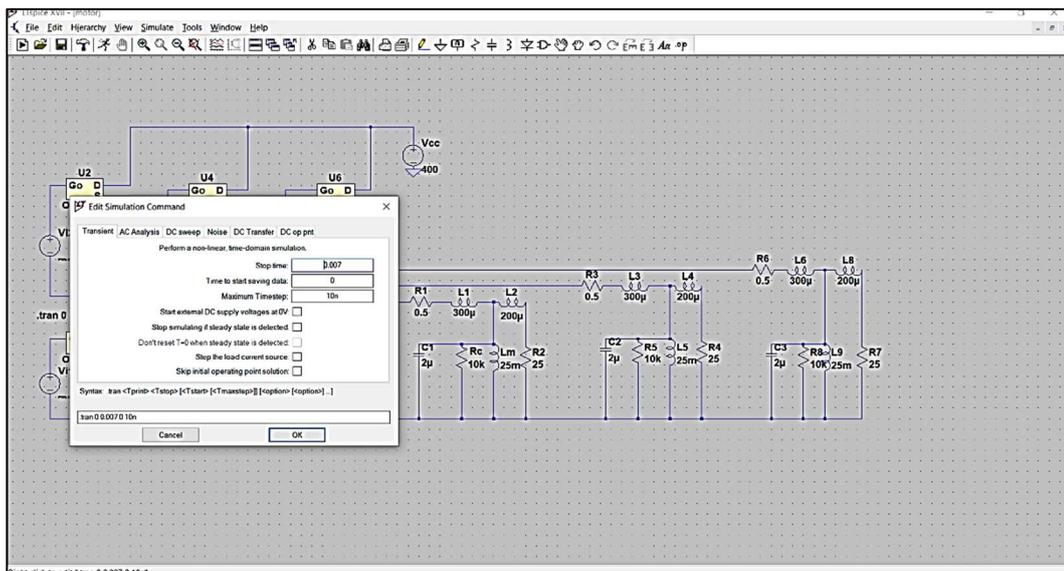
Berdasarkan gambar 3.3, gambar tersebut merupakan rangkaian sistem kelistrikan pada mobil listrik yang terdiri dari batere, inverter, dan motor AC. Model inverter merujuk pada rangkaian inverter oleh Spadacini *et al.*[1], *library LTSpice XVII*, dan situs web *GanPower International*. pensaklran pada inverter.



Gambar 3.3. Rangkaian inverter tiga fasa

4. Menjalankan Simulasi

Kemudian setelah rangkaian uji telah berhasil disusun dan ditampilkan pada gambar 3.4, berikutnya yakni melakukan *running* dengan *Transient Analysis*. Hasil simulasi berupa data tegangan dan arus dalam domain waktu. Setelah hasil

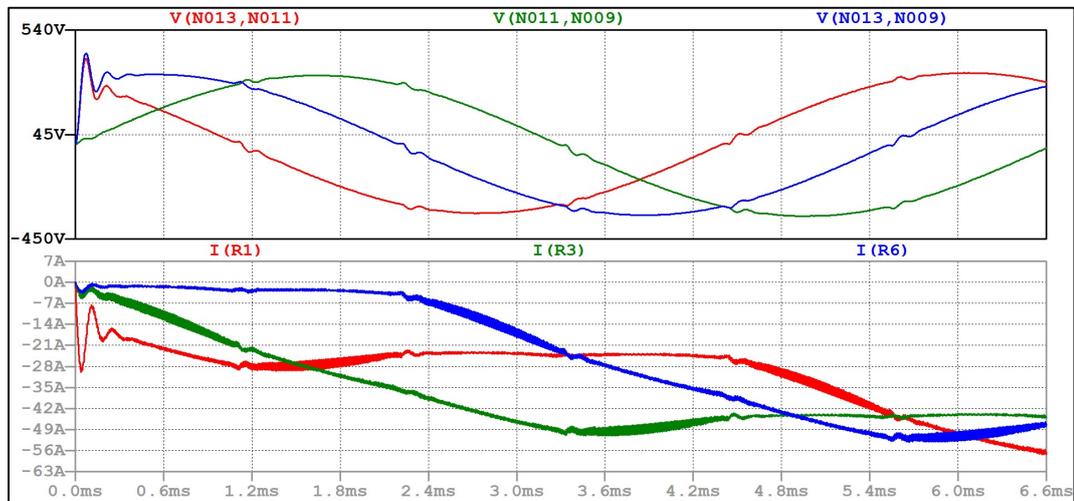


Gambar 3.4. Tampilan saat pengaturan running simulasi

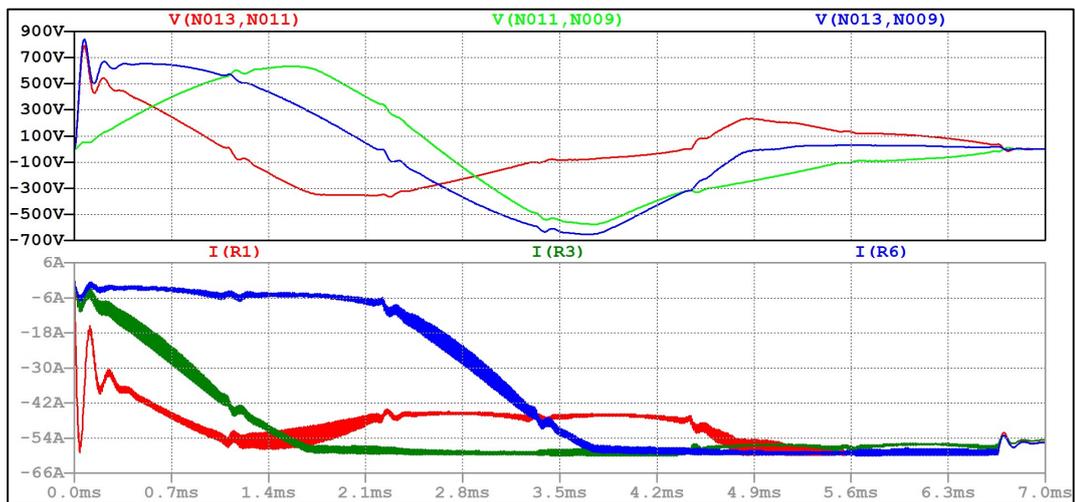
didapatkan dan dianalisis, data hasil disimpan untuk dilakukan *export* pada simulasi menggunakan CST *Studio Suite* 2019 sebagai sumber eksitasi kabel daya.

