

**STUDI PENGGUNAAN BIOKOMPOSIT ANYAMAN JUTE DENGAN
FILLER MWCNT SEBAGAI MATERIAL PERISAI INTERFERENSI
ELEKTROMAGNETIK**

(Tesis)

Oleh:

M. IAN APRIANSYAH



**JURUSAN MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**STUDI PENGGUNAAN BIOKOMPOSIT ANYAMAN JUTE DENGAN
FILLER MWCNT SEBAGAI MATERIAL PERISAI INTERFERENSI
ELEKTROMAGNETIK**

Oleh

M. IAN APRIANSYAH

TESIS

Sebagai salah satu syarat mencapai gelar

MAGISTER TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

STUDI PENGGUNAAN BIOKOMPOSIT ANYAMAN JUTE DENGAN *FILLER* MWCNT SEBAGAI MATERIAL PERISAI INTERFERENSI ELEKTROMAGNETIK

OLEH

M. IAN APRIANSYAH

Pesatnya perkembangan perangkat elektronik saat ini memicu peningkatan interferensi elektromagnetik (EMI) yang dapat mengganggu kinerja berbagai peralatan, sehingga diperlukan perlindungan berupa perisai EMI. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan material biokomposit berbasis serat alami yaitu anyaman jute (JF) yang dipolimerisasi dengan polianilin (PANI) sebagai penguat dan resin epoksi yang ditambahkan *filler Multi-Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT) terfungsionalisasi sebagai polimer matriks. Biokomposit ini difabrikasi dengan variasi komposisi anyaman jute sebesar 10%, 20%, dan 30%, serta fraksi berat *filler* MWCNT sebesar 0%, 2%, dan 5% terhadap berat resin epoksi. Sampel biokomposit dibuat dengan 9 variasi komposisi dan 3 bentuk sampel: bentuk planar persegi, piringan, dan kotak perisai. Pengujian sampel planar persegi dilakukan menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan pengujian *S-parameter* menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) dengan metode *Waveguide*. Pengujian resistivitas listrik pada sampel piringan dilakukan menggunakan metode *Four-Point Probe*. Pengujian sampel kotak perisai dilakukan menggunakan antena monopole. Validasi secara numerik melalui simulasi CST *Studio Suite* dengan metode *Free Space*.

Hasil Pengujian FTIR mengonfirmasi keberhasilan polimerisasi PANI yang ditandai oleh puncak kuat cincin benzenoid pada bilangan gelombang $1505,8\text{ cm}^{-1}$, serta keberhasilan fungsionalisasi oksidasi MWCNT yang dibuktikan oleh adanya vibrasi C-O dari gugus karboksilat ($-\text{COOH}$) pada area 1237 cm^{-1} . Hasil pengujian SEM menunjukkan bahwa modifikasi permukaan dengan PANI-MWCNT secara efektif meningkatkan ikatan antarmuka antara serat dan matriks. Sampel dengan komposisi JF 10 – CNT 5 menghasilkan konduktivitas tertinggi sebesar $2,719 \times 10^{-7}\text{ S/m}$, sampel tersebut juga menghasilkan nilai SE terbaik berdasarkan pengujian VNA dengan nilai sebesar $-7,269\text{ dB}$ pada frekuensi $6,5315\text{ GHz}$ dan pengujian antena monopole sebesar $-9,847\text{ dB}$ pada frekuensi 14 MHz . Hasil simulasi CST *Studio Suite* menunjukkan nilai SE tertinggi sebesar $-20,562\text{ dB}$ pada komposisi yang sama. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konduktivitas material berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan perisai interferensi elektromagnetik. Dengan demikian, biokomposit anyaman jute terpolimerisasi PANI dengan epoksi resin yang ditambahkan *filler* MWCNT terfungsionalisasi berpotensi digunakan sebagai material perisai EMI yang ramah lingkungan.

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

ABSTRACT

A STUDY ON THE USE OF JUTE WOVEN BIOCOMPOSITES WITH MWCNT FILLER AS ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE SHIELDING MATERIAL

BY

M. IAN APRIANSYAH

The rapid development of electronic devices today has increased electromagnetic interference (EMI), which can disrupt the performance of various equipment, making EMI shielding necessary. This study aims to develop a biocomposite material based on natural fibers, specifically jute fiber (JF), polymerized with polyaniline (PANI) as a reinforcing agent and an epoxy resin containing functionalized multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) as the polymer matrix. The core contribution is the fabrication and evaluation of biocomposites with jute weave compositions of 10%, 20%, and 30%, and MWCNT filler weight fractions of 0%, 2%, and 5% relative to the epoxy resin. The biocomposite samples were made with 9 composition variations and 3 sample shapes: rectangular planar, disc-shaped, and box-shaped shield. Tests on the rectangular planar samples were conducted using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), and S-parameter testing using a Vector Network Analyzer (VNA) via the waveguide method. Electrical resistivity testing on the disc-shaped samples was performed using the four-point probe method. Testing of the box-shaped shield samples was conducted using a monopole antenna. Numerical validation through simulations in CST Studio Suite using the Free Space method.

