

**STUDI PENGGUNAAN BIOKOMPOSIT SERAT TANDAN KOSONG
KELAPA SAWIT DENGAN *FILLER* MWCNT SEBAGAI MATERIAL
SHIELDING INTERFERENSI ELEKTROMAGNETIK**

(Tesis)

Oleh:

BAMBANG SUTRISNO



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**STUDI PENGGUNAAN BIOKOMPOSIT SERAT TANDAN KOSONG
KELAPA SAWIT DENGAN *FILLER* MWCNT SEBAGAI MATERIAL
SHIELDING INTERFERENSI ELEKTROMAGNETIK**

Oleh

BAMBANG SUTRISNO

TESIS

Sebagai salah Satu Syarat mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

Pada

Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

STUDI PENGGUNAAN BIOKOMPOSIT SERAT TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DENGAN *FILLER* MWCNT SEBAGAI MATERIAL *SHIELDING* INTERFERENSI ELEKTROMAGNETIK

OLEH

BAMBANG SUTRISNO

Perkembangan perangkat elektronik yang semakin pesat menyebabkan meningkatnya interferensi elektromagnetik (EMI) yang dapat mengganggu kinerja peralatan. Oleh karena itu, diperlukan perlindungan terhadap EMI (*EMI shielding*). Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan material biokomposit berbasis serat alami yaitu serat tandan kosong kelapa sawit (OPEFB) yang dipolimerisasi polianilin (PANI) dengan resin epoksi *filler Multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT) terfungsionalisasi sebagai material *EMI shielding*. Biokomposit difabrikasi dengan variasi OPEFB sebesar 10%, 20%, dan 30%, serta MWCNT sebesar 0%, 2%, dan 5% terhadap berat resin epoksi. Pembuatan spesimen berbentuk piring (*Dish-shaped*) digunakan untuk pengujian resistivitas volume, spesimen berbentuk planar persegi digunakan untuk pengujian FTIR, SEM dan *shielding effectiveness* (SE) menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA). Spesimen berbentuk kotak perisai digunakan untuk pengujian SE menggunakan antena *monopole*.

Hasil pengujian FTIR menunjukkan keberhasilan polimerisasi OPEFB dan fungsionalisasi MWCNT yang ditandai munculnya gugus fungsi C=C aromatik di 1500 cm^{-1} , serta gugus C–O pada 1028 cm^{-1} . Hasil pengujian SEM menunjukkan dispersi MWCNT yang homogen pada permukaan OPEFB. Komposisi OPEFB 10 – MWCNT 5 menghasilkan konduktivitas tertinggi sebesar $7,513 \times 10^{-8}\text{ S/m}$. komposisi tersebut juga menghasilkan nilai SE terbaik berdasarkan pengujian VNA sebesar $-5,708\text{ dB}$ pada frekuensi $6,6255\text{ GHz}$ dan pengujian antena *monopole* sebesar $-8,42\text{ dB}$ pada frekuensi 14 MHz . Hasil simulasi CST *Studio Suite* menunjukkan nilai SE tertinggi sebesar $-17,253\text{ dB}$ pada komposisi yang sama. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konduktivitas material berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan *shielding* interferensi elektromagnetik. Dengan demikian, biokomposit OPEFB dengan *filler* MWCNT berpotensi digunakan sebagai material *EMI shielding* yang ramah lingkungan.

Kata Kunci : *EMI Shielding, OPEFB, Multi-Walled Carbon Nanotubes, Shielding Effectiveness, Konduktivitas, Vector Network Analyzer, Antena Monopole*

ABSTRACT

STUDY OF OIL PALM EMPTY FRUIT BUNCH FIBER BIOCOMPOSITES WITH MWCNT FILLER AS AN ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE SHIELDING MATERIAL

BY

BAMBANG SUTRISNO

The rapid development of electronic devices has increased electromagnetic interference (EMI), which can disrupt equipment performance therefore, protection against EMI, or EMI shielding, is necessary. This study aims to develop an EMI shielding material from biocomposite based on natural fibers specifically, oil palm empty fruit bunch fibers (OPEFB) polymerized with polyaniline (PANI) and epoxy resin incorporating functionalized Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) as a filler. The biocomposites were fabricated with OPEFB content of 10%, 20%, and 30% and MWCNT content of 0%, 2%, and 5% by weight of the epoxy resin. Dish-shaped specimens were used for volume resistivity testing; rectangular planar specimens were used for FTIR, SEM and shielding effectiveness (SE) testing using a Vector Network Analyzer (VNA); and box-shape specimens were used for SE testing using a monopole antenna.

FTIR test results indicate the successful polymerization of OPEFB and functionalization of MWCNT, as evidenced by the appearance of aromatic C=C functional groups at 1500 cm^{-1} and C-O groups at 1028 cm^{-1} . SEM test results show a homogeneous dispersion of MWCNT on the OPEFB surface. The OPEFB 10 – MWCNT 5 composition yielded the highest conductivity of $7.513 \times 10^{-8}\text{ S/m}$. This composition also provided the best SE performance, based on VNA testing at -5.708 dB at 6.6255 GHz and monopole antenna testing at -8.42 dB at 14 MHz . Simulation results from CST Studio Suite showed the highest SE value of -17.253 dB for the same composition. Overall, the research results indicate that increased material conductivity contributes to improved electromagnetic interference shielding capability. Thus, OPEFB biocomposites with MWCNT filler have the potential to be used as environmentally friendly EMI shielding materials.

Keyword : EMI Shielding, OPEFB, Multi-Walled Carbon Nanotubes, Shielding Effectiveness, conductivity, Vector Network Analyzer, Monopole Antenna

Judul Tesis

: **STUDI PENGGUNAAN BIOKOMPOSIT
SERAT TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT
DENGAN *FILLER* MWCNT SEBAGAI
MATERIAL *SHIELDING* INTERFERENSI
ELEKTROMAGNETIK**

Nama Mahasiswa

: **Bambang Sutrisno**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2325031005

Jurusan

: Magister Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing 1

Pembimbing 2

Diah P.

Herman

Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T.
NIP. 19700528 199803 2 003

Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T.
NIP. 19711130 199903 1 003

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro

Sulistiyanti

Prof. Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.
NIP. 19651021 199512 2 001

MENGESAHKAN

1. Komisi Penguji 1
Ketua komisi Penguji
(Pembimbing I) : **Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T.**

Sekretaris Komisi Penguji
(Pembimbing II) : **Dr. Herman Halomoan Sinaga., S.T.,M.T.**

Anggota Komisi Penguji
(Penguji I) : **Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.**

Anggota Komisi Penguji
(Penguji II) : **Darmansyah, S.T., M.T., Ph.D.**

1. Dekan Fakultas Teknik

 **Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T.**
NIP. 19691030 200003 1 001

2. Direktur Program Pascasarjana


Prof. Dr. Ir. Murhadi., M.Si.
NIP. 19640326 198902 1 001

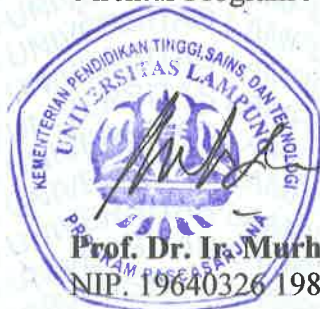
Tanggal Lulus Ujian Tesis: **04 Juni 2026**


.....

.....

.....

.....



LEMBAR PERNYATAAN

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis yang saya susun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro Universitas Lampung seluruhnya merupakan hasil karya sendiri.

Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan tesis yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Tesis dengan judul "Studi Penggunaan Biokomposit Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Dengan *Filler* MWCNT Sebagai Material *Shielding* Interferensi Elektromagnetik" dapat diselesaikan berkat bimbingan dan motivasi dari pembimbing-pembimbing saya, yaitu:

1. Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T.
2. Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T.

Saya ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak, khususnya kedua dosen pembimbing dan Bapak/Ibu Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan, bimbingan, motivasi, serta dukungan selama proses penyusunan tesis ini.

Apabila di kemudian hari ditemukan bahwa seluruh atau sebagian tesis ini bukan hasil karya sendiri atau terdapat unsur plagiarisme dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi berupa pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi lainnya sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Bandar Lampung, 29 Juni 2026



Bambang Sutrisno

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Palembang 26 Juni 1997. Penulis merupakan anak ke-3 dari 3 bersaudara dari pasangan Bapak M.Mochtar dan Ibu Nyayu Herlina.

Mengenai riwayat pendidikan, penulis diawali pendidikan pada Sekolah Dasar (SD) di SD AL – Kautsar Bandar Lampung lulus pada tahun 2009, Pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP AL – Kautsar Bandar Lampung lulus pada tahun 2012, Pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 10 Bandar Lampung lulus pada tahun 2015.

Penulis diterima di Universitas Lampung di jurusan Teknik Elektro pada tahun 2015 dan meraih gelar Sarjana Teknik (S.T) pada tahun 2021. Pada tahun 2023 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Program Pascasarjana Teknik Elektro di Universitas Lampung dan lulus pada tahun 2026 dengan judul tesis “Studi Penggunaan Biokomposit Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Dengan *Filler* MWCNT Sebagai Material *Shielding* Interferensi Elektromagnetik” di bawah bimbingan Ibu Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T.

Bandar Lampung, 29 Juni 2026

Penulis

Bambang Sutrisno



PERSEMBAHAN

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya yang senantiasa dilimpahkan kepada penulis. Shalawat serta salam semoga selalu tercurah kepada junjungan Nabi Besar Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan seluruh pengikutnya hingga akhir zaman. Atas izin ridho, dan pertolongan Allah SWT, tesis ini akhirnya dapat diselesaikan dengan baik.

Kupersembahkan karya sederhana ini kepada :

Kedua orang tuaku, **Ayahanda M.Mochtar** dan **Ibunda Nyayu Herlina** serta kakaku Muhammad Syahrial dan Indah Septiarani dan terkhusus kepada Almira Honesta

Terima kasih atas segala cinta, doa, dukungan, motivasi, dan pengorbanan yang menjadi kekuatan dalam menyelesaikan tesis ini.

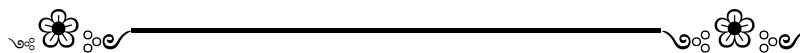
Bapak dan Ibu Dosen Teknik Elektro

Terima kasih atas ilmu, bimbingan, arahan, motivasi, serta pengalaman berharga, baik dalam bidang akademik maupun non akademik. Terima kasih atas dedikasi dan ketulusan yang telah diberikan selama masa studi.

Keluarga Besar MTE 2023

Terima kasih atas persahabatan, kebersamaan, dan semangat yang telah diberikan selama menempuh pendidikan. Semoga tali silaturahmi dan kebersamaan ini tetap terjaga di masa yang akan datang.

Almamaterku,
Universitas Lampung



MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”
(Q.S. Al-Baqarah :286)

Jika engkau sudah berada di jalan yang benar menuju Allah, maka berlارilah. Jika sulit bagimu, maka berlari kecillah. Jika kamu lelah, berjalanlah. Jika itu pun tidak mampu, merangkaklah. Namun, jangan pernah berbalik arah atau berhenti
(Imam Syafi’i)

Jangan terlalu sibuk membandingkan perjalananmu dengan orang lain. Setiap orang mempunyai waktunya masing-masing, jangan takut tertinggal tetaplah berproses dan berikan versi terbaikmu
(Bambang Sutrisno)

SANWACANA

Puji syukur penulis haturkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tesis ini dengan baik. Tidak lupa shalawat dan salam senantiasa penulis ucapkan kepada junjungan kita, Rasulullah SAW, yang menjadi suri teladan mulia yang membawa kita kepada cahaya kehidupan dan iman. Tesis dengan judul “Studi Penggunaan Biokomposit Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Dengan *Filler* MWCNT Sebagai Material *Shielding* Interferensi Elektromagnetik” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Jurusan Teknik Elektro di Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Selama masa perkuliahan dan penelitian, penulis telah mendapatkan banyak hal berharga, baik berupa dukungan, bimbingan, semangat, motivasi maupun kontribusi dari berbagai pihak. Sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., selaku Direktur Program Pascasarjana, Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
4. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.
5. Ibu Prof. Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Lampung
6. Ibu Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T., selaku Pembimbing Utama yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan, arahan, motivasi, serta masukan yang sangat berharga sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik.

7. Bapak Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T., selaku Pembimbing Akademik dan Pembimbing Kedua yang senantiasa memberikan bimbingan, saran, kritik, dan motivasi kepada penulis selama proses penyusunan tesis ini.
8. Ibu Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T., selaku Penguji Utama yang telah memberikan berbagai masukan, saran, dan arahan yang sangat bermanfaat dalam penyempurnaan tesis ini.
9. Bapak Darmansyah, S.T., M.T., Ph.D. selaku Penguji Kedua yang telah memberikan kritik, saran, dan masukan yang membangun demi kesempurnaan tesis ini.
10. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen serta tenaga kependidikan di Jurusan Magister Teknik Elektro Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu pengetahuan, wawasan, pengalaman, serta bantuan selama penulis menempuh pendidikan.
11. Teman-teman Magister Teknik Elektro 2023, Ian, Ismail, Rahmad Romadona, Rita, Jimmy, Yuliana dan Omar yang telah berjuang bersama memberi support selama masa perkuliahan
12. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada Almira Honesta yang selalu menemani, mendukung, dan memberikan semangat dalam setiap langkah perjuangan sehingga menjadi kekuatan tersendiri bagi penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
13. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada EIE 2015, Rumah Rafi Squad dan teman-teman yang tidak dapat dituliskan satu persatu yang selalu memberikan support kepada penulis.

Penulis menyampaikan permohonan maaf atas segala kekurangan dan ketidaksempurnaan yang mungkin terdapat dalam penulisan tugas akhir ini. Akhir kata, penulis berharap tesis ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak serta turut berkontribusi dalam memperkaya khazanah ilmu pengetahuan. Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih.