5. Gelombang Keluaran Inverter Tiga Fasa

Gelombang tegangan dan arus AC hasil proses pensaklaran inverter dengan besar tegangan sumber 400V dan 800 V ditampilkan pada gambar 3.5. Arus tersebut merupakan arus yang mengalir pada komponen *resistor* R1, R3, dan R6. Masing-masing arus ini menggambarkan fasa R, fasa S, dan fasa T secara berurutan.



(a)



(b)

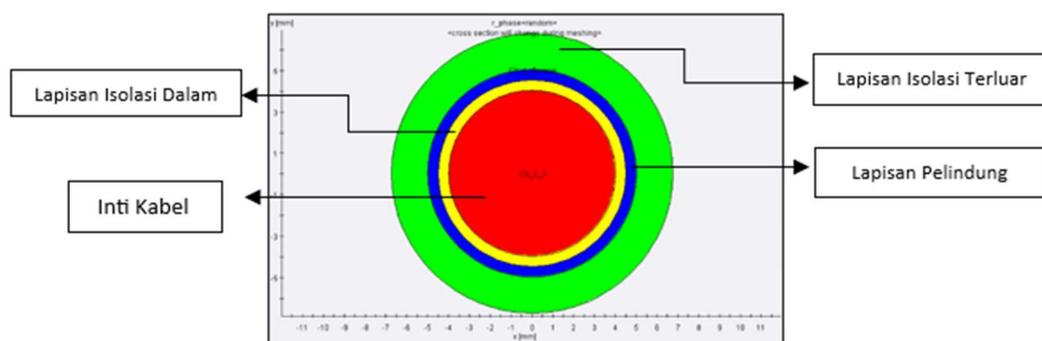
Gambar 3.5. Gelombang hasil keluaran inverter tiga fasa : (a) 400 V; (b) 800V

3.3.3. Simulasi dan Uji Interferensi Elektromagnetik Kabel Daya pada Inverter Tiga Fasa menggunakan CST *Studio Suite 2019*

Pada tahap ini melakukan simulasi interferensi elektromagnetik pada kabel daya inverter tiga fasa menggunakan CST *Studio Suite 2019*[10]. Simulasi ini bertujuan untuk menganalisis besar interferensi elektromagnetik pada kabel daya inverter tiga fasa baik secara konduksi maupun secara radiasi serta menganalisis pengaruh jenis kabel terhadap besar intensitas interferensi elektromagnetik yang ditimbulkan[11]. Adapun jenis kabel yang digunakan pada simulasi ini, yaitu kabel berpelindung dan kabel tak berpelindung.

A. Kabel Berpelindung

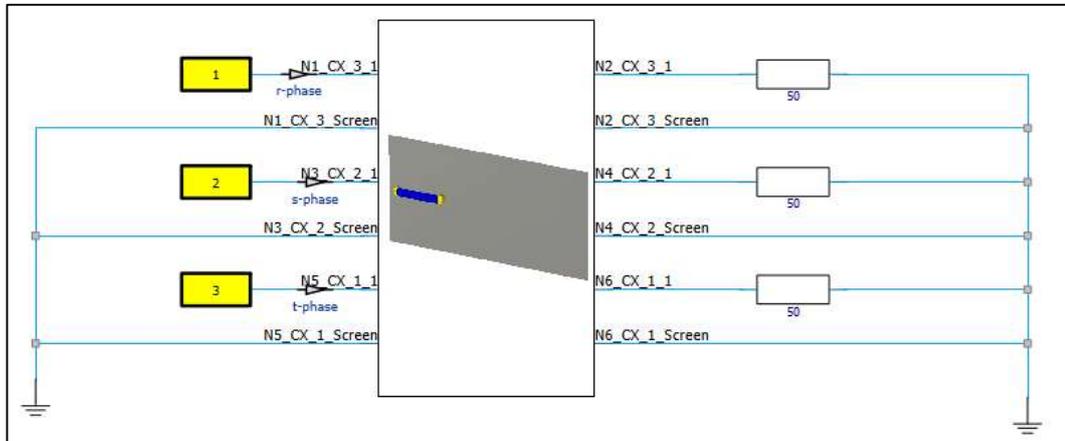
Pada kabel yang pertama mengacu pada penelitian Spadacini et al[1], kabel yang digunakan pada keluaran inverter yakni kabel tegangan tinggi berjenis tembaga berpelindung dengan diameter inti kabel sebesar 8 mm, ketebalan insulation sebesar 1 mm, ketebalan shield sebesar 0.5 mm, dan ketebalan isolasi luar sebesar 4 mm sehingga diameter keseluruhan sebesar 13.5 mm serta panjang kabel yang digunakan yakni sebesar 0.5 m. Kabel ini memiliki nilai permitivitas listrik relatif sebesar 2.35 dan diletakkan diatas plat logam setinggi 50 mm serta antar-kabel terpisah dengan jarak sebesar 20 mm.