The FTIR test results confirmed the successful polymerization of PANI, as indicated by a strong benzene ring peak at a wavenumber of 1505.8 cm^{-1} , as well as the successful oxidative functionalization of MWCNT, evidenced by the presence of C-O vibrations from the carboxyl group ($-\text{COOH}$) in the 1237 cm^{-1} . SEM test results show that surface modification with PANI-MWCNT effectively enhances the interfacial bonding between the fibers and the matrix. The sample with the composition JF 10 – CNT 5 composition yielded the highest conductivity of $2.719 \times 10^{-7}\text{ S/m}$, this sample also produced the best SE value based on VNA testing at -7.269 dB at a frequency of 6.5315 GHz and monopole antenna testing at -9.847 dB at a frequency of 14 MHz . Simulation results from CST Studio Suite showed the highest SE value of -20.562 dB for the same composition. Overall, the research results indicate that increased material conductivity contributes to improved electromagnetic interference shielding performance. Thus, PANI-polymerized jute woven biocomposites with functionalized MWCNT fillers have the potential to be used as environmentally friendly EMI shielding materials.

Keywords : EMI Shielding, Jute, Multi-Walled Carbon Nanotubes, Shielding Effectiveness, Conductivity, Vector Network Analyzer, Monopole Antenna.

Judul Thesis

**: STUDI PENGGUNAAN BIOKOMPOSIT
ANYAMAN JUTE DENGAN *FILLER* MWCNT
SEBAGAI MATERIAL PERISAI
INTERFERENSI ELEKTROMAGNETIK**

Nama Mahasiswa

: **M Ian apriansyah**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2325031001

Jurusan

: Magister Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik



1. Komisi Pembimbing

Pembimbing 1

Riah P.

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

Pembimbing 2

Herman

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

2. Ketua Jurusan 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.**

Diah P

Sekretaris Komisi Penguji

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

Herman

Anggota Komisi Penguji

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

Purwasih

Anggota Komisi Penguji

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

Darmansyah

1. Dekan Fakultas Teknik

Mis **Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T.**

NIP. 196910302000031001

2. Direktur Program Pascasarjana

Prof. Dr. Ir. Muhsadi, M.Si.

NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Thesis: **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 Anyaman Jute Dengan *Filler* MWCNT Sebagai Material Perisai 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



METERAI
TEMPEL
B4AOX064149129

M. Ian Apriansyah

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bukit Kemuning 19 April 1998. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Herliansyah dan Ibu Parida Aini.

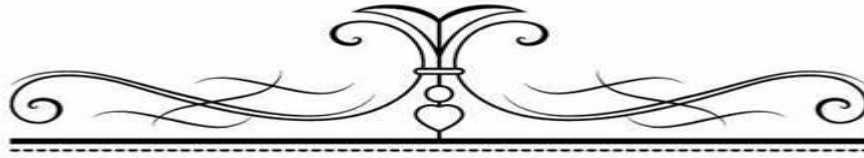
Mengenai riwayat pendidikan, penulis memulai pendidikan di TK Kemala Bhayangkari 3 Padang Utara lulus pada 2004, Pendidikan Sekolah Dasar (SD) di SDN 10 Bukit Kemuning lulus pada tahun 2010, Pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 1 Bukit Kemuning lulus pada tahun 2013, Pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMAN 1 Bukit Kemuning lulus pada tahun 2016.

Penulis diterima di Institut Teknologi Sumatera di jurusan Teknik Elektro pada tahun 2016 dan meraih gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada tahun 2020. Penulis juga pernah Kerja Praktik (KP) di PT Bukit Asam Tbk. Unit Pelabuhan Tarahan sub divisi PLTU, Operation & Maintenance dipegang oleh PT BEST pada akhir tahun 2019 hingga awal tahun 2020 dan mengangkat judul “Sistem Kerja serta Pemeliharaan Motor *Rapping* pada *Electrostatic Precipitator* (ESP) unit 2 di PT. Bukit Energi Servis Terpadu (BEST) Pelabuhan Tarahan”. Pada tahun 2021 penulis bekerja sebagai Teknisi AC di ASISI (Asosiasi Teknisi Refrigerasi dan Air Conditioning Nusantara). Pada tahun 2023 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Program Pascasarjana Teknik Elektro di Universitas Lampung, penulis melakukan penelitian pada bidang Tegangan Tinggi dengan judul tesis “Studi Penggunaan Biokomposit Anyaman Jute Dengan *Filler* MWCNT Sebagai Material Perisai Interferensi Elektromagnetik” dibawah 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

M. Ian Apriansyah



PERSEMBAHAN

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, berkah, dan karunia-Nya yang tiada henti, sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan kepada junjungan kita, Nabi Agung Muhammad SAW, beserta keluarga, para sahabat, dan pengikutnya hingga akhir zaman.