Bandar Lampung, 29 Juni 2026

Penulis

Bambang Sutrisno

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
LEMBAR PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN.....	viii
MOTTO	ix
SANWACANA	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvi
 BAB 1 PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Manfaat Penelitian.....	4
1.4 Rumusan Masalah	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
1.6 Hipotesis.....	6
1.7 Sistematika Penulisan.....	6
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	 9
2.1 Interferensi Elektromagnetik	9
2.2 Perlindungan Interferensi Elektromagnetik.....	11
2.3 Material Komposit.....	13
2.3.1 Penguat (Reinforced)	13
2.3.2 Polimerisasi	16
2.3.3 <i>Multi-walled carbon nanotube (MWCNT)</i>	16
2.3.4 Fungsionalisasi.....	17
2.4 S-Parameter Vector Network Analyzer (VNA).....	18

2.5	Penelitian terdahulu	21
BAB III METODE PENELITIAN		27
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	27
3.2	Jadwal Kegiatan Penelitian.....	27
3.3	Diagram Alir Penelitian (Flowchart).....	28
3.4	Alat dan Bahan yang digunakan.....	29
3.5	Prosedur penelitian	29
3.5.1	Perlakuan Terhadap OPEFB	30
3.5.2	Polimerisasi OPEFB Dilapisi Polianilin	31
3.5.3	Fungsionalisasi MWCNT.....	33
3.5.4	Pembuatan Kotak Perisai	36
3.6	Metode Pengukuran.....	39
3.6.1	Pengujian Morfologi material	39
3.6.2	Pengujian VNA S-Parameter	41
3.6.3	Pengukuran Kotak Perisai	42
3.6.4	Pengukuran Resistivitas	45
3.6.5	Simulasi CST <i>Studio Suite</i>	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		52
4.1	Hasil Pengujian <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR)	55
4.2	Hasil Pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	57
4.3	Hasil Pengujian Resistivitas Volume	59
4.4	Hasil Pengujian <i>Shielding Effectiveness</i> (SE) VNA.....	62
4.5	Hasil Pengujian <i>Shielding Effectiveness</i> (SE) Kotak Perisai.....	65
4.6	Hasil Simulasi CST <i>Studio Suite</i>	69
4.7	Analisis <i>Shielding Effectiveness</i> VNA, Antena <i>Monopole</i> dan Simulasi	72
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		75
5.1	KESIMPULAN	75
5.2	SARAN.....	77
DAFTAR PUSTAKA		78
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Spektrum Elektromagnetik.....	10
Gambar 2. 2 Mekanisme EMI <i>Shielding</i>	12
Gambar 2. 3 Komposisi untuk pembuatan komposit.	13
Gambar 2. 4 OPEFB	14
Gambar 2. 5 MWCNT.....	17
Gambar 2. 6 Skematik S-Parameter VNA	18
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	28
Gambar 3. 2 Diagram Blok Penelitian	29
Gambar 3. 3 OPEFB	30
Gambar 3. 4 Perendaman OPEFB.....	30
Gambar 3. 5 Pencucian OPEFB.....	31
Gambar 3. 6 Hasil OPEFB.....	31
Gambar 3. 7 Perbandingan Gram OPEFB	32
Gambar 3. 8 Penggunaan dari Anilin, HCl dan APS	32
Gambar 3. 9 Melarutkan Anilin, HCl dan APS menggunakan HPMS	33
Gambar 3. 10 Hasil Polimerisasi OPEFB	33
Gambar 3. 11 Perbandingan gram MWCNT	34
Gambar 3. 12 Pencampuran MWCNT dengan HNO ₃	34
Gambar 3. 13 Proses Penyaringan MWCNT dengan HNO ₃	35
Gambar 3. 14 Pencampuran MWCNT dengan H ₂ O ₂	35
Gambar 3. 15 Penyaringan campuran hasil MWCNT	36
Gambar 3. 16 Hasil Akhir Fungsionalisasi MWCNT	36
Gambar 3. 17 Pelapisan kaca dengan <i>Polyvinyl Alcohol</i>	37
Gambar 3. 18 Penaburan OPEFB pada cetakan.....	37
Gambar 3. 19 Ukuran resin, hardener, MWCNT dan OPEFB.....	37
Gambar 3. 20 Pemotongan Material Komposit Sesuai Spesifikasi Pengujian.....	38
Gambar 3. 21 Bentuk dari alat FTIR <i>Agilent Cary 630</i>	40

Gambar 3. 22 Skematik pengujian SEM.....	41
Gambar 3. 23 Rangkaian pengujian <i>Shielding Effectiveness</i>	42
Gambar 3. 24 Diagram Skematik Pengujian SE	43
Gambar 3. 25 Rangkaian Uji SE saat kotak perisai tidak dipasang	43
Gambar 3. 26 Rangkaian Uji SE saat kotak perisai dipasang	43
Gambar 3. 27 Skematik Pengujian Resistivitas	45
Gambar 3. 28 Rancangan pada simulasi CST	48
Gambar 4. 1 Sampel FTIR.	55
Gambar 4. 2 Hasil Pengujian SEM pada OPEFB 30 – MWCNT 0 3000x.....	57
Gambar 4. 3 Hasil Pengujian SEM pada OPEFB 30 – MWCNT 5 1000x,.....	58
Gambar 4. 4 Perbandingan nilai konduktivitas setiap sampel	61
Gambar 4. 5 Hasil Nilai SE pengujian S-Parameter	64
Gambar 4. 6 Pengujian Kotak Perisai	65
Gambar 4. 7 Nilai SE dengan Antena Monopole.....	68
Gambar 4. 8 Hasil simulasi pada CST <i>Studio Suite</i>	70
Gambar 4. 9 Hasil SE pada simulasi CST.....	71
Gambar 4. 10 Hubungan antara VNA, Kotak Perisai dan konduktivitas.....	72
Gambar 4. 11 Hasil nilai SE puncak pada simulasi CST	73

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi kimia dari serat OPEFB	15
Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian	27
Tabel 3.2 Hasil Pengukuran <i>Shielding Effectiveness</i> (SE).....	44
Tabel 3.3 Hasil Perhitungan <i>Shielding Effectiveness</i> (SE)	45
Tabel 3.4 Data pengujian Resistivitas pada setiap sampel.....	47
Tabel 4. 1 Spesimen biokomposit	52
Tabel 4. 2 Identifikasi gugus fungsi.....	56
Tabel 4. 3 Data hasil pengukuran sampel	60
Tabel 4. 4 Data hasil perhitungan pada setiap sampel	61
Tabel 4. 5 Pengukuran hasil pengujian <i>Shielding Effectiveness</i>	63
Tabel 4. 6 Hasil Pengukuran SE frekuensi 1-20 MHz	66
Tabel 4. 7 Data hasil perhitungan nilai SE.....	67

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pesatnya perkembangan perangkat elektronik seperti ponsel, televisi, dan *microwave* menyebabkan peningkatan pancaran serta penerimaan gelombang elektromagnetik. Jika tidak dikendalikan, hal ini dapat menimbulkan interferensi elektromagnetik (*Electromagnetic Interference/EMI*), yang mengganggu kinerja perangkat lain dan berpotensi berdampak negatif pada kesehatan manusia. Oleh karena itu, perangkat elektronik harus dirancang agar tetap beroperasi dengan baik dalam lingkungan yang memiliki radiasi elektromagnetik. Konsep *EMC* (*Electromagnetic Compatibility*) menurut *IEC* (*International Electrotechnical Commission*) adalah kemampuan suatu perangkat atau sistem untuk memastikan perangkat bekerja normal tanpa menimbulkan gangguan elektromagnetik yang tidak dapat ditoleransi terhadap perangkat lain di lingkungan tersebut. Salah satu solusi untuk mengatasi gangguan akibat EMI yaitu dengan menggunakan pelindung EMI (*EMI shielding*), yang berfungsi menghalangi atau merefleksikan gelombang elektromagnetik agar tidak masuk sehingga mencegah terjadinya gangguan elektromagnetik dan menjaga kinerja sistem tetap stabil.

Dalam satu dekade terakhir, penggunaan biokomposit semakin berkembang, terutama dalam aplikasi ramah lingkungan. Biokomposit merupakan material dari serat alami dan matriks polimer yang ramah lingkungan. Serat alami memiliki

beberapa keunggulan dibandingkan serat sintesis, antara lain lebih ringan, *biodegradable*, harga lebih ekonomis, dan memiliki kekuatan spesifik yang cukup tinggi. Beberapa serat alami yang potensial sebagai kandidat material *EMI shielding* antara lain serat tandan kosong kelapa sawit (OPEFB), serat bambu, serat ampas tebu, serat pisang, serat kelapa, rami, serat kenaf, serat jute, dan serat sisal. Di antara serat-serat tersebut, OPEFB dipilih karena merupakan salah satu limbah perkebunan yang melimpah di Lampung, harga yang terjangkau, memiliki *tensile strength* yang tinggi dan memiliki kekuatan mekanis yang baik.

Material *EMI shielding* umumnya membutuhkan material dengan konduktivitas listrik yang tinggi agar mampu merefleksikan gelombang elektromagnetik secara efektif. Namun, serat alami pada umumnya memiliki konduktivitas listrik yang rendah seperti OPEFB. Oleh karena itu, untuk mengatasi keterbatasan ini perlu dilakukan proses polimerisasi dengan menggunakan polimer konduktif misalnya polianilin untuk meningkatkan konduktivitas serat. Selain itu, penggunaan polimer matriks seperti resin epoksi yang bersifat isolator sehingga diperlukan penambahan *filler* konduktif seperti *Multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT) karena memiliki kekuatan mekanik yang luar biasa, serta stabilitas termal dan kimia. Namun, sangat sulit mencampurkan MWCNT dengan material lain akibat gaya tarik antar molekul sehingga diperlukan proses fungsionalisasi agar terdapat tambahan gugus fungsi yang dapat meningkatkan interaksi permukaan dan menyatukan matriks secara sempurna.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan material biokomposit berbasis serat alami yaitu OPEFB yang dipolimerisasi

polianilin dengan matriks polimer resin epoksi dengan *filler* MWCNT terfungsionalisasi yang akan diaplikasikan dalam pembuatan kotak perisai maupun spesimen planar untuk menentukan nilai *shielding effectiveness*. Kotak perisai diuji dengan metode pengujian antenna *monopole* pada frekuensi 1-20 MHz sedangkan pada bentuk planar diuji dengan metode pengujian *Vector Network Analyzer* (VNA) pada frekuensi 5,85-8,2 GHz sehingga dapat mengevaluasi efektivitasnya sebagai material alternatif EMI *shielding*.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memfabrikasi biokomposit OPEFB yang dipolimerisasi polianilin dengan matriks resin epoksi dengan *filler* MWCNT yang telah difungsionalisasi
2. Menguji struktur kimia dan morfologi material menggunakan pengujian *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM)
3. Mengukur resistivitas volume untuk memperoleh nilai konduktivitas menggunakan metode *four point probe*
4. Mengukur nilai *shielding effectiveness* menggunakan metode *Vector Network Analyzer* (VNA), antenna *monopole*, serta simulasi *CST Studio Suite*.
5. Mengevaluasi keterkaitan antara konduktivitas dengan nilai *shielding effectiveness* untuk menentukan kelayakan biokomposit sebagai material pelindung interferensi elektromagnetik.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Memberikan informasi ilmiah mengenai karakteristik material seperti FTIR dan SEM serta nilai konduktivitas terhadap *shielding effectiveness* pada biokomposit OPEFB terpolimerisasi polianilin dengan *filler* MWCNT
2. Memberikan alternatif pemanfaatan limbah OPEFB menjadi produk bernilai tambah di bidang rekayasa material elektromagnetik.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang telah dijelaskan maka rumusan masalah penelitian sebagai berikut:

1. Pengaruh OPEFB terpolimerisasi dengan *filler* MWCNT terfungsionalisasi terhadap struktur kimia dan morfologi material pada biokomposit.
2. Pengaruh variasi komposisi OPEFB dan MWCNT terhadap konduktivitas pada biokomposit.
3. Kemampuan biokomposit dalam merefleksikan interferensi elektromagnetik berdasarkan pengujian *shielding effectiveness* menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) dan antena *monopole*
4. Keterkaitan antara konduktivitas dan nilai *shielding effectiveness* dalam menentukan kelayakan biokomposit sebagai material EMI *shielding*.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Komposisi OPEFB yang digunakan dalam penelitian ini adalah 10%, 20%, dan 30% terhadap berat resin, sedangkan *filler* MWCNT yang digunakan sebesar 2% dan 5% terhadap berat resin.
2. Polimer konduktif yang digunakan untuk meningkatkan konduktivitas OPEFB adalah polianilin sedangkan *filler* konduktif yang digunakan adalah MWCNT yang telah difungsionalisasi menggunakan HNO_3 dan H_2O_2 .
3. Proses pencetakan biokomposit dengan metode *hand lay-up* sistem kompresi dingin (*cold pressing*) secara manual menggunakan beban statis konstan sebesar ± 6 Kg selama 12 jam dengan asumsi proses dispersi berlangsung secara homogen
4. Pengujian SE dilakukan pada lingkungan laboratorium tanpa menggunakan ruang *anechoic*, sehingga pengaruh interferensi elektromagnetik dari lingkungan sekitar tidak dianalisis secara khusus. Pengujian dilakukan pada 2 metode, yaitu :
 - Pengujian SE pada bentuk planar dilakukan menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) pada rentang frekuensi 5,85–8,2 GHz menggunakan waveguide WR-137.
 - Pengujian SE pada bentuk kotak perisai dilakukan menggunakan metode antena *monopole* pada rentang frekuensi 1–20 MHz.
5. Penelitian tidak mengevaluasi pengaruh umur pemakaian, degradasi performa, maupun ketidakpastian kalibrasi jangka panjang dari instrumen pengukuran yang digunakan.

6. Simulasi menggunakan *CST Studio Suite* dilakukan dengan mengasumsikan material bersifat homogen dan ideal, tanpa mempertimbangkan cacat fabrikasi, distribusi *filler* yang tidak merata, maupun pengaruh lingkungan pengujian.