Gambar 3.6. Potongan kabel daya berpelindung

Pada gambar 3.6 terlihat potongan dari kabel daya berpelindung yang memiliki 4 lapisan; Lapisan isolator terluar yang berwarna hijau, Lapisan pelindung yang berwarna biru, Lapisan isolator dalam yang berwarna kuning, dan Inti kabel yang berwarna merah. Pada jenis kabel ini terdapat lapisan pelindung yang ditanahkan

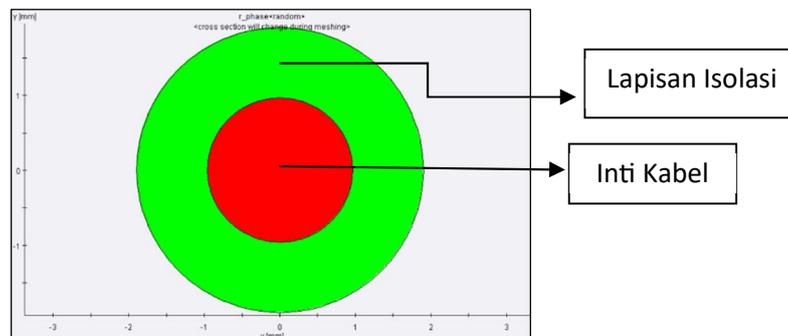
seperti yang dapat dilihat pada gambar 3.7, rangkaian simulasi kabel daya berpelingung.



Gambar 3.7. Rangkaian simulasi kabel daya berpelingung

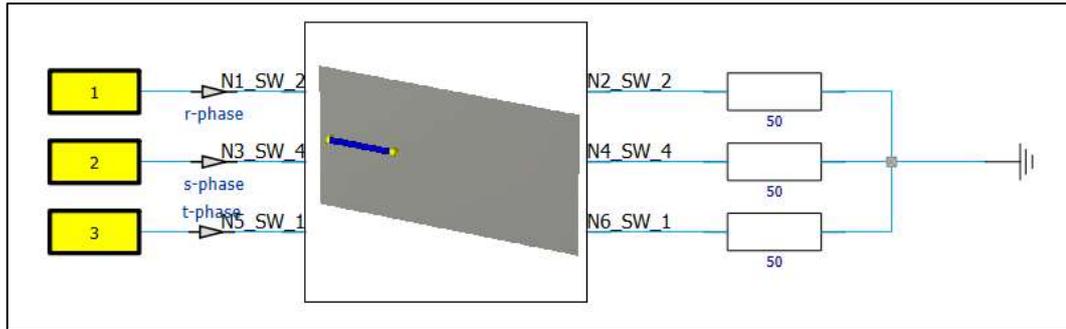
B. Kabel Tak Berpelingung

Kemudian pada pemodelan kabel yang kedua yakni kabel tidak berpelingung atau *insulating wire*, mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh Micheng Dong et al[9]. dengan menggunakan *library* yang sudah tersedia di *CST Studio Suite* 2019. Kabel ini diletakkan diatas plat logam setinggi 50 mm serta terpisah sebesar 5 mm.



Gambar 3.8. Potongan kabel daya tak berpelingung

Pada gambar 3.8, terlihat potongan jenis kabel ini hanya memiliki inti kabel yang berwarna merah dan lapisan isolator yang berwarna hijau. Pada jenis kabel ini tidak terdapat lapisan pelindung seperti kabel daya berpelingung. Sehingga pada sisi input sinyal eksitasi tidak dilakukan pentanahan.

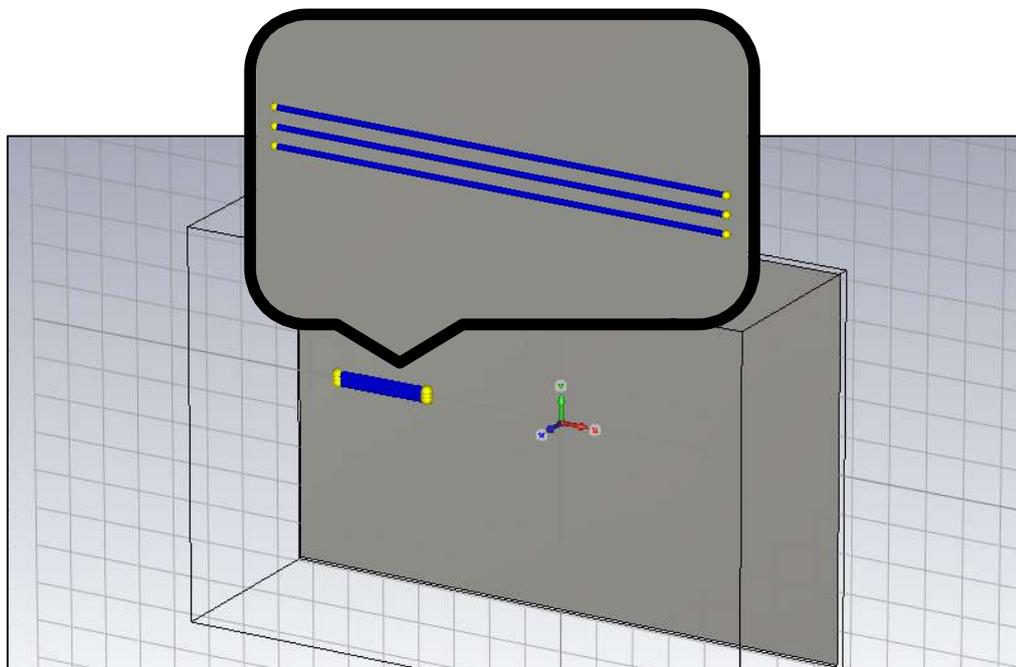


Gambar 3.9. Rangkaian simulasi kabel daya tak berpelindung

Adapun langkah-langkah pembuatan rangkaian kabel daya pada perangkat lunak di *CST Studio Suite 2019* adalah sebagai berikut;