Dengan penuh rasa syukur, karya ilmiah ini penulis persembahkan secara tulus kepada :

Kedua Orang Tua Tercinta, Ayahanda Herliansyah dan Ibunda Parida Aini, serta adikku, Dwi Agustina, serta terkhusus kepada Laili Rahma Hidayati. Terima kasih yang tak terhingga atas untaian doa, kasih sayang yang tulus, dukungan moral maupun materiil, serta pengorbanan luar biasa yang senantiasa menjadi sumber kekuatan terbesar bagi penulis sepanjang perjalanan studi ini.

Bapak dan Ibu Dosen Teknik Elektro

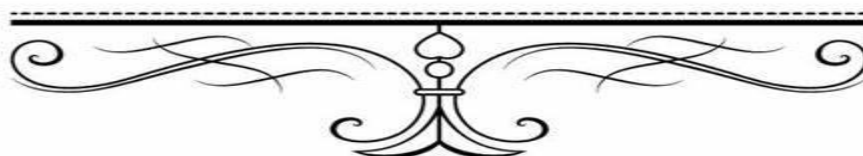
Terima kasih atas ketulusan dedikasi, transfer ilmu pengetahuan, bimbingan, serta arahnya yang sangat berharga dalam membentuk wawasan akademik maupun non-akademik penulis.

Keluarga Besar MTE 2023

Rekan-rekan seperjuangan yang telah mengukir indahny persahabatan, kebersamaan, dan saling menguatkan dalam menempuh pendidikan. Semoga ikatan silaturahmi ini tetap terjaga dengan erat di masa depan.

Almamaterku,

Universitas Lampung



MOTTO

"Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan, sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan."

(Q.S. Al-Insyirah: 5-6)

"Jangan takut gagal karena orang yang tidak pernah gagal hanyalah orang yang tidak pernah melangkah. Jika kamu tidak melangkah, kamu sudah gagal sebelum memulai."

(Buya Hamka)

"Jangan pernah memberi ruang pada kata berhenti, karena diam di tempat saat orang lain bergerak maju adalah cara tercepat untuk tertinggal jauh. Tesis ini berhasil dituntaskan bukan karena jalannya yang mudah, melainkan karena keputusan sadar untuk selalu bangkit dan mencoba lagi setiap kali membentur dinding kesulitan."

(M. Ian Apriansyah)

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, sehingga penelitian tesis ini dapat diselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada junjungan kita, Nabi Agung Muhammad SAW, selaku suri teladan mulia yang telah membawa umat manusia menuju cahaya kebenaran dan keimanan. Tesis yang berjudul **“Studi Penggunaan Biokomposit Anyaman Jute Dengan *Filler* MWCNT Sebagai Material Perisai Interferensi Elektromagnetik”** ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penulis menyadari bahwa selama masa perkuliahan hingga selesainya penelitian ini, banyak sekali pembelajaran, bimbingan, dukungan, serta motivasi berharga yang telah diterima dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus dan penghargaan 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 Dosen Pembimbing Utama atas segala keikhlasan, waktu, dan pikiran yang telah dicurahkan dalam memberikan bimbingan, arahan, serta motivasi berharga yang senantiasa menuntun penulis dalam menyelesaikan tesis ini dengan baik.
7. Bapak Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Kedua yang senantiasa meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, masukan konstruktif, kritik yang membangun, serta motivasi berharga bagi penulis sepanjang proses penyempurnaan tesis ini..
8. Ibu Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji Utama atas segala masukan teoretis, kritik yang membangun, serta saran substantif yang telah dicurahkan, sehingga penulis dapat menyempurnakan draf tesis ini dengan lebih komprehensif.
9. Bapak Darmansyah, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Penguji Kedua atas segala perspektif baru, kritik analitis, dan sumbang saran yang konstruktif guna meningkatkan kualitas serta ketepatan pembahasan dalam tesis ini.
10. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen serta tenaga kependidikan di Jurusan Magister Teknik Elektro Universitas Lampung yang telah mendedikasikan ilmu, memberikan dukungan, dan bantuan teknis yang sangat berarti bagi kelancaran akademik penulis selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi.
11. Mbak Nurul dan Mbak Irma, serta seluruh jajaran Staf Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung atas bantuannya dalam pengurusan administrasi.
12. Ayah dan Ibu tersayang, terima kasih sudah memberikan segala yang terbaik untuk ku, yang selalu menjadi penyemangat hidupku, yang selalu mencurahkan doa di setiap langkahku sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

13. Adik tercinta Dwi Agustina, terimakasih selalu mendoakan kakakmu ini dalam semua kesempatan yang telah diambil hingga dapat menyelesaikan tesis ini, semangat untuk kamu mendapatkan gelar S.Si nya.
14. Teman hidup saya, Laili Rahma Hidayati, yang tak hanya menemani, namun juga menjadi semangat, kekuatan, dan tempat berbagi dalam setiap suka dan duka perjuangan ini. Terima kasih telah sabar, memahami, serta terus menyemangati saya untuk berdiri dan berjuang hingga titik ini. Semoga kelak segala doa dan harapan kita bisa tercapai bersama.
15. Teman-teman Magister Teknik Elektro 2023, Bambang, Dona, Jeni, Ismail, Rita, Jimmy, Yuliana dan Omar yang telah berjuang bersama dan berbagi kehangatan selama masa perkuliahan.