1.6 Hipotesis

Hipotesis dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut berdasarkan landasan teori perkolasi material dan karakteristik elektrik material penyusunnya:

- Keberhasilan polimerisasi pada OPEFB dan penambahan *filler* MWCNT 5% akan meningkatkan sifat konduktif biokomposit.
- Peningkatan sifat konduktif tersebut akan berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan material dalam merefleksikan gelombang elektromagnetik yang dinyatakan melalui nilai *shielding effectiveness*.
- Biokomposit dengan komposisi OPEFB 10 - MWCNT 5 akan memiliki kemampuan EMI *shielding* tertinggi dibandingkan komposisi lainnya.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian ini disusun untuk memberikan gambaran yang terstruktur mengenai isi setiap bab dalam laporan tesis ini. Adapun sistematika penulisan adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian mengenai latar belakang penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, serta sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas landasan teori yang mendukung penelitian, meliputi konsep *shielding* interferensi elektromagnetik, material komposit, serat alami seperti OPEFB, proses polimerisasi, karakteristik MWCNT proses fungsionalisasi, serta kajian penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan secara rinci metode yang digunakan dalam penelitian, meliputi waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan, prosedur pembuatan biokomposit, proses polimerisasi serat, fungsionalisasi MWCNT, pembuatan kotak perisai (enclosure), serta metode pengujian seperti FTIR, SEM, resistivitas volume untuk menentukan nilai konduktivitas, nilai *shielding effectiveness* pada pengukuran menggunakan VNA, antena *monopole* serta simulasi menggunakan CST *Studio Suite*.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengujian yang diperoleh serta pembahasannya, meliputi analisis karakteristik kimia (FTIR), morfologi material (SEM), sifat listrik (resistivitas dan konduktivitas), pengujian *shielding effectiveness* menggunakan VNA dan kotak perisai, dan simulasi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian serta saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Bagian ini memuat seluruh referensi yang digunakan sebagai dasar dalam penyusunan penelitian ini.

LAMPIRAN

Bagian ini berisi data pendukung, dokumentasi, serta informasi tambahan yang berkaitan dengan penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

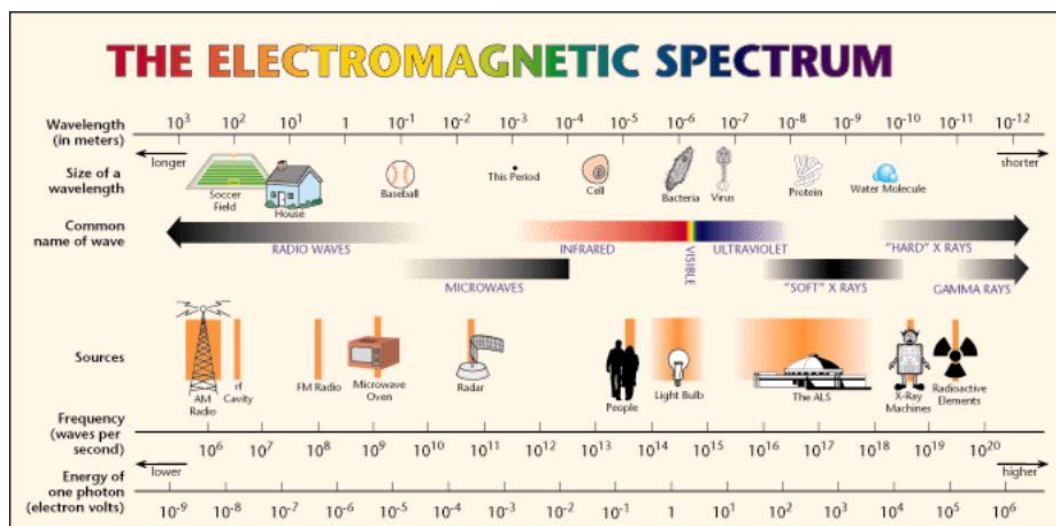
2.1 Interferensi Elektromagnetik

Interferensi Elektromagnetik (EMI) merupakan fenomena terganggunya kinerja suatu perangkat elektronik akibat adanya gelombang elektromagnetik yang berasal dari sumber lain di sekitarnya. Sumber EMI dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu :

1. Sumber buatan manusia (*man-made sources*) seperti sistem komunikasi, sistem navigasi, peralatan elektronik, jaringan listrik, frekuensi radio.
2. Sumber alami (*natural sources*) seperti petir, badai geomagnetik, radiasi matahari, dan lainnya.[1]

Sumber EMI buatan manusia banyak ditemukan pada berbagai sektor, mulai dari komunikasi, sistem navigasi, kontrol industri, transportasi, hingga sistem militer yang sangat bergantung pada keandalan transmisi data dan sinyal elektronik.[2] Bidang komunikasi, EMI dapat mengakibatkan distorsi pada sinyal radio, menurunkan kualitas transmisi data pada jaringan nirkabel, serta menyebabkan gangguan suara dalam sistem telepon seluler atau perangkat komunikasi lainnya. Bidang industri penerbangan, gangguan elektromagnetik dari perangkat elektronik penumpang atau pancaran gelombang dari luar dapat menghambat kinerja avionik pesawat, termasuk sistem navigasi dan komunikasi, yang berpotensi membahayakan keselamatan penerbangan.[3] Selain itu, dalam konsumsi publik,

EMI juga menjadi perhatian dalam perangkat medis, di mana gangguan pada sinyal dapat menyebabkan malfungsi pada alat pacu jantung, monitor EKG, atau perangkat medis lainnya yang digunakan di rumah sakit. Tidak hanya itu, peralatan rumah tangga seperti *microwave*, televisi, atau router WiFi juga dapat menjadi sumber EMI yang mengganggu kinerja perangkat lain di sekitarnya. Gambar 2.1 menunjukkan EMI berperan dalam kehidupan sehari-hari pada berbagai peralatan.[4]



Gambar 2.1 Spektrum Elektromagnetik[4]

Tantangan dalam mengelola EMI menjadi semakin kompleks seiring meningkatnya penggunaan perangkat elektronik. Oleh karena itu, penelitian dan inovasi terus dilakukan untuk mengembangkan material baru dengan kemampuan perlindungan EMI yang lebih baik, seperti komposit berbasis serat alami, nanomaterial konduktif, atau lapisan pelindung berbasis polimer konduktif. Dengan langkah-langkah yang tepat, efek negatif EMI dapat diminimalisir sehingga perangkat elektronik dapat beroperasi dengan lebih andal dan aman dalam berbagai lingkungan.[5]

2.2 Perlindungan Interferensi Elektromagnetik

Perlindungan terhadap interferensi elektromagnetik (*EMI shielding*) merupakan teknik yang digunakan untuk menghalangi atau memantulkan kembali gelombang elektromagnetik agar tidak mengganggu perangkat elektronik lainnya yang memiliki sifat konduktif. Kinerja material pelindung dievaluasi menggunakan parameter *shielding effectiveness* yang disebut dengan SE. SE dari suatu material didefinisikan sebagai pelemahan gelombang elektromagnetik yang merambat yang dihasilkan oleh material *shielding*. SE dinyatakan dalam desibel (dB) sebagai fungsi dari logaritma *rasio* kejadian dan listrik (E) atau magnetik (H) yang ditransmisikan. Sehingga rumus untuk mencari nilai SE dapat dilihat pada persamaan (2.1).[6]

$$SE = 20\log_{10} \left(\frac{E_i}{E_t} \right) = SE = 20\log_{10} \left(\frac{H_i}{H_t} \right) = SE = 10\log_{10} \left(\frac{P_i}{P_t} \right) \quad (2.1)$$

Dimana

E_i = medan listrik sebelum pelindung dipasang.

E_t = medan listrik setelah pelindung dipasang.

H_i = medan magnet sebelum pelindung dipasang.

H_t = medan magnet setelah pelindung dipasang.

P_i = adalah daya incident

P_t = adalah daya yang ditransmisikan.

Jika alat ukur penerima dalam satuan tegangan, persamaan yang digunakan adalah:

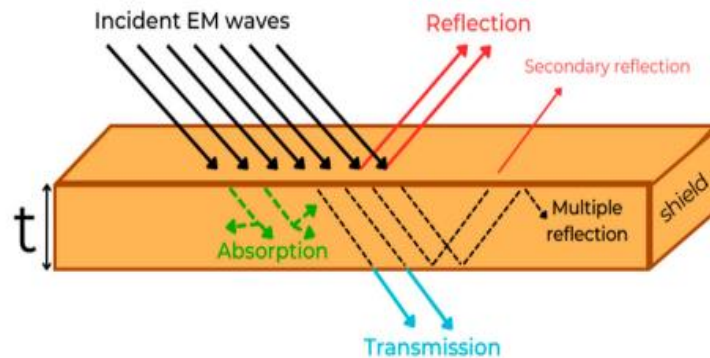
$$SE = 20\log \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad (2.2)$$

Dimana:

V_1 adalah tegangan pada saat pelindung dipasang.

V_2 adalah tegangan pada saat pelindung tidak dipasang.

Mekanisme utama dalam EMI *shielding* terdiri dari tiga aspek utama, yaitu refleksi, absorpsi dan multipel refleksi yang dapat dilihat pada gambar 2.2.[7]



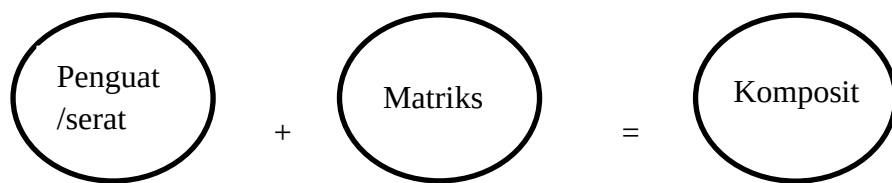
Gambar 2.2 Mekanisme EMI *shielding* [6]

Secara umum EMI *shielding* merupakan gabungan dari tiga mekanisme utama, yaitu refleksi, absorpsi, dan multiple refleksi.

1. Refleksi merupakan mekanisme pelemahan gelombang elektromagnetik akibat pemantulan gelombang pada permukaan material pelindung karena adanya perbedaan impedansi.
2. Absorpsi adalah mekanisme pelemahan yang terjadi ketika gelombang elektromagnetik yang masuk ke dalam material kehilangan energinya akibat diserap oleh material dan sebagian diubah menjadi panas.
3. Multipel refleksi merupakan mekanisme pelemahan akibat pemantulan gelombang secara berulang di dalam struktur material, sehingga meningkatkan peluang terjadinya absorpsi dan mengurangi gelombang yang ditransmisikan.

2.3 Material Komposit

Material komposit terdiri dari dua elemen utama yang memiliki peran berbeda, yaitu bagian penguat (*reinforcement*) dan matriks (pengikat). Agar komposit yang dihasilkan memiliki karakteristik yang optimal, diperlukan pemilihan yang tepat antara jenis matriks dan penguat yang digunakan. Struktur dan komposisi material komposit dapat dilihat pada gambar 2.3.[8]



Gambar 2.3 Komposisi untuk pembuatan komposit.[8]

Penguat berfungsi sebagai pengikat dari serat alam seperti OPEFB dan dikombinasikan dengan matriks polimer seperti resin epoksi untuk meningkatkan ketahanan dan fleksibilitas material serta penambahan *filler* seperti MWCNT dapat dilakukan untuk meningkatkan konduktivitas dan ketahanan terhadap material EMI *shielding*. [9]

2.3.1 Penguat (Reinforced)

Reinforcement dalam material komposit merupakan elemen utama yang berfungsi untuk meningkatkan kekuatan mekanik, ketahanan terhadap beban, serta stabilitas struktural material. *Reinforcement* dapat berasal dari berbagai jenis material, baik alami maupun sintetis, yang masing-masing memiliki karakteristik dan keunggulannya sendiri.

Serat sintetis seperti serat karbon, serat kaca menawarkan kekuatan mekanik yang lebih tinggi, ketahanan terhadap suhu ekstrem, serta ketahanan terhadap korosi, sehingga lebih cocok untuk aplikasi yang memerlukan performa tinggi, seperti di industri penerbangan, otomotif, dan konstruksi. Sementara itu, Serat alami seperti OPEFB, serat jute, serat kenaf, dan serat rami, banyak digunakan karena sifatnya yang ramah lingkungan, mudah didaur ulang, serta memiliki biaya produksi yang relatif rendah. salah satu keunggulan dari OPEFB merupakan serat alami lokal yang berasal dari indonesia dan limbah produsen utama yang ada di Lampung yang memiliki senyawa kimia seperti selulosa untuk meningkatkan interaksi antar serat sehingga dapat dimanfaatkan sebagai material EMI *shielding*. [10]

Daw Mohammad Abdalhadi menjelaskan bahwa OPEFB memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai material komposit berbasis serat alami yang dapat digunakan membuat kotak perisai untuk *shielding* interferensi elektromagnetik. [11] Gambar 2.4 contoh dari OPEFB



Gambar 2.4 OPEFB [11]

Gambar 2.4 Menunjukkan bentuk fisik dari OPEFB dengan penjelasan mengenai karakteristik material ditunjukan pada tabel 2.1 mengenai komposisi senyawa kimia utama yang terkandung dalam OPEFB.[12]

Tabel 2.1 Menunjukkan komposisi kimia dari OPEFB[12]

Senyawa Kimia	Persentase %
Selulosa	43,0 - 43,7
Hemiselulosa	22,9 – 23,7
Lignin	21,3 – 22,1

Tabel 2.1 Menunjukkan bahwa OPEFB tersusun atas selulosa sebesar 43,0–43,7%, hemiselulosa sebesar 22,9–23,7%, dan lignin sebesar 21,3–22,1%. Kandungan selulosa yang tinggi menjadi komponen utama penyusun struktur serat yang berperan dalam memberikan kekuatan dan menjaga ikatan antar serat. Meskipun kandungan selulosanya tinggi, OPEFB memiliki konduktivitas listrik yang rendah oleh karena itu, peningkatan konduktivitas tidak dilakukan dengan menghilangkan selulosa, melainkan melalui penambahan material konduktif yang dapat melapisi atau berinteraksi dengan permukaan serat. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah proses polimerisasi anilin untuk membentuk polianilin pada permukaan OPEFB. Kehadiran polianilin yang bersifat konduktif diharapkan dapat meningkatkan konduktivitas antar serat, sementara fungsi selulosa sebagai penyusun utama struktur OPEFB tetap dipertahankan.