1. Pembuatan Model Tiga Dimensi

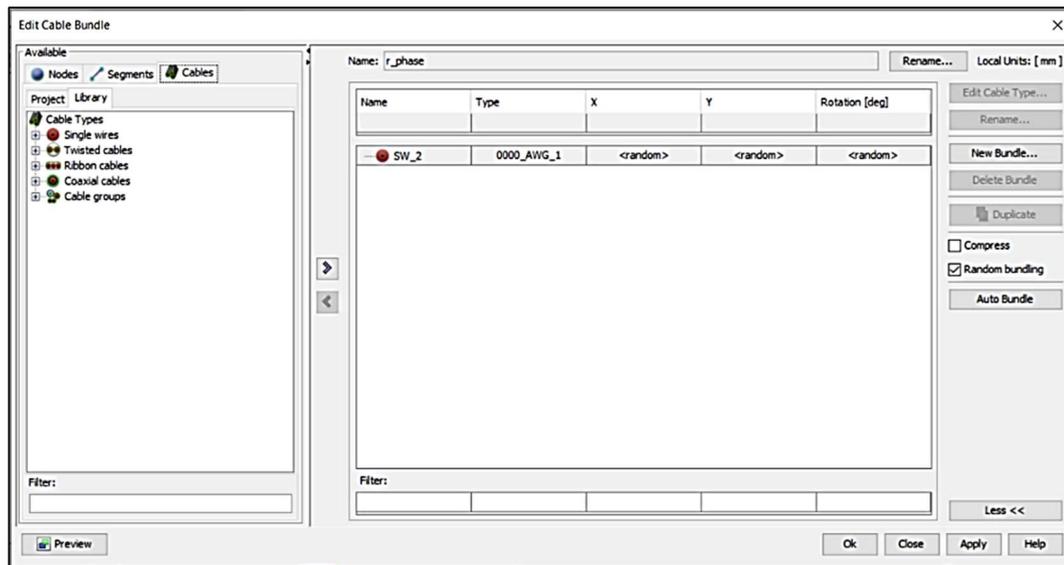
Pada tahap ini dilakukan pembuatan model tiga dimensi kabel daya dan *ground plane* seperti ditunjukkan pada gambar 3.10. Pembuatan *ground plane* dengan material PEC (*Perfectly Electric Conducting*), dilakukan berdasarkan asumsi ukuran mobil listrik yakni 3 x 2 meter. Kemudian melakukan pemodelan kabel keluaran inverter tiga fasa dengan jarak antar fasa sesuai dengan referensi[1].



Gambar 3.10. Tampilan model tiga dimensi

2. Pendefinisian Kabel

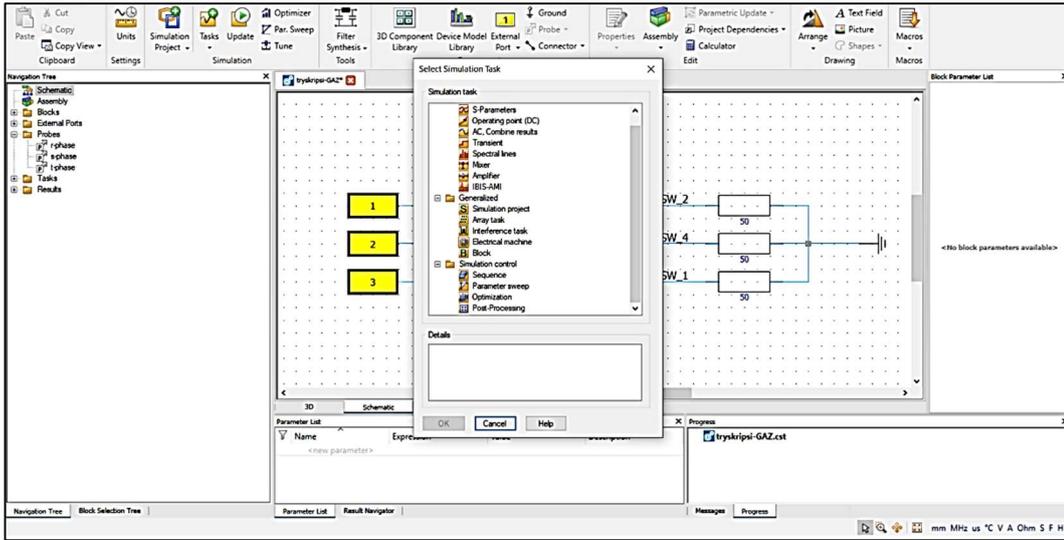
Pada tahap ini dilakukan pengaturan untuk konfigurasi kabel sesuai dengan penelitian yang digunakan sebelumnya[1]. Adapun beberapa hal yang perlu diatur yakni panjang kabel, ketinggian kabel, dan jenis kabel yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.11.



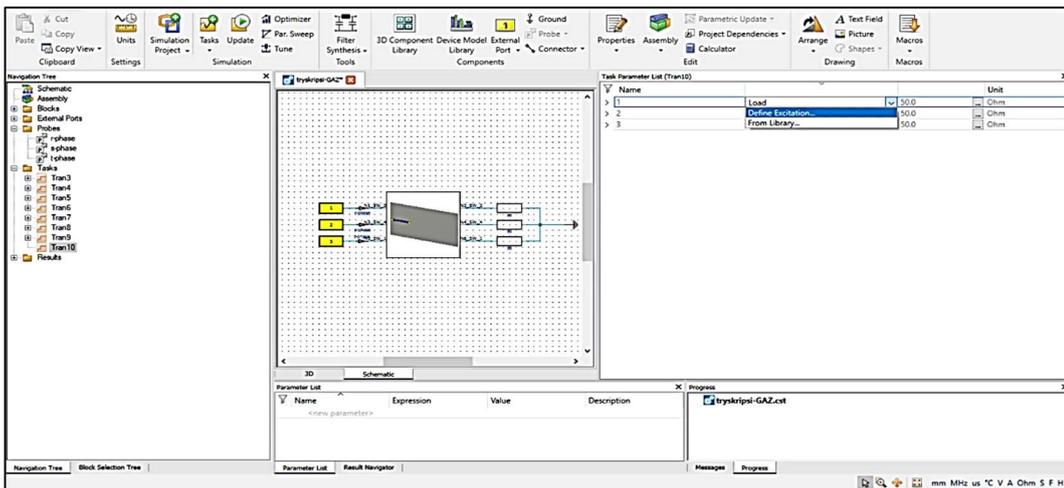
Gambar 3.11. Tampilan pendefinisian kabel