Semoga Allah SWT membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini. Penulis meminta maaf atas kesalahan dan ketidak sempurnaan dalam penulisan akhir ini. Kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi kebaikan dan kemajuan mendatang. Akhir kata semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak, dan dapat menambah khasanah ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 29 Juni 2026

Penulis

M. Ian Apriansyah

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
LEMBAR PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN	viii
MOTTO	ix
SANWACANA	x
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Rumusan Masalah	3
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Hipotesis	5
1.7 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Anyaman Jute sebagai Material Biokomposit.....	7
2.1.1 Keunggulan dan Keterbatasan Anyaman Jute.....	8
2.1.2 Polimerisasi Anyaman Jute	10
2.2 Matriks Biokomposit	11
2.3 <i>Multi-Walled Carbon Nanotubes</i> (MWCNT)	13
2.3.1 Sifat-Sifat MWCNT	13
2.3.2 Modifikasi MWCNT untuk Meningkatkan Konduktivitas	14

2.3.3 Fungsionalisasi.....	14
2.4 Konduktivitas Listrik	15
2.4.1 PANI sebagai Lapisan Konduktif pada Serat.....	16
2.4.2 MWCNT sebagai Jalur Konduktif	16
2.4.3 Teori Perkolasi (<i>Percolation Theory</i>)	17
2.5 <i>Electromagnetic Interference</i> (EMI).....	17
2.6 Perisai <i>Electromagnetic Interference</i> (EMI).....	18
2.7 Penelitian Terdahulu	21
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	25
3.2 Jadwal Kegiatan Penelitian	25
3.3 Diagram Alir Penelitian (<i>Flowchart</i>).....	26
3.4 Alat dan Bahan yang Digunakan	26
3.5 Prosedur Percobaan.....	27
3.5.1 Perlakuan Terhadap Anyaman Jute.....	27
3.5.2 Polimerisasi Anyaman Jute Dilapisi Polianilin	29
3.5.3 Fungsionalisasi MWCNT	31
3.5.4 Fabrikasi, Pencetakan dan Pemotongan Komposit	34
3.6 Metode Pengukuran	36
3.6.1 Pengujian <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR).....	37
3.6.2 Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	38
3.6.3 Pengukuran Resistivitas Volume dengan Metode <i>Four-Point Probe</i>	39
3.6.4 Pengujian <i>Shielding Effectiveness</i> (SE) pada VNA.	41
3.6.5 Pengukuran SE pada Kotak Perisai EMI	43
3.6.6 Simulasi CST <i>Studio Suite</i> pada Uji VNA.....	45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	50
4.1 Hasil Sampel Masing-Masing Pengujian.....	50
4.2 Hasil Pengujian <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR)	53
4.3 Hasil Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	54
4.4 Hasil Pengujian Resistivitas Volume.....	56
4.5 Hasil Pengujian <i>S-Parameter</i> pada <i>Vector Network Analyzer</i> (VNA).....	59
4.6 Hasil Pengujian SE pada Kotak Perisai EMI	61
4.7 Hasil Simulasi CST <i>Studio Suite</i> pada Uji VNA	65
4.8 Analisis SE menggunakan: 1.VNA, 2.Antena Monopole, 3.Simulasi CST.....	67

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	71
DAFTAR PUSTAKA.....	72
LAMPIRAN.....	77

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Struktur <i>Polyaniline</i>	10
Gambar 2.2 Resin <i>Lycal</i> 1011 dan <i>Hardener</i>	12
Gambar 2.3 Struktur MWCNT	13
Gambar 2.4 Mekanisme SE	19
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3.2 Diagram Blok Penelitian	27
Gambar 3.3 Anyaman Jute.....	28
Gambar 3.4 Rendaman Anyaman Jute dengan 2% NaOH	28
Gambar 3.5 Pencucian Anyaman Jute dengan Akuades.....	28
Gambar 3.6 Hasil Perlakuan Anyaman Jute	29
Gambar 3.7 Berat Jute 25 gram	29
Gambar 3.8 Penyiapan HCl, APS dan Anilin untuk Polimerisasi	30
Gambar 3.9 Pencampuran HCl, Anilin, dan APS menggunakan HPMS.....	30
Gambar 3.10 Hasil Polimerisasi Anyaman Jute.....	31
Gambar 3.11 Berat MWCNT 8 gram.....	31
Gambar 3.12 Pencampuran MWCNT dengan HNO ₃	32
Gambar 3.13 Proses Penyaringan MWCNT dengan HNO ₃	32
Gambar 3.14 Pencampuran Saringan MWCNT+HNO ₃ dengan H ₂ O ₂	33
Gambar 3.15 Proses Penyaringan Akhir Fungsionalisasi	33
Gambar 3.16 Hasil Akhir Fungsionalisasi MWCNT	34
Gambar 3.17 Persiapan Pelapisan Kaca dengan <i>Polyvinyl Alcohol</i>	34
Gambar 3.18 Penyusun Komposit	35
Gambar 3.19 Pencampuran Semua Komponen pada Cetakan Kaca.....	35
Gambar 3.20 Pemotongan Komposit sesuai Spesifikasi Pengujian.....	36