2.3.2 Polimerisasi

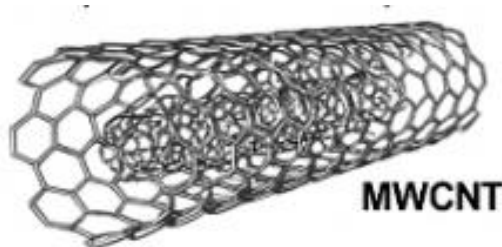
Polimerisasi merupakan proses kimia ketika unit-unit kecil yang disebut monomer bergabung membentuk molekul yang lebih besar yang disebut polimer. Salah satu hasil dari proses ini adalah terbentuknya polimer yang bersifat konduktif secara intrinsik atau dikenal sebagai *Intrinsically Conductive Polymer* (ICP). Salah satu contoh ICP adalah polianilin (PANI). Pada penelitian ini, polimerisasi anilin dilakukan untuk membentuk lapisan PANI pada permukaan OPEFB. Kehadiran lapisan PANI pada permukaan OPEFB dapat membentuk jalur konduktif yang memudahkan perpindahan muatan listrik di dalam material. Dengan demikian, konduktivitas listrik OPEFB yang pada awalnya bersifat isolator dapat ditingkatkan sehingga lebih berpotensi digunakan sebagai material EMI *shielding*. [13]

Claudia Merlini memaparkan pembuatan komposit serat serabut kelapa *coconut fiber* (CF) dan PANI dengan melalui polimerisasi oksidatif *in situ* anilin (ANI) dan menggunakan besi (III) klorida heksahidrat atau amonium persulfat (APS) sebagai oksidan dan diperkuat dengan poliuretan (PU). Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposit PU / CF-PANI menunjukkan konduktivitas listrik yang lebih tinggi daripada campuran PU dan PU/ PANI murni. [14]

2.3.3 *Multi-walled carbon nanotube* (MWCNT)

Multi-walled carbon nanotube (MWCNT) merupakan salah satu jenis nanotube karbon yang memiliki diameter berkisar antara 2 hingga 50 nm dengan jarak antar lapisan dinding sekitar 0,34–0,36 nm. MWCNT memiliki struktur yang lebih kompleks dan stabil secara mekanik akibat adanya interaksi antar lapisan.

Selain itu, keberadaan banyak dinding pada MWCNT memberikan jalur konduktif yang lebih banyak, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan sifat konduktivitas listrik dan ketahanan terhadap kerusakan struktural. Gambar 2.5 menunjukkan bentuk dari MWCNT.[15]



Gambar 2.5 MWCNT[16]

Salah satu keunggulan MWCNT adalah kepadatannya yang sangat rendah serta kemampuannya untuk bertahan pada suhu tinggi dan kerapatan arus yang besar. Dengan menambahkan serbuk MWCNT dalam kisaran 5–10% konduktivitas listrik suatu matriks polimer dapat meningkat secara signifikan. Meskipun secara alami bersifat konduktif, MWCNT memiliki kelemahan berupa kecenderungan menggumpal akibat gaya tarik antar partikelnya. Hal ini menyebabkan distribusi partikel menjadi tidak merata dalam matriks, sehingga performa listrik dan mekanik material menurun sehingga untuk mengatasi hal tersebut dilakukan proses fungsionalisasi yaitu modifikasi kimia pada permukaan MWCNT.

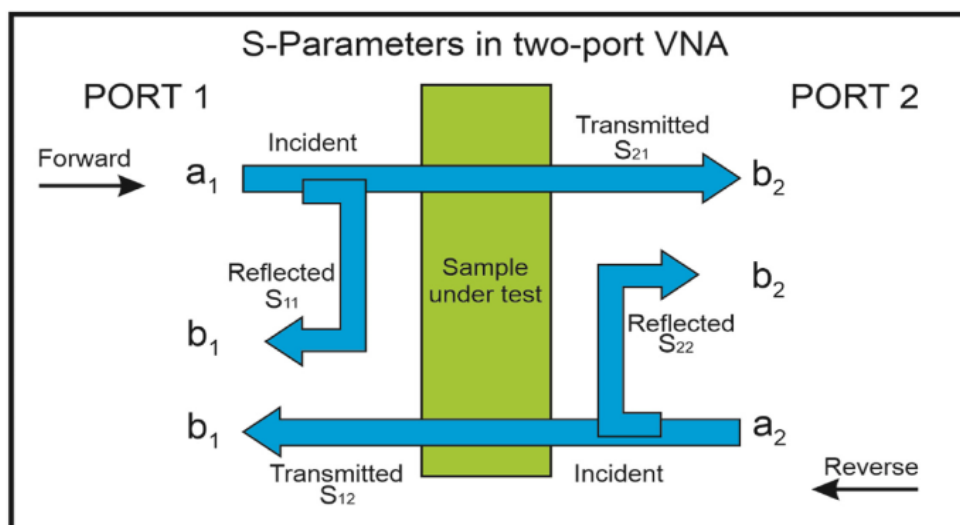
2.3.4 Fungsionalisasi

Fungsionalisasi merupakan proses modifikasi permukaan MWCNT untuk meningkatkan dispersi dan interaksi dengan matriks polimer. Proses fungsionalisasi dilakukan menggunakan *asam nitrat* (HNO_3) dan *hidrogen peroksida* (H_2O_2). HNO_3 digunakan untuk menghilangkan sisa katalis logam dan

pengotor yang masih terdapat pada permukaan MWCNT serta membentuk gugus fungsi yang mengandung oksigen pada permukaannya. Selanjutnya, H_2O_2 digunakan sebagai agen oksidator yang membantu proses pemurnian dan pembersihan permukaan MWCNT dari pengotor yang tersisa tanpa merusak struktur utamanya secara signifikan sehingga MWCNT yang akan dicampurkan ke dalam resin epoksi lebih reaktif.[17].

2.4 S-Parameter Vector Network Analyzer (VNA)

Vector Network Analyzer (VNA) merupakan instrumen yang digunakan untuk mengukur karakteristik gelombang elektromagnetik pada suatu material atau perangkat dalam domain frekuensi. VNA bekerja dengan menginjeksikan sinyal elektromagnetik ke material uji melalui port masukan dan mengukur besarnya gelombang yang dipantulkan maupun diteruskan pada port keluaran. Hasil pengukuran dinyatakan dalam bentuk *scattering parameters* (S-parameters) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 di bawah ini.[18]



Gambar 2.6 Skematik S-Parameter VNA[18]

Gambar 2.6 Menunjukkan S-parameter (*Scattering Parameter*) merupakan parameter yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik refleksi dan transmisi gelombang elektromagnetik pada suatu jaringan dua port (*two-port network*) dengan 4 parameter utama, yaitu S_{11} , S_{21} , S_{12} , dan S_{22} .

- S_{11} (*Input Reflection Coefficient*) adalah parameter yang menunjukkan besarnya sinyal yang dipantulkan kembali ke Port 1 ketika sinyal dimasukkan melalui Port 1.
- S_{21} (*Forward Transmission Coefficient*) adalah parameter yang menunjukkan besarnya sinyal yang berhasil ditransmisikan dari Port 1 menuju Port 2.
- S_{12} (*Reverse Transmission Coefficient*) adalah parameter yang menunjukkan besar sinyal yang ditransmisikan dari Port 2 menuju Port 1
- S_{22} (*Output Reflection Coefficient*) adalah parameter yang menunjukkan besarnya sinyal yang dipantulkan kembali ke Port 2 ketika sinyal dimasukkan melalui Port 2.

Nilai S-parameter dapat digunakan untuk pengukuran *shielding effectiveness*, Apabila nilai S-parameter sudah dalam bentuk desibel, maka persamaan untuk *shielding effectiveness* (SE) adalah sebagai berikut :

$$SE_T = SE_R + SE_A \quad (2.3)$$

$$SE_R = 10 \times \log_{10} \left(\frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{21}|^2} \right) \quad (2.4)$$

$$SE_A = 10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{1 - |S_{11}|^2} \right) \quad (2.5)$$

Dimana :

SE_T = Nilai SE total

SE_R = rugi-rugi akibat refleksi gelombang elektromagnetik pada permukaan material.

SE_A = rugi-rugi akibat penyerapan energi gelombang di dalam material.

Nilai *shielding effectiveness* (SE) yang diperoleh dari parameter refleksi (S_{11}) dan transmisi (S_{21}) dipengaruhi oleh karakteristik fisik material. Karakteristik tersebut meliputi ketebalan material, jenis material dan konduktivitas listrik material. Secara teoritis, mekanisme pemantulan gelombang elektromagnetik pada material terjadi melalui refleksi dan absorpsi. Hubungan teoritis antara mekanisme absorpsi dan karakteristik material dapat dijelaskan menggunakan Persamaan (2.6).:

$$SE_A = 20 \log e^{\left(\frac{-t}{\delta}\right)} = 8,7 \left(\frac{t}{\delta}\right) \quad (2.6)$$

Persamaan (2.6) menunjukkan bahwa nilai SE akibat absorpsi (SE_A) dipengaruhi oleh ketebalan material (t) dan nilai *skin depth* (δ). Semakin kecil nilai *skin depth* (δ) maka semakin sulit gelombang elektromagnetik menembus material sehingga energi gelombang yang diserap akan semakin besar.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) nilai *skin depth* (δ) berbanding terbalik dengan akar kuadrat konduktivitas listrik. Dengan demikian, peningkatan konduktivitas material akan menyebabkan penurunan nilai *skin depth* sehingga kemampuan material dalam meredam gelombang elektromagnetik menjadi lebih baik.

$$SE_R = 20 \log \left(\frac{Z_o}{4Z_s} \right) \quad (2.8)$$

Selain mempengaruhi mekanisme absorpsi, konduktivitas listrik juga mempengaruhi mekanisme refleksi gelombang elektromagnetik (SE_R). Persamaan (2.8) menunjukkan bahwa nilai SE akibat refleksi (SE_R) dipengaruhi oleh perbandingan antara impedansi udara (Z_o) dan impedansi material (Z_s).

$$Z_o = 377 \, \Omega \text{ dan } Z_s = \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}} \quad (2.9)$$

Berdasarkan Persamaan (2.9) peningkatan konduktivitas menyebabkan nilai impedansi material (Z_s) menurun. Penurunan impedansi material (Z_s) tersebut meningkatkan perbedaan karakteristik impedansi antara udara dan material sehingga gelombang elektromagnetik yang datang akan lebih banyak dipantulkan pada permukaan material.[19]

2.5 Penelitian terdahulu

F Badrul dkk.[20] Meneliti komposit konduktif berbasis *low-density polyethylene* (LDPE) dengan *filler carbon black* (CB) dan penambahan OPEFB. Komposit dibuat dengan metode *melt blending* dan *compression molding* dengan variasi OPEFB sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20%. Pengujian dilakukan untuk melihat sifat listrik komposit yang berkaitan dengan potensi penggunaannya sebagai material pelindung interferensi elektromagnetik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konduktivitas listrik komposit LDPE/CB tanpa serat sebesar $1,9 \times 10^{-4}$ S/cm, kemudian menurun menjadi $9,6 \times 10^{-5}$ S/cm (5%), $7,8 \times 10^{-5}$ S/cm (10%), $6,1 \times 10^{-5}$ S/cm (15%), dan $3,6 \times 10^{-5}$ S/cm (20%). Sehingga nilai tersebut masih termasuk kategori material konduktif. Rentang resistivitas ini menunjukkan bahwa komposit masih memiliki potensi untuk digunakan pada aplikasi *electromagnetic interference shielding* atau aplikasi elektronik lainnya yang memerlukan material konduktif.

Lakin dkk.[21] Meneliti sifat penyerapan gelombang mikro dari komposit OPEFB berbasis *polylactic acid* (PLA) yang diperkuat dengan *filler* MWCNT Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi potensi komposit OPEFB/PLA/MWCNT sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik pada rentang frekuensi X-

band. Komposit dibuat menggunakan metode *melt blending*, dengan komposisi MWCNT sebesar 6%, 10%, 14%, 18%, dan 22% berat dalam matriks OPEFB/PLA. OPEFB terlebih dahulu direndam dalam air selama 24 jam, kemudian dikeringkan, dihancurkan hingga ukuran sekitar 100 μm , dan dicampur dengan PLA serta MWCNT menggunakan *Brabender internal mixer* pada suhu 160°C selama 12 menit, kemudian dicetak menggunakan *hydraulic press*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai absorption loss (SE_A) meningkat seiring bertambahnya kandungan MWCNT. Nilai SE_A komposit meningkat dari 7,4 dB pada frekuensi 8 GHz hingga mencapai nilai maksimum 15,2 dB pada frekuensi 11,75 GHz pada komposit dengan 22 wt.% MWCNT. Hasil ini menunjukkan bahwa komposit OPEFB/PLA/MWCNT memiliki kemampuan penyerapan gelombang mikro yang cukup baik dan berpotensi digunakan sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik pada rentang frekuensi *X-band*.