3. Input Sumber Sinyal Eksitasi untuk Kabel Daya

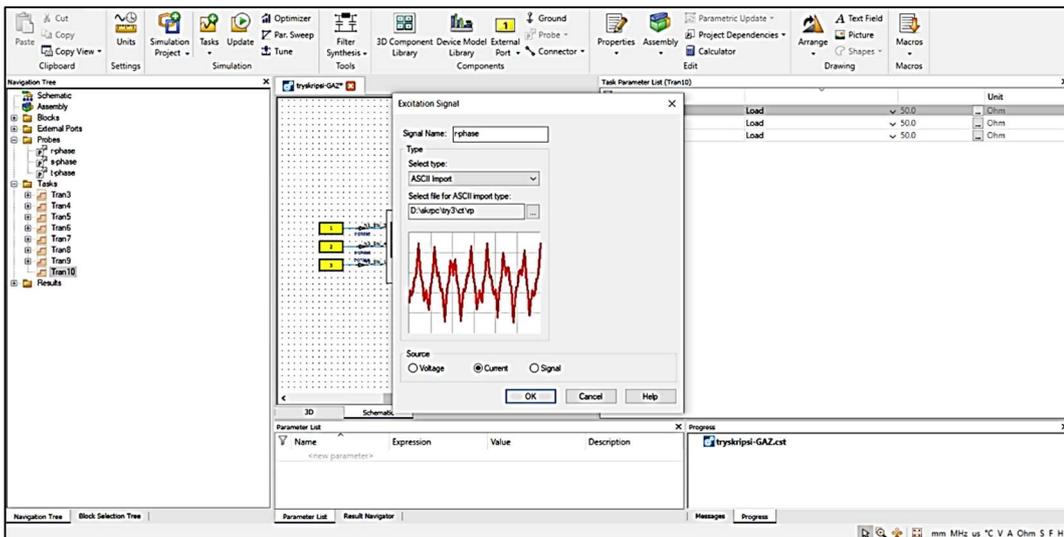
Setelah model kabel dihasilkan, tahap selanjutnya yakni melakukan simulasi interferensi elektromagnetik dari kabel tersebut. Untuk melakukan simulasi, perlu memilih komponen pendukung seperti sumber eksitasi dan beberapa komponen pendukung lainnya. Kemudian, menentukan *solver/task* yang akan digunakan dan melakukan pengaturan seperti yang tertera pada kotak dialog yang ditampilkan pada gambar 3.12 dan 3.13 . Adapun menu yang dipilih untuk simulasi ini yaitu *Transient Task* karena menu ini mengolah data input sumber eksitasi dalam domain frekuensi. Sumber eksitasi kabel daya adalah data arus dalam domain frekuensi yang diperoleh dari hasil simulasi rangkaian inverter menggunakan LTSpice XVII. Gelombang arus diekspor ke simulasi CST Studio Suite dalam bentuk *file* ASCII. Adapun menu untuk meng-*input*-kan sumber arus ditampilkan pada gambar 3.14.



Gambar 3.12. Tampilan pemilihan task



Gambar 3.13. Tampilan pendefinisian sinyal eksitasi



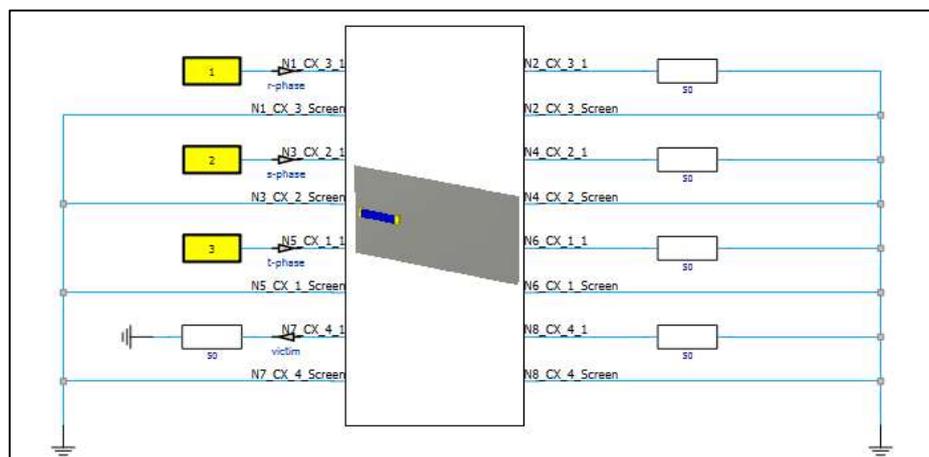
Gambar 3.14. Tampilan *import* sinyal eksitasi

4. Simulasi Interferensi Elektromagnetik secara Konduksi

Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui besar nilai interferensi elektromagnetik secara konduksi melalui impedansi bersama (*common impedance*)[12]. Adapun untuk sumber akan dimodelkan dengan *port* berwarna kuning, dan untuk *victim* yang merupakan impedansi bersama pada penelitian ini akan dimodelkan sebagai kawat biasa yang letaknya sangat dekat dengan *groundplane*. Simulasi ini dilakukan dengan mem-variasikan tegangan sumber 400V dan 800V. Berikut ini merupakan skenario simulasi uji interferensi elektromagnetik secara konduksi yang akan dilakukan,

a. Pada Kabel berpelingung

Pada simulasi ini, fasa R, S, dan T dialiri arus listrik dan bertindak sebagai sumber interferensi, sedangkan korban (*victim*) dimodelkan sebagai sebuah jalur konduktor tanpa sumber. Pelindung (*shielding*) dari kabel tiga fasa semuanya ditanahkan. Tegangan *common mode* diukur pada resistor 50 Ω seperti ditampilkan pada gambar 3.15.