Gambar 3.21 <i>Agilent Cary 630 Spectrometer</i>	37
Gambar 3.22 Skematik Pengujian FTIR	38
Gambar 3.23 Skematik Pengujian SEM	39
Gambar 3.24 Skematik Pengukuran Resistivitas Volume	40
Gambar 3.25 Rangkaian Uji VNA	42
Gambar 3.26 Desain Pengujian SE pada Kotak Perisai EMI.....	43
Gambar 3.27 Rangkaian Uji SE tanpa Kotak Perisai EMI	44
Gambar 3.28 Rangkaian Uji SE dengan Kotak Perisai EMI	44
Gambar 4.1 Hasil FTIR 4 Variasi Sampel	53
Gambar 4.2 Hasil SEM JF 30 - CNT 0 dengan Perbesaran 500 Kali	55
Gambar 4.3 Hasil SEM JF 30 - CNT 5 dengan Perbesaran 2000 Kali	55
Gambar 4.4 Nilai Konduktivitas pada 9 Variasi Spesimen.....	58
Gambar 4.5 Grafik Hasil SE pada Pengujian VNA	60
Gambar 4.6 Grafik Hasil SE pada Kotak Perisai EMI.....	63
Gambar 4.7 Hasil Simulasi CST untuk Pengujian SE pada VNA	65
Gambar 4.8 Grafik Hasil SE pada Simulasi CST	66
Gambar 4.9 Nilai Puncak SE pada 2 Pengujian Berbeda dan Konduktivitas	67
Gambar 4.10 Nilai Puncak SE pada simulasi CST	68

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian	25
Tabel 4.1 Hasil Sampel Tiap Pengujian.....	50
Tabel 4.2 Identifikasi Gugus Fungsi dan Ikatan Kimia Hasil Pengujian FTIR	53
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus Spesimen	57
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Resistansi, Resistivitas, dan Konduktivitas	58
Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Frekuensi dan Parameter S_{21} pada Puncak SE.....	60
Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Tegangan pada Osiloskop.....	62
Tabel 4.7 Hasil Perhitungan <i>Shielding Effectiveness</i> (SE).....	63

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Isu lingkungan global, seperti peningkatan limbah non-degradasi dan emisi karbon dari material sintetis, mendorong pengembangan material yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu solusi yang kini banyak dikembangkan adalah biokomposit, yaitu material komposit yang memanfaatkan serat alam sebagai penguat dan polimer sebagai matriks. Dibandingkan dengan komposit berbasis serat sintetis atau logam, biokomposit menawarkan keunggulan berupa biodegradabilitas, ketersediaan bahan baku terbarukan, bobot ringan, dan jejak karbon yang lebih rendah, sehingga sangat relevan dalam mendukung agenda pembangunan berkelanjutan [1].

Dalam pengembangan biokomposit, telah banyak diteliti beragam jenis serat alami karena ketersediaan melimpah di wilayah tropis, harga ekonomis, ringan, dan memiliki kekuatan tarik yang cukup tinggi, misalnya seperti serat kelapa, bambu, ampas tebu, tandan kosong kelapa sawit, dan jute. Dari berbagai jenis tersebut, anyaman jute menjadi salah satu serat yang menonjol karena struktur mikrofibrilnya mendukung daya serap resin yang baik dan membentuk ikatan kuat dalam matriks polimer, menjadikannya ideal sebagai penguat dalam material biokomposit [2]. Jute juga mudah terdegradasi di lingkungan, sehingga menambah nilai ekologis dalam aplikasinya. Salah satu aplikasi potensial dari biokomposit berbasis anyaman jute adalah bidang perisai *electromagnetic interference* (EMI).

EMI merupakan gangguan dari gelombang elektromagnetik yang dapat merusak atau mengganggu kinerja perangkat elektronik. Material perisai EMI berfungsi untuk melindungi sistem elektronik dari gangguan EMI yang biasanya digunakan pada perangkat komunikasi, medis, dan industri [3]. Penggunaan biokomposit sebagai material perisai EMI menghadirkan solusi baru yang ramah lingkungan, dibandingkan material konvensional berbasis logam yang berat dan sulit terurai.

Namun, anyaman jute bersifat isolator dan tidak memiliki kemampuan konduktivitas yang memadai untuk aplikasi perisai EMI. Untuk mengatasi keterbatasan ini, perlu dilakukan polimerisasi menggunakan polimer konduktif seperti *polyaniline* untuk meningkatkan konduktivitas serat. Penambahan *Multi-Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT) sebagai *filler* epoksi resin juga diperlukan karena konduktivitas listriknya yang tinggi, kekuatan mekanik yang luar biasa, serta stabilitas termal dan kimia.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat komposit berbentuk planar dan kotak perisai dengan variasi persentase anyaman jute dan *filler* MWCNT guna mengukur kemampuan komposit sebagai bahan perisai EMI, umumnya pengujian melihat seberapa besar nilai *Shielding Effectiveness* pada rentang frekuensi kerja alat elektronik pada skala Giga Hertz.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Memfabrikasi biokomposit berbasis serat alami jute terpolimerisasi *polyaniline* (PANI) dengan penambahan *filler* MWCNT terfungsionalisasi.