Widyawati dkk [22] Meneliti konduktivitas listrik, kekuatan tarik, dan efektivitas perisai elektromagnetik (SE) dari komposit serat kelapa yang dilapisi PANI dan diperkuat dengan MWCNT. Tujuannya adalah mengevaluasi potensi komposit serat kelapa sebagai pelindung terhadap interferensi elektromagnetik (EMI). Serat kelapa direndam dalam larutan NaOH 2% selama 2 jam, kemudian dipolimerisasi dengan PANI. Selanjutnya, serat kelapa dicampur dengan resin epoksi yang mengandung MWCNT dan dicetak menggunakan metode pengepresan dengan variasi berat serat kelapa 5%, 10%, dan 15%. Pengujian yang dilakukan meliputi konduktivitas listrik (metode empat titik), uji tarik (standar ASTM D638-1), dan uji SE menggunakan dua antena *monopole* pada frekuensi 1 – 20 MHz.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konduktivitas listrik meningkat seiring penambahan serat kelapa, dengan nilai tertinggi 0,0458 S/m pada komposit 15% serat kelapa. Namun, kekuatan tarik menurun, dengan nilai tertinggi 26,78 MPa pada komposit 5% serat kelapa. Untuk pengujian SE, komposit serat kelapa menunjukkan nilai SE tertinggi -7,69 dB, yang masih tergolong rendah untuk aplikasi perlindungan EMI optimal.

Tio dkk [23] Meneliti pengaruh persentase volume dan perlakuan kimia terhadap MWCNT untuk meningkatkan konduktivitas komposit *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Penelitian ini bertujuan menjadikan CFRP lebih efektif sebagai material pelindung terhadap sambaran petir, mengingat sifat dielektrik matriks polimer yang kurang mendukung penghantaran listrik. material yang digunakan terdiri dari serat karbon 3K twill, resin epoksi, dan MWCNT yang telah difungsionalisasi dengan *asam nitrat* (HNO_3). Komposit dibuat dalam beberapa variasi jumlah lapisan serat karbon (dua dan empat lapisan) dan persentase MWCNT dalam resin epoksi (2%, 5%, 8%, 10%) menggunakan metode *vacuum infusion molding*. Proses fungsionalisasi MWCNT dilakukan dengan merendamnya dalam larutan HNO_3 3M yang dipanaskan, diikuti pencucian dengan air deionisasi dan pengeringan. Campuran MWCNT dan resin epoksi dituangkan ke dalam serat karbon menggunakan teknik *vacuum infusion*, lalu dilakukan curing pada suhu ruang selama 8 jam.

Hasil penelitian menunjukkan peningkatan konduktivitas yang signifikan dengan menambah lapisan serat karbon, mencapai nilai konduktivitas tertinggi 0,634 S/m pada komposit dengan empat lapisan serat karbon dan 10% MWCNT. Selain itu, fungsionalisasi MWCNT meningkatkan konduktivitas dibandingkan MWCNT

tanpa perlakuan kimia karena interaksi yang lebih baik antara MWCNT dan matriks polimer

Waleed G, dkk [24] Meneliti nanofiber komposit *polyvinyl alcohol* (PVA) dengan *filler* MWCNT untuk aplikasi *electromagnetic interference shielding* (EMI *shielding*). Komposit dibuat menggunakan metode *electro spinning* dengan variasi kandungan MWCNT sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konduktivitas listrik meningkat seiring bertambahnya kandungan MWCNT, dari $1,61 \times 10^{-8}$ S/cm (5 wt%), $3,18 \times 10^{-8}$ S/cm (10 wt%), $2,72 \times 10^{-7}$ S/cm (15 wt%), hingga mencapai $6,71 \times 10^{-7}$ S/cm (20 wt%), atau sekitar 21 hingga 866 kali lebih tinggi dibandingkan PVA murni yang memiliki konduktivitas $7,75 \times 10^{-10}$ S/cm. Peningkatan konduktivitas tersebut diikuti oleh kenaikan nilai *shielding effectiveness* (SE) dari 10 dB (5 wt%), 19 dB (10 wt%), 21 dB (15 wt%), hingga 25 dB (20 wt%) pada frekuensi optimum 4 GHz. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan kandungan MWCNT mampu memperbaiki jalur konduksi listrik dalam komposit sehingga meningkatkan kemampuan material dalam meredam interferensi elektromagnetik, menjadikan PVA/MWCNT berpotensi sebagai material EMI *shielding* yang ringan dan fleksibel.

Teklu dkk [25] meneliti modifikasi permukaan serat kapas menggunakan PANI melalui metode *in situ oxidative polymerization* dengan tujuan menghasilkan serat alam yang memiliki sifat konduktif untuk aplikasi *electromagnetic interference shielding* (EMI *shielding*). Proses deposisi dilakukan dengan merendam serat dalam

larutan HCl, kemudian menambahkan anilin sebagai monomer dan FeCl_3 sebagai oksidator hingga terbentuk lapisan PANI pada permukaan serat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa PANI berhasil mengubah serat kapas yang semula bersifat isolator dengan konduktivitas $3,42 \times 10^{-10}$ S/cm sehingga menjadi $1,54 \times 10^{-4}$ S/cm. Peningkatan ini terjadi karena terbentuknya konduktif dari PANI yang memfasilitasi delokalisasi elektron sepanjang rantai polimer.

Penulis menyimpulkan bahwa pengolahan serat alam menggunakan PANI direkomendasikan untuk meningkatkan sifat konduktif serat, sehingga material tersebut berpotensi digunakan pada *electromagnetic interference shielding*. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan serupa dapat diterapkan pada serat OPEFB dengan menggunakan PANI berfungsi sebagai fase konduktif tambahan untuk mengatasi sifat isolator dari OPEFB.

Ahmed dkk [26] meneliti proses fungsionalisasi MWCNT *menggunakan asam nitrat* (HNO_3) yang dilanjutkan dengan *hidrogen peroksida* (H_2O_2) melalui metode *ultrasonikasi*. Proses fungsionalisasi ini dilakukan karena MWCNT memiliki kecenderungan untuk mengalami aglomerasi akibat gaya *van der Waals* yang kuat, sehingga menyebabkan dispersi yang kurang homogen dalam matriks komposit. Perlakuan HNO_3 menghasilkan gugus fungsi oksigen seperti *karbonil* ($\text{C}=\text{O}$) pada permukaan MWCNT, sedangkan H_2O_2 digunakan untuk melanjutkan proses oksidasi secara lebih ringan guna meminimalkan kerusakan struktur nanotube.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa MWCNT yang telah difungsionalisasi memiliki dispersi yang lebih baik dibandingkan MWCNT tanpa perlakuan. MWCNT terfungsionalisasi masih dapat terdispersi dalam *etanol* selama lebih dari 72 jam, sedangkan MWCNT tanpa perlakuan mulai mengendap setelah sekitar 2

jam. Oleh karena itu, fungsionalisasi menggunakan HNO_3 dan H_2O_2 direkomendasikan karena dapat meningkatkan dispersi MWCNT yang pada akhirnya berpotensi meningkatkan konduktivitas listrik dan nilai *shielding effectiveness*.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun waktu dan tempat penelitian ini dilaksanakan pada:

Waktu : Juni 2025 – Juni 2026

Tempat : Laboratorium Teknik Elektro Universitas Lampung.

Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT)

Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Sub Laboratorium

Elektronika Cisitru

3.2 Jadwal Kegiatan Penelitian

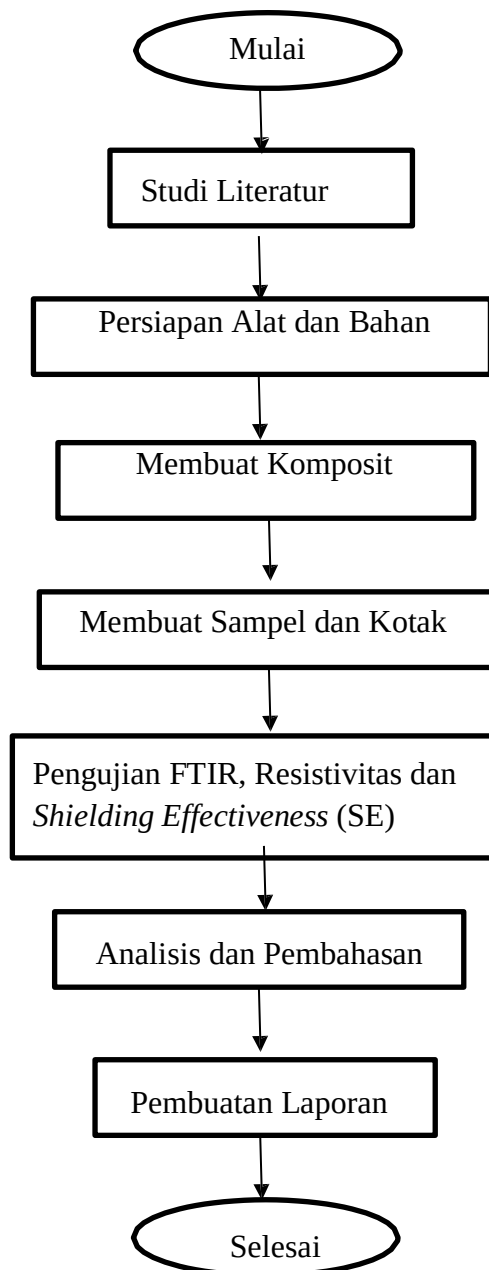
Adapun jadwal kegiatan penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	Juni 25	Juli-agst 25	Sept-Okt 25	Nov-Des 25	Jan-Feb 25	Mar-Apr 25	Mei 26	Juni 26
1	Studi literatur								
2	Perancangan metode								
3	Seminar Usul								
4	Pembuatan material								
5	Pengujian dan pengambilan data								
6	Analisis pembahasan								
7	Seminar Komprehensif								

3.3 Diagram Alir Penelitian (Flowchart)

Diagram alir pada penelitian ini terdapat pada gambar 3.1 yang menunjukkan langkah kerja penelitian. Dimulai dengan studi literatur, perancangan metode, mempersiapkan alat dan material yang akan digunakan, melakukan pembuatan kotak perisai yang akan diuji, melakukan pengukuran resistivitas, pengukuran *shielding effectiveness* (SE) lalu data dianalisis untuk mendapatkan kesimpulan.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

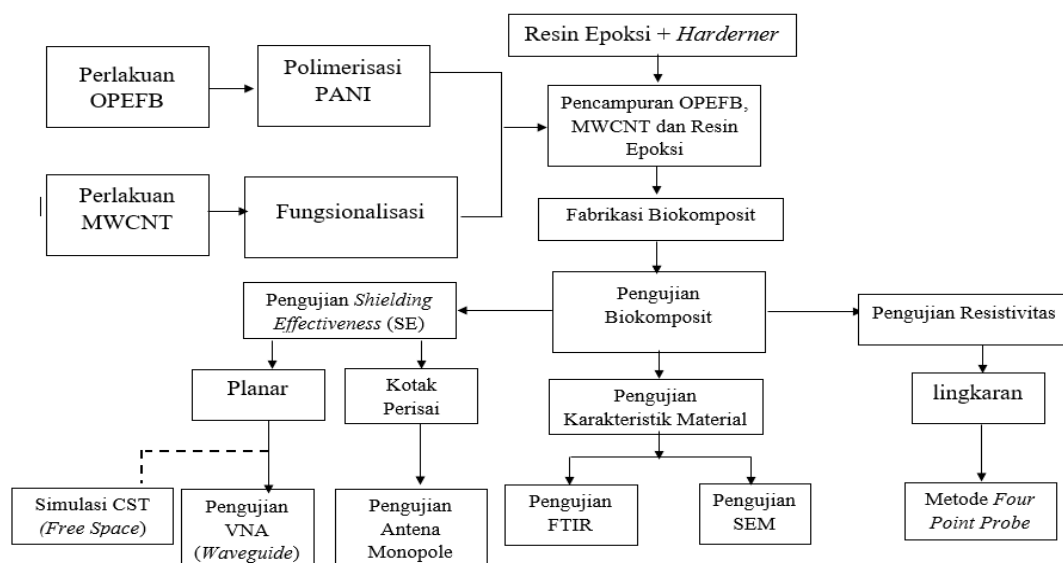
3.4 Alat dan Bahan yang digunakan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1 buah gelas ukur (100mL).
- 1 buah gelas beker (1 Liter) dan 2 buah gelas beker (500 mL).
- 1 buah Labu (500 mL).
- *Hot plate magnetic stirrer*.
- Timbangan.
- Sendok.
- Gunting atau cutter
- Penggaris
- Mixer
- Sarung tangan.
- Cetakan ukuran 17x17 cm
- NaOH 2%
- OPEFB 1 kg
- Cairan *Polyvinyl alcohol* (PVA)
- *Asam klorida* (HCl)
- Anilin ($C_6H_5NH_2$)
- *Ammonium Persulfate* (APS)
- 5 Liter Air Aquades
- *Resin Lycal 1011*
- MWCNT
- HNO_3
- H_2O_2 30%
- Plastik
- Generator Fungsi
- Osiloskop
- Dua Antena *Monopole*
- Laptop dan Alat Tulis

3.5 Prosedur penelitian

Prosedur penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan mulai dari pembuatan bahan hingga proses pengujian yang dibagi menjadi beberapa tahapan yang ditampilkan pada diagram blok gambar 3.2 di bawah ini



Gambar 3. 2 Diagram Blok Penelitian

Pembuatan spesimen biokomposit dibagi menjadi 3 bagian yaitu perlakuan terhadap OPEFB, Polimerisasi OPEFB dilapisi polianilin dan fungsionalisasi MWCNT.