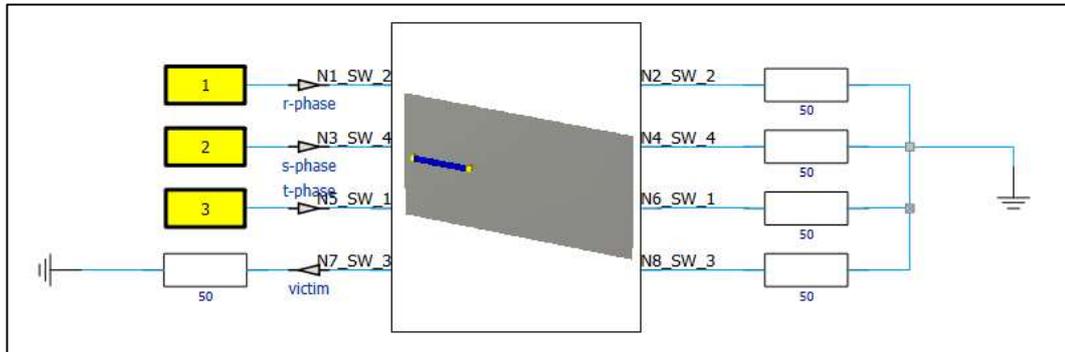


Gambar 3.15. Model simulasi interferensi elektromagnetik secara konduksi pada kabel berpelingung

b. Pada Kabel tak berpelingung

Simulasi pada kabel tak berpelingung sama seperti pada kabel berpelingung. Fasa R, S, dan T dialiri arus listrik dan bertindak sebagai sumber interferensi, sedangkan korban (*victim*) dimodelkan sebagai sebuah jalur konduktor tanpa sumber.

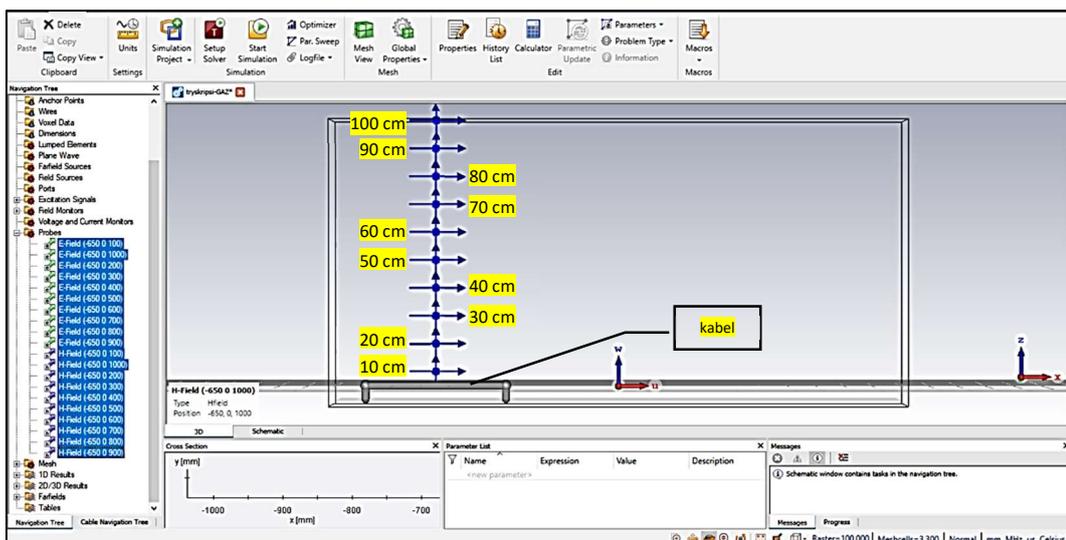
Tegangan *common mode* diukur pada resistor $50\ \Omega$ seperti ditampilkan pada gambar 3.16.



Gambar 3.16. Model simulasi interferensi elektromagnetik secara konduksi pada kabel tak berpelingung

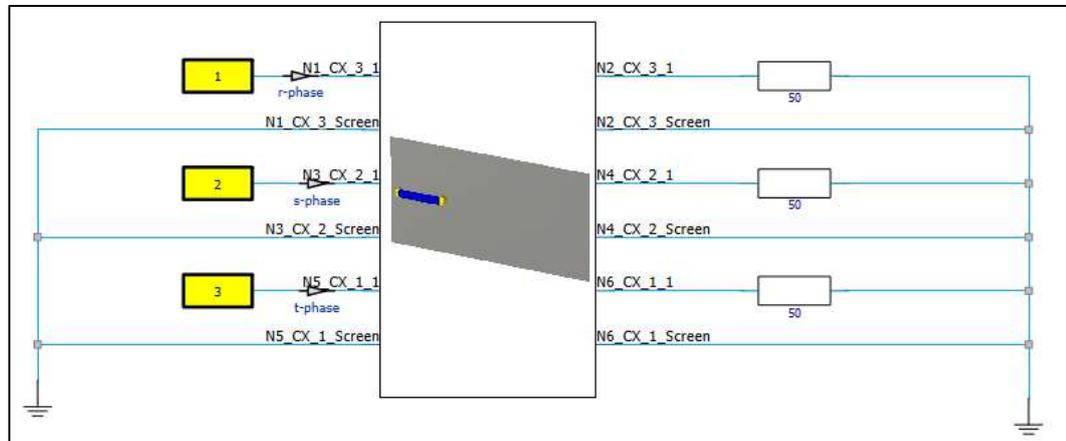
5. Simulasi Interferensi Elektromagnetik secara Radiasi

Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui besar nilai interferensi elektromagnetik secara radiasi yang dipancarkan dari kabel daya ke sekelilingnya [13]. Simulasi ini pengukuran medan listrik dan medan magnet dilakukan dengan meletakkan *field probe* sebagai *victim* pada jarak 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, dan 100 cm. *Probe* diposisikan vertikal terhadap kabel daya seperti ditunjukkan pada gambar 3.17.