2. Menguji karakteristik gugus fungsi dan morfologi permukaan biokomposit menggunakan pengujian *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).
3. Menguji sifat listrik (resistivitas / konduktivitas listrik) biokomposit menggunakan metode *Four-Point Probe*.
4. Menguji kemampuan *shielding effectiveness* (SE) biokomposit secara eksperimen menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) dan antena monopole, serta secara numerik menggunakan simulasi *CST Studio Suite*.
5. Mengevaluasi kelayakan biokomposit sebagai material perisai *Electromagnetic Interference* (EMI) berdasarkan korelasi antara karakteristik listrik dan nilai SE yang diperoleh.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyediakan referensi ilmiah mengenai karakteristik biokomposit anyaman jute terpolimerisasi PANI dengan *filler* MWCNT terfungsionalisasi seperti ikatan kimia (FTIR dan SEM), listrik (Konduktivitas), *Shielding Effectiveness* (VNA, Antena Monopole, serta validasi numerik menggunakan CST).
2. Menyediakan alternatif material perisai EMI yang ramah lingkungan, ringan, dan bernilai ekonomis tinggi melalui pemanfaatan serat alam.

1.4 Rumusan Masalah

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

1. Pengaruh proses polimerisasi anyaman jute dengan *filler* MWCNT terfungsionalisasi terhadap karakteristik material dari biokomposit.

2. Pengaruh variasi komposisi dan ukuran sampel pada pengujian FTIR, SEM, Konduktivitas, SE.
3. Kelayakan biokomposit sebagai alternatif material perisai EMI yang ramah lingkungan.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini ditetapkan sebagai berikut untuk menjaga fokus dan konsistensi analisis:

1. Penelitian ini terbatas pada fabrikasi biokomposit menggunakan matriks polimer (epoksi) dengan anyaman serat jute (fraksi berat 10%, 20%, 30% dari berat total) yang dipolimerisasi *in-situ* dengan PANI, serta penambahan *filler* MWCNT terfungsionalisasi asam (fraksi berat 0%, 2%, 5% dari berat matriks).
2. Proses pencetakan komposit dilakukan melalui metode *hand lay-up* dengan sistem kompresi dingin (*cold pressing*) secara manual menggunakan beban statis konstan sebesar ± 6 kg selama 12 jam, dengan asumsi proses dispersi berlangsung secara homogen.
3. Pengujian *Shielding Effectiveness* (SE) secara eksperimen dibatasi pada dua kondisi ruang:
 - Pengujian planar menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) metode *Waveguide* pada rentang frekuensi *C-band* (5,85 – 8,2 GHz).
 - Pengujian kotak perisai menggunakan antena *monopole* pada rentang frekuensi rendah (1 – 20 MHz).
 - Dengan asumsi *noise* dari lingkungan diabaikan.
4. Simulasi pada *CST Studio Suite* dilakukan pada rentang frekuensi *C-band* (5,85 – 8,2 GHz) menggunakan metode *Free Space*. Karakteristik fisis material

dalam simulasi diasumsikan homogen dan isotropik berdasarkan pendekatan data pengujian listrik.

5. Penelitian ini menitikberatkan pada karakteristik listrik, morfologi, dan performa elektromagnetik (SE). Penelitian ini tidak menguji karakteristik mekanik (uji tarik/impak) serta ketahanan termal material komposit.

1.6 Hipotesis

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

1. Polimerisasi *in-situ polyaniline* (PANI) pada anyaman serat jute serta peningkatan fraksi berat *filler* MWCNT (hingga konsentrasi 5%) akan meningkatkan konduktivitas listrik biokomposit secara signifikan.
2. Peningkatan konduktivitas listrik pada biokomposit akan berbanding lurus dengan peningkatan nilai *Shielding Effectiveness* (SE).
3. Biokomposit dengan variasi fraksi serat jute terendah (10%) dan fraksi *filler* MWCNT tertinggi (5%) diprediksi mampu menghasilkan nilai *Shielding Effectiveness* (SE) tertinggi.

1.7 Sistematika Penulisan

Laporan penelitian ini terdiri dari beberapa bab yang tersusun secara sistematis sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian baik secara teoritis maupun praktis, batasan masalah, serta sistematika penulisan laporan penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori-teori yang mendukung penelitian, termasuk karakteristik anyaman jute sebagai material biokomposit, sifat dan fungsi *Multi-Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT), konsep dasar perisai *electromagnetic interference* (EMI), serta konsep dasar *Shielding Effectiveness* (SE) material.

III. METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan, termasuk desain eksperimen, prosedur polimerisasi anyaman jute dan fungsionalisasi MWCNT, metode fabrikasi biokomposit, parameter uji karakterisasi, serta alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memaparkan hasil penelitian yang diperoleh dari proses pengujian dan karakterisasi biokomposit berbasis anyaman jute-MWCNT. Pembahasan dilakukan dengan menganalisis hubungan anyaman jute terhadap MWCNT, efektivitas perisai EMI, serta keterkaitan antara parameter penelitian dengan hasil yang diperoleh.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian, serta saran untuk pengembangan penelitian lebih lanjut dalam meningkatkan performa biokomposit sebagai material perisai EMI yang lebih optimal.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Anyaman Jute sebagai Material Biokomposit

Anyaman jute adalah serat alami yang diperoleh dari tanaman *Corchorus capsularis* dan *Corchorus olitorius*. Serat ini termasuk dalam kategori serat bast (*bast fiber*), yaitu serat yang diperoleh dari bagian kulit batang tanaman. Jute merupakan serat alami kedua yang paling banyak digunakan setelah kapas dan memiliki keunggulan dalam hal keberlanjutan, biaya produksi yang rendah, serta kemudahan pengolahan dalam berbagai aplikasi industri [4].

Secara kimiawi, anyaman jute terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:

- Selulosa (60–65%): Komponen struktural utama yang memberikan kekuatan mekanik dan kestabilan dimensi.
- Hemi-selulosa (20–24%): Berkontribusi terhadap fleksibilitas dan daya serap air.
- Lignin (10–12%): Memberikan kekakuan struktural dan ketahanan terhadap degradasi mikroba.
- Pektin dan zat ekstraktif lainnya (sekitar 2–4%): Berfungsi sebagai perekat alami dalam serat.

Anyaman jute memiliki diameter berkisar antara 10–25 μm dengan panjang serat rata-rata 1,5–4 meter[5]. Struktur serat ini bersifat berlubang dan berpori, yang meningkatkan daya serap terhadap air tetapi juga menyebabkan degradasi lebih cepat dibandingkan serat sintetis. Selain itu, anyaman jute memiliki kekuatan tarik

dalam rentang 250–500 MPa, modulus elastisitas sekitar 10–30 GPa, dan elongasi sebelum putus sekitar 1,5–2% [5]. Perbandingan ini menunjukkan bahwa meskipun jute memiliki kekuatan tarik yang baik, sifat elastisitasnya lebih rendah dibandingkan serat sintetis seperti serat karbon atau serat kaca.

2.1.1 Keunggulan dan Keterbatasan Anyaman Jute

Sebagai material penguat (*reinforcement*) dalam biokomposit, anyaman jute memiliki beberapa keunggulan yang membuatnya menarik untuk digunakan:

1. Keberlanjutan dan Biodegradabilitas

Anyaman jute berasal dari sumber daya terbarukan dan dapat terurai secara alami di lingkungan [6].

2. Ketersediaan dan Biaya Rendah

Jute banyak diproduksi secara global, dengan negara-negara seperti India, Bangladesh, dan China sebagai produsen utama. Produksi jute yang melimpah menyebabkan harga serat ini terjangkau [6].

3. Sifat Mekanik yang Memadai

Anyaman jute memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang cukup tinggi, menjadikannya pilihan untuk biokomposit ringan dengan performa struktural yang baik [6].

4. Kemudahan Pemrosesan

Jute dapat diolah dengan berbagai teknik manufaktur biokomposit, termasuk pencampuran dengan polimer termoplastik, serta metode pencetakan seperti *hot-pressing* dan *compression molding* [6].

Namun, anyaman jute juga memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diatasi agar dapat lebih optimal digunakan dalam biokomposit:

1. Higroskopisitas yang Tinggi

Salah satu kelemahan anyaman jute adalah sifatnya sangat hidrofilik, yang menyebabkan tingginya penyerapan air dan kelembapan. Oleh karena itu, diperlukan perlakuan kimiawi seperti alkalisasi untuk meningkatkan ketahanan terhadap air dan adhesi dengan matriks polimer [7].

2. Stabilitas Termal yang Terbatas.

Anyaman jute mulai mengalami degradasi termal pada suhu sekitar 200–230°C, yang membatasi penggunaannya dalam aplikasi yang membutuhkan suhu pemrosesan tinggi [7].

3. Konduktivitas Listrik Rendah

Secara alami, anyaman jute bersifat insulator yang kurang efektif dalam aplikasi yang membutuhkan konduktivitas tinggi seperti perisai EMI. Oleh karena itu, perlu dikombinasikan dengan material konduktif seperti MWCNT untuk meningkatkan performanya [7].

4. Ketidaksesuaian dengan Polimer Hidrofobik

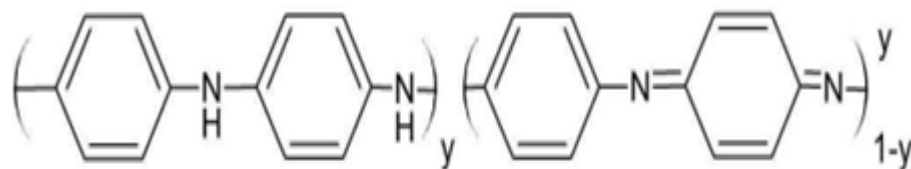
Karena sifat hidrofiliknya, anyaman jute cenderung memiliki adhesi yang buruk terhadap polimer hidrofobik seperti polipropilena (PP) atau polietilena (PE). Perlakuan kimia seperti polimerisasi dapat membantu meningkatkan hubungan antar komponen [7].