3.5.1 Perlakuan Terhadap OPEFB

Proses perlakuan OPEFB dilakukan untuk mengurangi kandungan lignin guna meningkatkan daya lekat antara serat dengan matriks polimer. Berikut adalah tahapan yang dilakukan dalam perlakuan OPEFB:

1. Menyediakan OPEFB yang sudah dibersihkan, ditunjukkan pada Gambar 3.3



Gambar 3. 3 OPEFB

2. Merendam OPEFB dengan NaOH 2 % selama 2 jam ditunjukkan Gambar 3.4



Gambar 3. 4 Perendaman OPEFB

3. OPEFB yang sudah direndam kemudian dicuci dengan Akuades hingga bersih ditunjukkan pada Gambar 3.5



Gambar 3. 5 Pencucian OPEFB

4. Kemudian OPEFB dioven dengan suhu 110 °C selama 6 jam ditunjukkan pada Gambar 3.6



Gambar 3. 6 Hasil OPEFB

3.5.2 Polimerisasi OPEFB Dilapisi Polianilin

Polimerisasi OPEFB dilakukan untuk meningkatkan konduktivitas. Adapun tahapan proses yang perlu dilakukan sebagai berikut:

1. OPEFB yang sudah diberikan perlakuan kimia kemudian dipotong 10 mm dan ditimbang sebanyak 25 gram ditunjukkan pada gambar 3.7



(a)

(b)

Gambar 3. 7 (a) Berat kosong dari wadah, (b) berat dari OPEFB sebesar 25 gram

2. Dilakukan pengenceran HCl (0,1 mol/L), Anilin (0,2 mol/L) dan APS (0,1 mol/L) ditunjukkan pada gambar 3.8



Gambar 3. 8 penggunaan dari Anilin, HCl dan APS

3. Kemudian dicampurkan 25 gram serat dan 200 mL HCl (0,1 mol/L) lalu larutkan menggunakan HPMS selama 10 menit. Setelah itu ditambahkan 200 mL anilin (0,2 mol/L) kemudian larutkan menggunakan HPMS selama 10 menit. Lalu ditambahkan 160 mL APS (0,1 mol/L) dan kembali dilarutkan menggunakan HPMS ditunjukkan pada gambar 3.9



Gambar 3. 9 Melarutkan Anilin, HCl dan APS menggunakan HPMS

4. Hasil Polimerisasi kemudian disaring dan dicuci menggunakan akuades lalu dioven selama 6 jam dengan suhu 45 °C ditunjukkan pada gambar 3.10



Gambar 3. 10 Hasil polimerisasi OPEFB

3.5.3 Fungsionalisasi MWCNT

Adapun proses fungsionalisasi MWCNT yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menimbang MWCNT yang akan difungsionalisasi sebesar 8 gram ditunjukkan pada gambar 3.11



(a)

(b)

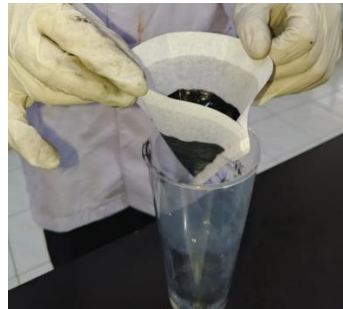
Gambar 3. 11 (a) Berat kosong dari wadah, (b) berat dari MWCNT sebesar 8 gram

2. Melakukan pengenceran HNO_3 65% (13,41 M) menjadi 3 M. Untuk melakukan pengenceran tersebut maka HNO_3 harus di campur akuades. Pada penelitian ini dibutuhkan 400 mL HNO_3 3 M. Diperlukan 83,68 mL HNO_3 65% dan akuades sebanyak sebanyak 316,32 mL untuk mencapai HNO_3 3M sebanyak 400 mL.
3. Melakukan pencampuran MWCNT 8 gram dengan 400 mL HNO_3 3M pada suhu 60° menggunakan HPMS selama 15 menit. Pemanasan dilakukan untuk membantu proses oksidasi MWCNT ditunjukkan pada gambar 3.12



Gambar 3. 12 Pencampuran MWCNT dengan HNO_3

4. Menyaring hasil pencampuran MWCNT dengan HNO_3 menggunakan kertas saring, ditunjukkan pada gambar 3.13



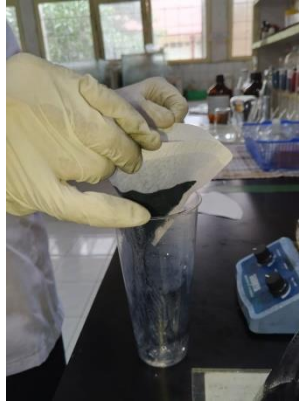
Gambar 3. 13 Proses penyaringan MWCNT dengan HNO_3

5. Melakukan pengenceran H_2O_2 50% menjadi 30%. Untuk melakukan pengenceran tersebut maka H_2O_2 harus di campur akuades. Pada penelitian ini dibutuhkan 325 mL H_2O_2 30%. Diperlukan 195 mL H_2O_2 50% dan akuades sebanyak sebanyak 130 mL untuk mencapai H_2O_2 30% sebanyak 325 mL yang ditunjukkan pada gambar 3.14



Gambar 3. 14 Pencampuran MWCNT dengan H_2O_2

6. MWCNT hasil penyaringan lalu dicampurkan ke dalam 325 mL H_2O_2 30% dengan perlakuan yang sama saat proses pencampuran HNO_3 ditunjukkan pada gambar 3.15



Gambar 3. 15 Penyaringan campuran hasil MWCNT

7. Hasil fungsionalisasi kemudian dikeringkan dengan oven dengan suhu 100°C selama 2 jam, ditunjukkan pada gambar 3.16



Gambar 3. 16 Hasil akhir fungsionalisasi MWCNT

Semua perhitungan untuk penyiapan larutan pada perlakuan OPEFB dan MWCNT di cantumkan pada lampiran 1

3.5.4 Pembuatan Kotak Perisai

Setelah dilakukan proses polimerisasi dan fungsionalisasi, selanjutnya yaitu Pembuatan kotak perisai yang terbuat dari OPEFB dengan *filler* MWCNT dengan menggunakan resin epoksi lyclall 1011 dan hardener dengan perbandingan 3:1 berikut proses yang dilakukan :

1. Melapisi cetakan 17 cm x 17 cm dengan *Polyvinyl alcohol* ditunjukkan pada

Gambar 3.17



Gambar 3. 17 Pelapisan kaca dengan *Polyvinyl Alcohol*

2. Potong-potong OPEFB menjadi 10 mm, lalu taburkan pada cetakan yang sudah dilapisi PVA yang ditampilkan pada Gambar 3.18



Gambar 3. 18 Penaburan OPEFB pada cetakan

3. Mencampurkan OPEFB 5,6 gram, MWCNT 2,8 gram, resin 42 gram dan hardener 14 gram untuk proses pembuatan pada komposisi OPEFB 10 – MWCNT 5 yang ditampilkan pada Gambar 3.19



Gambar 3. 19 Ukuran resin, hardener, MWCNT dan OPEFB

4. Kemudian ditutup kembali dengan kaca lalu press dan diamkan selama 8 jam untuk memastikan bahwa resin telah mengeras dan kemudian melepaskan spesimen dari cetakan kaca.
5. Setelah komposit mengeras, lepaskan spesimen dari cetakan kaca. Potong ukuran spesimen sesuai dengan kebutuhan masing-masing pengujian, proses pemotongan ditampilkan pada Gambar 3.20



Gambar 3. 20 Pemotongan Material Komposit Sesuai Spesifikasi Pengujian

6. Spesifikasi ukuran sampel antar pengujian berbeda satu dan yang lain, berikut ukuran sampel untuk keperluan pengujian :
 - Pengujian FTIR dan SEM, menggunakan material berbentuk persegi panjang berukuran 1 x 0,5 cm
 - Pengujian Resistivitas menggunakan material berbentuk lingkaran berdiameter 10,5 cm
 - Pengukuran *shielding effectiveness* menggunakan antena *monopole* pada frekuensi 1-20 MHz dengan Kotak Perisai berukuran 15 x 8 x 5 cm
 - Pengukuran *shielding effectiveness* menggunakan VNA pada frekuensi 5,85-8,2 GHz (rentang *C-Band*) dengan sampel planar persegi panjang berukuran 4 x 2,5 cm

3.6 Metode Pengukuran

Bagian ini dijelaskan metode yang digunakan untuk melakukan pengujian terhadap sampel dari penelitian. Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik kinerja alat berdasarkan parameter-parameter tertentu yang meliputi 3.6.1 pengujian Morfologi FTIR dan SEM, 3.6.2, Pengujian VNA S-Parameter, 3.6.3 pengukuran Antena *Monopole*, 3.6.4 pengukuran untuk resistivitas, 3.6.5 Simulasi menggunakan CST. Setiap pengujian dilaksanakan dengan prosedur yang sesuai standar untuk memastikan akurat dan validitas hasil yang diperoleh.

3.6.1 Pengujian Morfologi material

Pengujian morfologi material terdapat 2 jenis yang dilakukan yaitu Pengujian *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

3.6.1.1 Pengujian *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

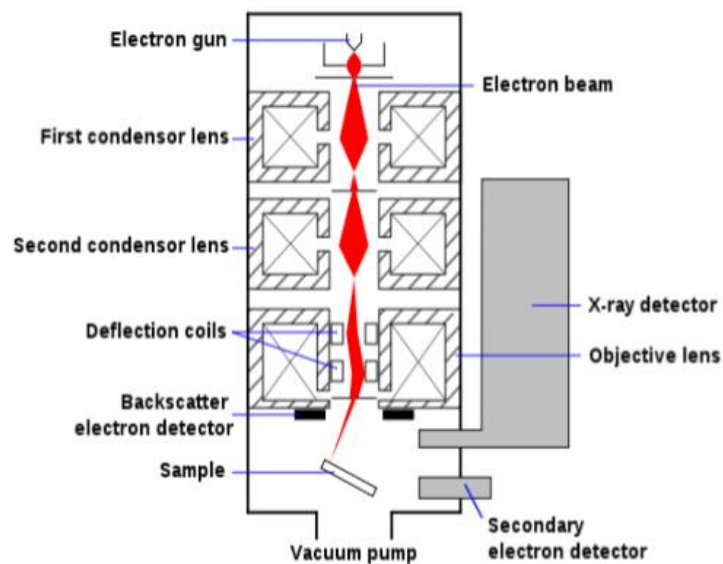
Pengujian *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada biokomposit OPEFB dengan *filler* MWCNT. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui perubahan struktur kimia yang terjadi setelah proses polimerisasi dan fungsionalisasi. Hasil FTIR digunakan sebagai dasar untuk menjelaskan pengaruh struktur kimia terhadap peningkatan nilai *shielding effectiveness* pada material komposit. Pada penelitian ini pengujian sampel dilakukan di UPT LTSIT Universitas Lampung dengan jenis FTIR yang digunakan adalah *Agilent Cary 630*. Gambar 3.21 bentuk dari alat FTIR *Agilent Cary 630*



Gambar 3. 21 Bentuk dari alat FTIR *Agilent Cary 630*

3.6.1.2 Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan instrumen mikroskopi analitik beresolusi tinggi yang digunakan untuk mengidentifikasi morfologi, ukuran nominal, dan bentuk serat dari suatu material biokomposit dengan batas resolusi mencapai 10 nm [3]. Secara skematik, proses pengujian SEM bekerja berdasarkan prinsip interaksi elektron dengan material. Pemindaian dimulai dengan menembakkan pancaran berkas elektron berenergi tinggi yang difokuskan tepat ke atas permukaan spesimen yang diuji ketika berkas elektron menabrak permukaan spesimen, terjadi interaksi yang menghasilkan pantulan elektron. Pantulan sinyal elektron ini kemudian ditangkap oleh detektor khusus dan diubah menjadi sinyal elektronik. Sinyal tersebut diteruskan dan diproyeksikan melalui tabung sinar katoda (CRT) atau layar monitor, sehingga menghasilkan citra visual beresolusi tinggi yang merepresentasikan gambaran topografi permukaan spesimen secara akurat. Adapun gambar 3.22 skematik pengujian SEM

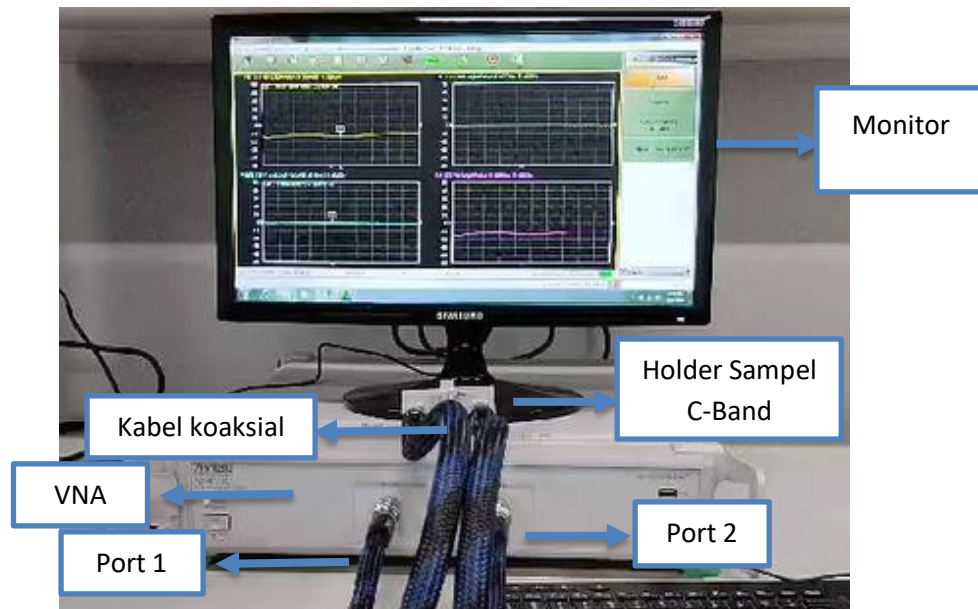


Gambar 3. 22 Skematik pengujian SEM

3.6.2 Pengujian VNA S-Parameter

Biokomposit OPEFB dengan *filler* MWCNT yang telah dibuat, selanjutnya dilakukan pengujian S-parameter untuk mengetahui karakteristik respon material terhadap gelombang elektromagnetik. Pengujian S-parameter dilakukan di BRIN Sub Laboratorium Elektronika di Cisit. Pengujian ini menggunakan alat *Vector Network Analyzer* (VNA), dengan jenis VNA yang digunakan adalah A-INFOWM 137WCAN. Data hasil pengukuran berupa parameter S_{21} kemudian digunakan untuk menghitung nilai SE pada rentang frekuensi pengujian 5,85 – 8,20 GHz.