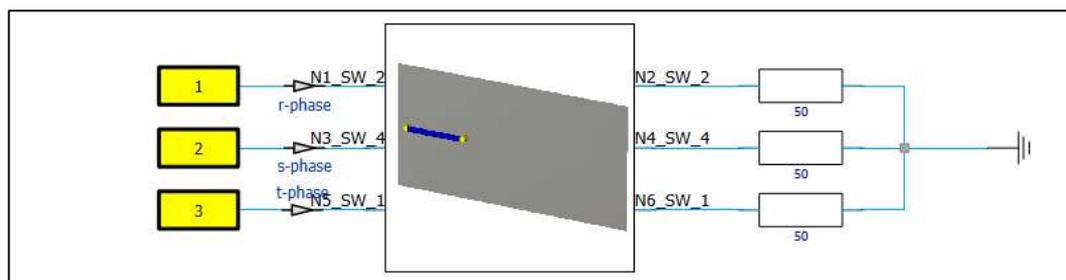


Gambar 3.17. Tampilan letak *victim* saat uji radiasi EMI

Pada simulasi ini, ketiga fasa akan bertindak sebagai sumber. Hal ini terkait mengenai definisi radiasi pada kabel merupakan pancaran yang disebabkan oleh jumlah arus yang mengalir pada sebuah sistem kabel.



(a)



(b)

Gambar 3.18. Rangkaian uji radiasi EMI (a) kabel berpelindung (b) kabel tak berpelindung

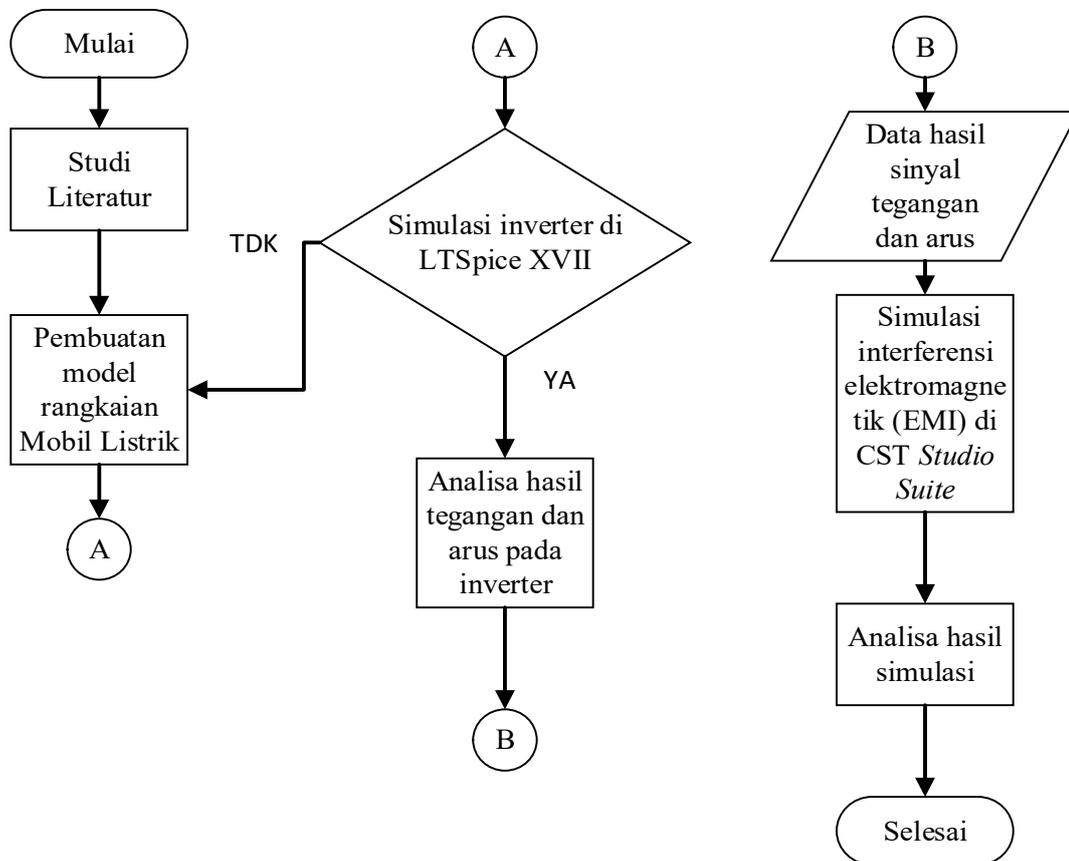
3.3.4. Analisis dan Pengolahan Data Hasil

Pada tahap ini, dilakukan proses pengambilan dan pengolahan data untuk analisis hasil dari proses simulasi. Parameter yang diamati pada simulasi adalah intensitas medan listrik dan medan magnet serta distribusi arus sekitar kabel daya pada inverter.

3.3.5. Pembuatan Laporan

Pada tahap ini, disajikan hasil dari penelitian dalam bentuk laporan akhir. Hasil dari penelitian ini adalah analisis hasil dari simulasi radiasi pada kabel daya inverter menggunakan software *CST Studio Suite 2019*.

Terdapat beberapa tahapan yang perlu dilalui dalam proses penyelesaian penelitian ini. Adapun untuk mempermudah dalam menyajikan tahapan-tahapan tersebut diperlukan diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada gambar berikut ini,