Gambar 3.23 Rangkaian pengujian VNA S-Parameter



Gambar 3. 23 Rangkaian pengujian *shielding effectiveness*

Gambar 3.22 Menunjukkan rangkaian pengujian *shielding effectiveness* dilakukan dalam 2 keadaan, dimana keadaan pertama ketika sampel tidak dimasukkan ke dalam *sample holder*, data ini sebagai nilai acuan/referensi, sedangkan keadaan kedua ketika sampel diletakkan dalam *sample holder*.

Untuk data bentuk real – imajiner, persamaan yang digunakan untuk menghitung SE dari S-Parameter adalah sebagai berikut :

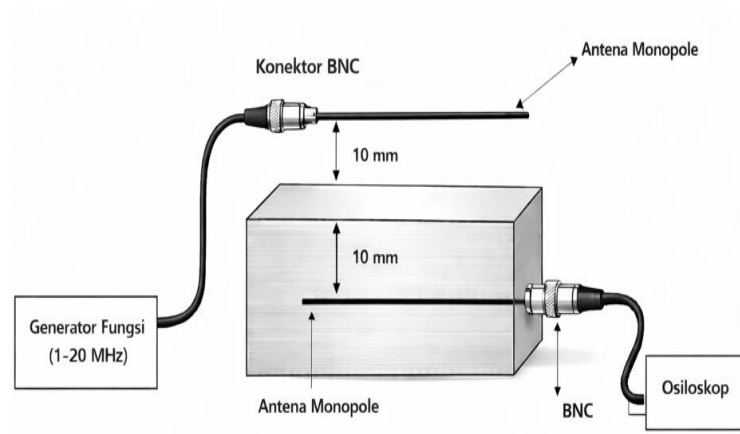
$$|S_{21}| = \sqrt{(Re S_{21})^2 + (Im S_{21})^2} \quad (3.1)$$

$$SE_T = 20 \log \frac{|S_{21} \text{ sampel}|}{|S_{21} \text{ referensi}|} \quad (3.2)$$

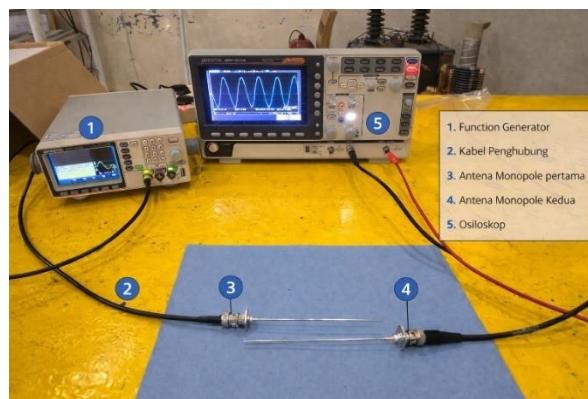
3.6.3 Pengukuran Kotak Perisai

Sistem pengukuran menggunakan dua antenna *monopole*, yaitu satu antenna sebagai pemancar (*transmitter*) yang dihubungkan ke *function generator* sebagai sumber sinyal dan ditempatkan di luar kotak, serta satu antenna lainnya sebagai penerima (*receiver*) yang terhubung ke osiloskop melalui konektor BNC dan ditempatkan di

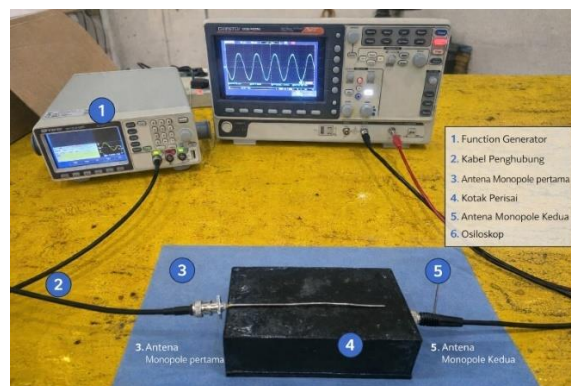
dalam kotak. Skematik pengujian kotak perisai ditunjukkan pada gambar 3.24 sampai gambar 3.26



Gambar 3. 24 Diagram skematik pengujian SE



Gambar 3. 25 Rangkaian uji SE saat kotak perisai tidak dipasang



Gambar 3. 26 Rangkaian uji SE saat kotak perisai dipasang

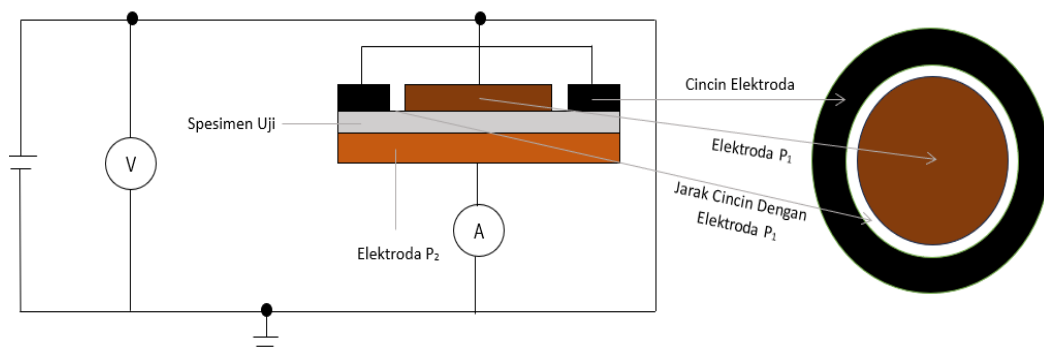
[illegible]

Tabel 3.3 Hasil Perhitungan nilai *shielding effectiveness*

No	Frekuensi (MHz)	Tegangan (mV)								
		OPEFB10 CNT 0	OPEFB10 CNT 2	OPEFB10 CNT 5	OPEFB20 CNT 0	OPEFB20 CNT 2	OPEFB20 CNT 5	OPEFB30 CNT 0	OPEFB30 CNT 2	OPEFB30 CNT 5
1	1									
2	2									
3	3									
-	-									
-	-									
20	20									

3.6.4 Pengukuran Resistivitas

Pengukuran nilai konduktivitas material komposit pada penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan pengukuran resistansi volume suatu material menggunakan metode pengukuran langsung. Gambar 3.27 menunjukkan pengukuran resistansi volume pada suatu material isolasi



Gambar 3. 27 Skematik pengujian resistivitas volume

Gambar 3.27 Menunjukkan skematik pengujian resistivitas volume. Jika suatu material ditempatkan diantara dua elektroda yang berbeda tegangan, maka arus

pada sumber tegangan nilainya sama dengan jumlah arus pada permukaan dengan arus volume. Oleh karena itu resistansi material bisa dituliskan sebagai berikut:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{V}{I_p + I_v} \quad (3.4)$$

Jika I_v dibuat sama dengan nol, resistansi yang terukur adalah resistansi permukaan

$$R_p = \frac{V}{I_p} \quad (3.5)$$

Jika I_p dibuat sama dengan nol, resistansi yang terukur adalah resistansi volume

$$R_v = \frac{V}{I_v} \quad (3.6)$$

Resistansi material bisa diukur dengan cincin konsentris yang terbuat dari dua elektroda piring dan satu elektroda cincin. Radius efektif elektroda pengukuran cincin konsentris adalah

$$\tau = \frac{2s}{\pi} \ln \cosh \frac{\pi g}{4s} \quad (3.7)$$

$$r = r_1 + \frac{g}{2} - \tau \quad (3.8)$$

Jika resistansi volume yang diketahui adalah R_v , maka resistivitas volume material isolasi adalah

$$\rho_v = \frac{R_v \pi r^2}{s} \quad (3.9)$$

Hitung Konduktivitas dengan rumus :

$$\sigma = \frac{1}{\rho_v} \quad (3.10)$$

Keterangan :

r_1 = Radius Elektroda P1 mm

g = Jarak sela elektroda P1 dengan elektroda cincin (mm)

s = Tebal Material (mm)

ρ_v = Resistivitas Volume

σ = Konduktivitas

Hasil dari perhitungan diatas lalu dimasukan ke dalam tabel ditampilkan pada tabel

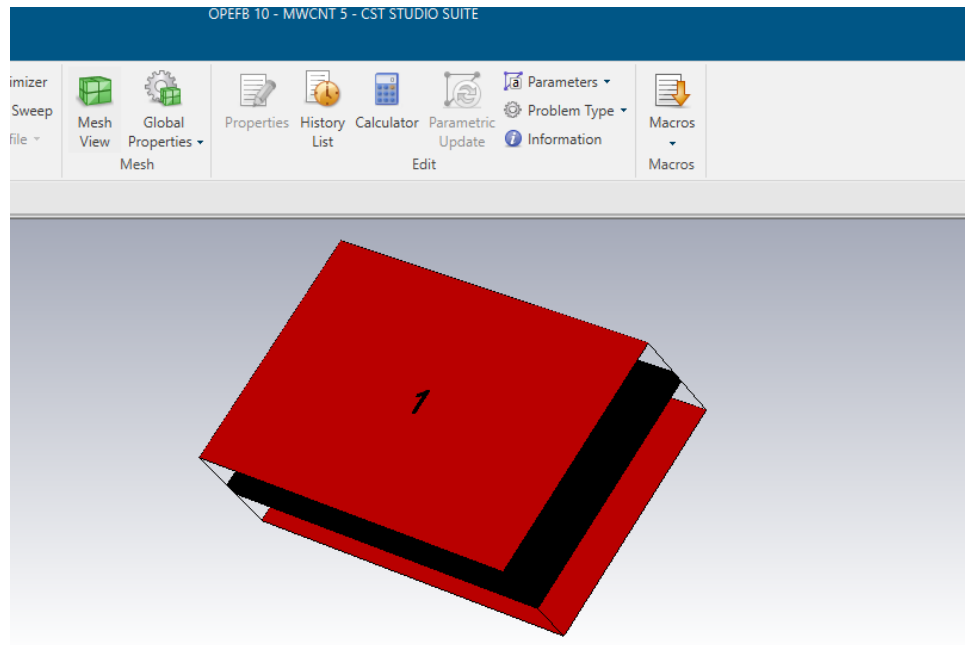
3.4 di bawah ini

Tabel 3.4 Data pengujian Resistivitas pada setiap sampel

Komposisi	Tegangan	Arus	Resistansi	Ketebalan	Resistivitas	Konduktivitas
	Volt	Ampere	Ω	mm	$\Omega.m$	S/m
OPEFB 10 – CNT 0						
OPEFB 10 – CNT 2						
OPEFB 10 – CNT 5						
OPEFB 20 – CNT 0						
OPEFB 20 – CNT 2						
OPEFB 20 – CNT 5						
OPEFB 30 – CNT 0						
OPEFB 30 – CNT 2						
OPEFB 30 – CNT 5						

3.6.5 Simulasi CST *Studio Suite*

Simulasi berperan sebagai pendekatan numerik yang merepresentasikan kondisi ideal atau mendekati kondisi sebenarnya, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi keakuratan data hasil pengujian. Melalui simulasi CST, pengaruh faktor eksternal yang berpotensi muncul selama proses pengukuran, seperti ketidaksempurnaan alat, noise, maupun ketidakseragaman sampel, dapat diminimalkan. Oleh karena itu, hasil simulasi digunakan sebagai referensi untuk memvalidasi apakah nilai SE yang diperoleh dari VNA telah mencerminkan karakteristik material secara akurat atau masih dipengaruhi oleh gangguan eksternal. Gambar 3.28 rancangan pada CST *Studio Suite*



Gambar 3. 28 Rancangan pada simulasi CST

Proses pembuatan simulasi CST memerlukan sejumlah parameter masukan agar kondisi material dapat menyerupai keadaan nyata. Parameter tersebut meliputi :

- ketebalan material,
- Massa jenis (ρ),
- Permittivitas relatif material (ϵ_r) pada setiap frekuensi.

Massa jenis (ρ) material didapatkan dari menghitung total massa (m) seluruh komponen penyusun biokomposit (serat, MWCNT, resin, dan hardener). Volume (v) total diperoleh dari dimensi cetakan, yaitu panjang dan lebar 17×17 cm serta ketebalan material sebagai tinggi.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.11)$$

Selain itu, celah antara port dan material pada model dibuat tertutup untuk menghindari kebocoran atau hamburan sinyal keluar dari domain simulasi. Dimensi

panjang dan lebar material dijaga tetap konstan karena seluruh variasi sampel memiliki ukuran yang sama, yaitu $4 \times 2,5$ cm, menyesuaikan dengan standar waveguide WR137 pada rentang frekuensi C-band.

Langkah berikutnya adalah menentukan nilai permitivitas relatif menggunakan metode *Nicholson-Ross-Weir*. Data awal yang diperlukan berupa parameter S_{11} dan S_{21} dari hasil pengukuran VNA, baik untuk sampel maupun referensi, dalam bentuk bilangan kompleks (*real* dan *imaginer*). Data tersebut digunakan untuk menghitung parameter antara yang disebut konstanta K , yang merepresentasikan parameter S setelah menghilangkan pengaruh propagasi internal material.

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2 \times S_{11}} \quad (3.12)$$

Selanjutnya menghitung koefisien refleksi (Γ), yang menggambarkan tingkat pemantulan gelombang pada permukaan material akibat perbedaan impedansi. Nilai Γ harus memenuhi prinsip kekekalan energi, sehingga nilai mutlaknya tidak boleh melebihi satu ($|\Gamma| \leq 1$). Pemilihan tanda positif atau negatif pada perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan syarat tersebut

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (3.13)$$

Setelah itu ditentukan faktor transmisi (T), yang menunjukkan besarnya pelemahan amplitudo dan perubahan fase gelombang akibat karakteristik internal material dengan rumus :

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21}) \times \Gamma} \quad (3.14)$$

kemudian dihitung parameter Propagasi menunjukkan ukuran kuantitatif dari bagaimana gelombang elektromagnetik berinteraksi dengan struktur internal

material per satuan jarak. Nilai parameter propagasi didapatkan dari persamaan berikut :

$$\frac{1}{\Lambda^2} = -\left(\frac{1}{2\pi d} \ln\left(\frac{1}{r}\right)\right)^2 \quad (3.15)$$

Tahap berikutnya adalah menghitung Permeabilitas relatif (μ_r) yaitu parameter yang menunjukkan seberapa besar kemampuan suatu material dalam menangkap dan mempertahankan pengaruh medan magnet dari suatu gelombang. Nilai ini diperoleh melalui suatu persamaan :

$$\mu_r = \frac{\left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right) \times \left(\frac{1}{\Lambda}\right)}{\sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (3.16)$$

Tahap selanjutnya adalah menentukan nilai permitivitas relatif (ϵ_r), yang menunjukkan kemampuan material dalam merespons medan listrik dari gelombang elektromagnetik. Parameter ini dihitung dengan mempertimbangkan panjang gelombang di ruang bebas, panjang gelombang cutoff pada waveguide, serta parameter propagasi yang telah diperoleh sebelumnya. Dalam perhitungan ini, permeabilitas relatif (μ_r) diasumsikan bernilai 1, karena material seperti serat alami dan MWCNT tidak memiliki sifat magnetik. Rumus permitivitas relatif (ϵ_r) :

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r} \left(\frac{1}{\lambda_c^2} + \frac{1}{\Lambda^2} \right) \quad (3.17)$$

Hasil permitivitas yang diperoleh harus memenuhi kaidah fisika. Nilai bagian real (ϵ') harus lebih besar dari satu, karena ruang hampa memiliki nilai permitivitas minimum. Sementara itu, bagian imajiner (ϵ'') tidak boleh bernilai negatif karena

merepresentasikan energi yang diserap oleh material. Nilai negatif akan bertentangan dengan prinsip kekekalan energi.

Parameter terakhir yang diperlukan dalam simulasi adalah nilai *loss tangent* ($\tan \delta$), yang diperoleh dari perbandingan antara bagian imajiner dan real permitivitas.

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (3.18)$$

Nilai ini kemudian dikombinasikan dengan data frekuensi dan ε_r dalam bentuk file *.txt*. File tersebut selanjutnya diimpor ke dalam CST melalui menu *dielectric dispersion* pada bagian *material properties*, sehingga simulasi dapat dijalankan sesuai dengan karakteristik material yang telah dihitung.

Metode yang digunakan pada simulasi CST adalah *Free Space* dimana sampel planar diletakkan diantara dua antena (pemancar dan penerima) yang saling berhadapan di dalam ruang kedap gelombang (*anechoic chamber*).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Adapun Kesimpulan dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Polimerisasi OPEFB menggunakan polianilin dan fungsionalisasi MWCNT menggunakan HNO_3 dan H_2O_2 berhasil dilakukan. Keberhasilan polimerisasi ditandai dengan kemunculan gugus C–H alifatik pada 2920 cm^{-1} dan gugus C=C aromatik sekitar 1500 cm^{-1} yang mengindikasikan terbentuknya struktur polianilin. Keberhasilan fungsionalisasi MWCNT ditandai dengan kemunculan gugus C–O pada 1028 cm^{-1} dan 1237 cm^{-1} sebagai akibat proses oksidasi permukaan MWCNT.
2. Morfologi biokomposit mengalami perubahan setelah proses polimerisasi dan fungsionalisasi. Pada sampel OPEFB 30 -MWCNT 5 Permukaan biokomposit menjadi lebih kasar, distribusi resin epoksi pada serat lebih merata, serta partikel MWCNT mengisi rongga dan menempel pada permukaan serat. Modifikasi tersebut menghasilkan interaksi antarmuka yang lebih baik antara serat OPEFB, matriks epoksi, dan *filler* MWCNT.
3. Komposisi OPEFB 10 – MWCNT 5 menghasilkan nilai konduktivitas tertinggi sebesar $7,513 \times 10^{-8}\text{ S/m}$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kombinasi OPEFB dan MWCNT memiliki keseimbangan komposisi yang optimal dalam membentuk jaringan konduktif pada material.

4. Komposisi OPEFB 10 – MWCNT 5 yang menghasilkan konduktivitas tertinggi juga memberikan performa *shielding effectiveness* terbaik. Nilai *shielding effectiveness* tertinggi yang diperoleh sebesar $-5,708$ dB pada frekuensi $6,6255$ GHz melalui pengujian VNA dan sebesar $-8,42$ dB pada frekuensi 14 MHz melalui pengujian antenna *monopole*.
5. Simulasi menggunakan CST *Studio Suite* menghasilkan nilai *shielding effectiveness* tertinggi sebesar $-17,253$ dB pada komposisi OPEFB 10 – MWCNT 5. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan hasil pengujian eksperimental menggunakan VNA maupun antenna *monopole*, sehingga simulasi dapat digunakan sebagai acuan performa ideal material dalam kondisi homogen dan tanpa pengaruh lingkungan pengukuran.
6. Hubungan antara sifat listrik dan performa *shielding effectiveness* menunjukkan bahwa peningkatan konduktivitas berkontribusi terhadap peningkatan nilai *shielding effectiveness*. Komposisi OPEFB 10 – MWCNT 5 merupakan komposisi terbaik dalam penelitian ini karena menghasilkan konduktivitas tertinggi serta nilai *shielding effectiveness* tertinggi pada pengujian VNA, antenna *monopole*, dan simulasi CST *Studio Suite*. Dengan demikian, biokomposit OPEFB yang dipolimerisasi polianilin dengan *filler* MWCNT terfungsionalisasi berpotensi digunakan sebagai material EMI *shielding* yang ramah lingkungan.

5.2 SARAN

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya

1. Mengevaluasi sifat mekanik material seperti kekuatan tarik untuk memperluas potensi aplikasinya.
2. Pengujian *shielding effectiveness* dapat dilakukan pada ruang *anechoic* untuk meminimalkan pengaruh interferensi elektromagnetik dari lingkungan sekitar sehingga diperoleh hasil pengukuran yang lebih maksimal.
3. Evaluasi performa instrumen berdasarkan hasil kalibrasi berkala untuk meningkatkan akurasi pengukuran.
4. Proses dispersi MWCNT ke dalam resin epoksi , disarankan menggunakan *ultrasonic homogenizer* karena pengadukan manual dan *hot plate magnetic stirrer* masih menyebabkan terbentuknya aglomerasi MWCNT yang mempengaruhi homogenitas jalur refleksi gelombang elektromagnetik pada material.
5. Proses fabrikasi komposit disarankan menggunakan metode *vacuum molding* atau *hot press* agar rongga udara pada material dapat diminimalkan sehingga kualitas ikatan antarmuka antar material menjadi lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Prekodravac Filipovic *et al.*, “Electromagnetic Interference in the Modern Era: Concerns, Trends, and Nanomaterial-Based Solutions,” *Nanomaterials*, vol. 15, no. 20, pp. 1–34, 2025, doi: 10.3390/nano15201558.
- [2] Y. Zhou, B. Xue, L. Xie, C. M. Wu, and Q. Zheng, “Recent Advances in Asymmetric Structural Composites for Excellent *Electromagnetic interference shielding*: A Review,” *Chinese J. Polym. Sci. (English Ed.)*, vol. 42, no. 6, pp. 693–710, 2024, doi: 10.1007/s10118-024-3112-x.
- [3] S. Futatsumori, “Electromagnetic Interference Evaluations of Aircraft Radio Altimeter Due to Sub-6 Band 5G Mobile Communications System at Japanese Conditions”.
- [4] T. Storchi-Bergmann, “Nuclear activity in nearby galaxies,” *Rev. Mex. Astron. y Astrofis. Ser. Conf.*, vol. 11, no. december 1972, pp. 125–132, 2001, doi: 10.1051/0004-6361:200809539.
- [5] Y. Yang, J. Li, Z. Wang, X. Ju, H. Duan, and Y. Tang, “Structural design and performance regulation of green *electromagnetic interference shielding* conductive polymer composites: A review,” *Adv. Nanocomposites*, vol. 1, no. 1, pp. 290–303, 2024, doi: 10.1016/j.adna.2024.08.002.
- [6] J. Kruželák, A. Kvasničáková, K. Hložeková, and I. Hudec, “Progress in polymers and polymer composites used as efficient materials for EMI *shielding*,” *Nanoscale Adv.*, vol. 3, no. 1, pp. 123–172, 2021, doi:

10.1039/d0na00760a.

- [7] S. Zecchi *et al.*, “A Comprehensive Review of *Electromagnetic interference shielding* Composite Materials,” *Micromachines*, vol. 15, no. 2, 2024, doi: 10.3390/mi15020187.
- [8] D. W. Van Krevelen, *Properties of Polymers: Their Correlation with Chemical Structure; their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions: Fourth Edition*. 2009.
- [9] I. Lakin, A. Hassan, I. A. Alhaji, N. D. Academy, and G. State, “SYNERGISTIC EFFECT OF CO - SUPPORTIVE OPEFB-MWCNT CONDUCTIVE NETWORK FOR HIGH - PERFORMANCE EMI,” vol. 20, no. 4, pp. 1706–1710, 2025.
- [10] D. K. Rajak, D. D. Pagar, P. L. Menezes, and E. Linul, “Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications,” *Polymers (Basel)*., vol. 11, no. 10, 2019, doi: 10.3390/polym11101667.
- [11] D. M. Abdalhadi, Z. Abbas, A. F. Ahmad, and N. A. Ibrahim, “Determining the complex permittivity of oil palm empty fruit bunch fibre material by open-ended coaxial probe technique for microwave applications,” *BioResources*, vol. 12, no. 2, pp. 3976–3991, 2017, doi: 10.15376/biores.12.2.3976-3991.
- [12] M. S. Isnaini N, E. Mardawati, H. Nur Fitriana, and P. Amanda, “Evaluasi Tahapan Pretreatment dan Hidrolisis Enzimatik terhadap Tadan Kosong Kelapa Sawit untuk Produksi Xilosa dan Glukosa,” *Biomass, Biorefinery, and Bioeconomy*, vol. 1, no. 1, pp. 9–13, 2023.
- [13] S. K. Tiwari, J. Mishra, G. Hatui, and G. C. Nayak, “Conducting Polymer

- Hybrids,” pp. 117–142, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-46458-9.
- [14] C. Merlini *et al.*, “Polyaniline-coated coconut fibers: Structure, properties and their use as conductive additives in matrix of polyurethane derived from castor oil,” *Polym. Test.*, vol. 38, pp. 18–25, 2014, doi: 10.1016/j.polymertesting.2014.06.005.
- [15] M. Syduzzaman, M. S. Islam Saad, M. F. Piam, T. A. Talukdar, T. T. Shobdo, and N. M. Pritha, “Carbon nanotubes: Structure, properties and applications in the aerospace industry,” *Results Mater.*, vol. 25, no. May 2024, p. 100654, 2025, doi: 10.1016/j.rinma.2024.100654.
- [16] N. Parvin, S. W. Joo, J. H. Jung, and T. K. Mandal, “Unlocking the Future: Carbon Nanotubes as Pioneers in Sensing Technologies,” *Chemosensors*, vol. 13, no. 7, pp. 1–68, 2025, doi: 10.3390/chemosensors13070225.
- [17] H. Wibisono, “Pengaruh Penambahan Carbon Nanotube Pada Kekuatan Mekanik Komposit Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Dengan Resin Epoksi,” 2012.
- [18] R. V Tolentino-hern, “Journal of Science : Advanced Materials and Devices Carbon-based radar absorbing materials : A critical review,” vol. 7, 2022, doi: 10.1016/j.jsamd.2022.100454.
- [19] M. Jaroszewski, S. Thomas, and A. V Rane, “Shielding Efficiency Measuring Methods and Systems,” pp. 61–87, 2019.
- [20] F. Badrul *et al.*, “Preliminary investigation on the correlation between mechanical properties and conductivity of low-density polyethylene/carbon black (LDPE/CB) conductive polymer composite (CPC),” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2169, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2169/1/012020.

- [21] I. I. Lakin, Z. Abbas, R. S. Azis, N. A. Ibrahim, and M. A. A. Rahman, “The effect of mwcnts *filler* on the absorbing properties of opefb/pla composites using microstrip line at microwave frequency,” *Materials (Basel)*., vol. 13, no. 20, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3390/ma13204581.
- [22] Widyawati, “Pembuatan Kotak Pelindung Interferensi Elektromagnetik Dengan Penggunaan Bahan Komposit Serat Alami Berbasis Polimer Konduktif,” Skripsi. Universitas Lampung, 2022.
- [23] D. Tio Kristian, “Studi Penambahan Cnt Untuk Meningkatkan Konduktivitas Cfrp Sebagai Material Badan Pesawat Unmanned Aerial Vehicle (UAV),” Skripsi. Universitas Lampung, 2021.
- [24] W. Ghafoor, M. Ahmad, M. Raffi, and S. U. Awan, “Role of Electrical Conductivity in the Shielding Effectiveness of Composite Polyvinyl Alcohol / Multiwall Carbon Nanotube Nanofibers for Electromagnetic Interference Applications,” pp. 3–10, 2024.
- [25] T. Teklu *et al.*, “Polyaniline Deposition on the Surface of Cotton Fibers : Structural Studies , Swelling Behavior , and Water Absorption Properties,” vol. 2020, 2020.
- [26] D. S. Ahmed, A. J. Haider, and M. R. Mohammad, “Comparesion of Functionalization of multi Ğ walled carbon nanotubes treated by oil olive and nitric acid and their characterization,” *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 1111–1118, 2013.