Gambar 3.19. Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diperoleh melalui penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Berdasarkan hasil simulasi interferensi elektromagnetik secara konduksi, tegangan *common mode* yang dihasilkan oleh kabel berpelindung mempunyai nilai yang lebih kecil dari kabel yang tidak berpelindung. Pada kabel berpelindung tegangan *common mode* tertinggi terjadi pada frekuensi 0 Hz sebesar 55,63 μV dan 110,49 μV untuk tegangan input 400V dan 800 V. Sedangkan pada kabel tak berpelindung tegangan *common mode* maksimum sebesar 163,74 μV pada frekuensi 7 kHz untuk tegangan input 400 V. Tegangan *common mode* untuk 800V sebesar 1059,7 μV pada frekuensi 100 kHz.
2. Berdasarkan hasil simulasi interferensi elektromagnetik secara radiasi, medan listrik dan medan magnet semakin kecil dengan bertambahnya jarak ukur dari kabel daya. Medan listrik terbesar terjadi pada jarak 20 cm dari kabel daya. Kabel berpelindung menghasilkan radiasi medan listrik sebesar 7,10 mV/m pada tegangan sumber 400 V dan 13,97 mV/m saat tegangan sumber 800 V. Sedangkan kabel tak berpelindung menghasilkan medan listrik sebesar 18,73 mV/m untuk tegangan sumber 400V dan 37,17 mV/m untuk tegangan sumber 800V. Kemudian, medan magnet terbesar terjadi pada jarak 10 cm dari kabel daya. Kabel berpelindung menghasilkan radiasi medan magnet sebesar 25,21 mA/m pada tegangan sumber 400 V dan 50,03 mA/m saat tegangan sumber 800 V. Sedangkan kabel tak berpelindung menghasilkan medan magnet sebesar 39,23 mA/m untuk tegangan sumber 400V dan 77,79 mA/m untuk tegangan sumber 800V.

3. Berdasarkan hasil simulasi interferensi elektromagnetik secara konduksi dan radiasi, besar tegangan sumber mempengaruhi besar interferensi elektromagnetik yang terjadi. Tegangan *common mode*, medan listrik dan medan magnet meningkat hampir dua kali lipat ketika tegangan sumber berubah dari 400 V ke 800 V.
4. Radiasi interferensi elektromagnetik berubah sebanding dengan jarak ukur dari kabel daya. Semakin jauh dari kabel daya medan listrik dan medan magnet yang diukur semakin kecil. Fenomena yang serupa dihasilkan oleh kedua jenis kabel daya yaitu kabel berpelindung dan kabel tak berpelindung.
5. Jenis kabel daya mempengaruhi interferensi elektromagnetik secara konduksi dan radiasi. Kabel berpelindung menghasilkan tegangan *common mode*, medan listrik, dan medan magnet yang lebih kecil daripada kabel tak berpelindung. Adanya pelindung (*shielding*) mengurangi arus *common mode* yang mengalir di kabel pentanahan dan mengurangi radiasi medan listrik dan medan magnet dari inti konduktor kabel daya.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut,

1. Pemodelan inverter dapat dilakukan dengan menggunakan model lain yang lebih terbaru dan kompleks.
2. Jenis kabel yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya tidak hanya jenis kabel yang terdapat pada penelitian ini
3. Penggunaan *software* MatLab Simulink dapat digunakan untuk menggantikan LTSpice XVII. Hal ini bertujuan untuk mempermudah dalam memperoleh sinyal input sehingga mendapatkan model yang mendekati dengan keadaan sesungguhnya. Kemudian penggunaan *software* CST *Studio Suite* 2019 dapat dilanjutkan dengan meningkatkan versi terbaru atau menggunakan *software* lainnya. Hal ini disebabkan masih kurangnya beberapa fitur dan referensi untuk penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Spadacini, F. Grassi, and S. A. Pignari, "SPICE simulation in time-domain of the CISPR 25 test setup for conducted emissions in electric vehicles," *2015 Asia-Pacific Int. Symp. Electromagn. Compat. APEMC 2015*, pp. 569–572, 2015, doi: 10.1109/APEMC.2015.7175332.
- [2] D. Smith, "Electromagnetic Theory for Complete Idiots," pp. 1–23, 2016.
- [3] R. B. Keller, *Design for Electromagnetic Compatibility--In a Nutshell*. 2023. doi: 10.1007/978-3-031-14186-7.
- [4] L. Zhai, G. Lee, X. Gao, X. Zhang, Z. Gu, and M. Zou, "Impact of electromagnetic interference from power inverter drive system on batteries in electric vehicle," *Energy Procedia*, vol. 88, pp. 881–888, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.105.
- [5] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility: Second Edition*. 2006. doi: 10.1002/0471758159.
- [6] F. Gao, C. Ye, Z. Wang, and X. Li, "Improvement of Low-Frequency Radiated Emission in Electric Vehicle by Numerical Analysis," *J. Control Sci. Eng.*, vol. 2018, no. 1, 2018, doi: 10.1155/2018/5956973.
- [7] M. Ikhsanuddin, *ANALISIS KINERJA PENGENDALI MODE TEGANGAN DAN PENGENDALI MODE ARUS PADA PHASE SHIFTED FULL BRIDGE (PSFB) CONVERTER 20 kW*. Bandarlampung, 2023.
- [8] K. Yamamoto, J. Kanata, and A. Ametani, "Transient magnetic fields and current distributions in an electric vehicle caused by a lightning stroke," *Electr. Eng. Japan (English Transl. Denki Gakkai Ronbunshi)*, vol. 185, no. 3, pp. 11–20, 2013, doi: 10.1002/ej.22471.
- [9] M. Dong, L. Zhai, R. Gao, and X. Zhang, "Research on radiated electromagnetic interference (EMI) from power cables of a three-phase inverter for electric vehicles," *IEEE Transp. Electrifi. Conf. Expo, ITEC*

Asia-Pacific 2014 - Conf. Proc., pp. 2–6, 2014, doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940897.

- [10] C. Simulation, “Cable Simulation,” 2020.
- [11] W. Ruoqi, Z. Xiang, and Z. Qi, “Estimation of power cable radiation emission,” *2019 14th IEEE Int. Conf. Electron. Meas. Instruments, ICEMI 2019*, pp. 1262–1267, 2019, doi: 10.1109/ICEMI46757.2019.9101427.
- [12] S. FENG, Z. LI, and J. SU, “Simulation Analysis of Cable Coupling Effect based on CST,” vol. 145, no. Eia, pp. 204–208, 2017, doi: 10.2991/eia-17.2017.44.
- [13] I. T. Setyadewi, Y. Prabowo, P. Wibowo, and P. S. Priambodo, “Unconsidered but influencing interference in unmanned aerial vehicle cabling system,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 14, no. 1, pp. 22–30, 2024, doi: 10.11591/ijece.v14i1.pp22-30.