Secara umum, serat selulosa murni merupakan isolator listrik alami yang baik, sehingga kadar selulosa mentah yang tinggi justru menghasilkan konduktivitas listrik yang sangat rendah. Namun, dalam rekayasa material, tingginya kadar selulosa sangat menguntungkan karena menyediakan struktur yang bersih dan kaya akan gugus hidroksil (-OH) sebagai situs aktif untuk mengikat material konduktif

seperti polimer konduktif atau CNT secara lebih merata, serta menghasilkan struktur grafitik berkonduktivitas tinggi jika melalui proses *treatment* tertentu.

2.1.2 Polimerisasi Anyaman Jute

Polimerisasi adalah proses reaksi kimia di mana monomer-monomer bergabung membentuk rantai panjang atau struktur tiga dimensi yang disebut polimer. Salah satu hasil dari proses ini adalah terbentuknya polimer dengan sifat khusus, termasuk polimer yang bersifat konduktif secara intrinsik atau dikenal sebagai *Intrinsically Conductive Polymer* (ICP). Contoh dari ICP adalah *polyaniline*, yang terbentuk melalui proses polimerisasi anilin dan mampu menghantarkan listrik karena struktur konjugasi dalam rantai polimernya. Dalam biokomposit, polimerisasi berperan dalam membentuk matriks polimer yang mengikat *filler*, sehingga mempengaruhi sifat mekanik, termal, dan elektrik dari material yang dihasilkan [8]. Struktur *polyaniline* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.1 Struktur *Polyaniline* [8]

Terdapat dua jenis utama polimerisasi, yaitu polimerisasi adisi dan polimerisasi kondensasi. Polimerisasi adisi melibatkan monomer yang memiliki ikatan rangkap, seperti etilena dan stirena, yang bereaksi tanpa menghasilkan produk sampingan. Sebaliknya, polimerisasi kondensasi melibatkan reaksi antara dua jenis monomer yang menghasilkan molekul kecil sebagai produk sampingan, seperti air atau methanol [9].

Modifikasi permukaan serat atau penggunaan bahan pengikat (*coupling agent*) juga dapat digunakan untuk meningkatkan hubungan serat dengan matriks polimer [10].

Dalam penelitian ini, polimerisasi *in-situ* pada serat *jute* dilakukan dengan mengombinasikan tiga bahan utama, yaitu anilin 0,2 M sebagai monomer baku, HCl 0,1 M sebagai agen pengasam, dan Amonium Persulfate (APS) 0,1 M sebagai inisiator reaksi. Proses diawali dengan merendam serat *jute* ke dalam campuran larutan anilin dan HCl pada suhu dingin, di mana HCl berfungsi sebagai *swelling agent* yang membuka pori-pori mikroskopis selulosa agar monomer anilin dapat meresap dan terikat kuat pada permukaan serat melalui ikatan hidrogen. Selanjutnya, larutan APS ditambahkan ke dalam sistem untuk memicu monomer anilin agar saling mengikat dan membentuk fasa polimer padat Polianilin (PANI) yang menyelimuti dinding serat *jute*. Karena reaksi pertumbuhan rantai ini berlangsung dalam lingkungan asam yang terjaga oleh HCl, lapisan PANI yang terbentuk secara otomatis langsung aktif sebagai fasa *Emeraldine Salt* yang memiliki kemampuan menghantarkan arus listrik [8].

Dengan memahami mekanisme polimerisasi dan pemilihan polimer polianilin, diharapkan biokomposit berbasis anyaman *jute* ter polimerisasi PANI memiliki performa optimal dalam aplikasi perisai EMI.

2.2 Matriks Biokomposit

Resin adalah bahan polimer cair yang dapat mengeras baik dengan reaksi kimia maupun pemanasan. Dalam pembuatan biokomposit, resin berfungsi sebagai matriks yang mengikat serat dan *filler*, sehingga membentuk struktur yang kokoh serta meningkatkan sifat mekanik material komposit [11]. Resin yang umum digunakan dalam biokomposit dapat dikategorikan menjadi dua jenis utama:

1. Resin Termoplastik, seperti polietilena (PE), polipropilena (PP), dan polikarbonat (PC), yang dapat dilelehkan dan dibentuk ulang setelah proses pemanasan [12].
2. Resin Termoset, seperti epoksi, poliester, dan poliuretan, yang mengalami reaksi kimia *ireversibel* sehingga menghasilkan struktur yang lebih kaku dan stabil [12].

Dalam penelitian ini, penggunaan resin termoset seperti epoksi banyak dipertimbangkan karena memiliki sifat adhesi yang baik, kestabilan termal tinggi, serta hubungan yang lebih baik dengan *filler* seperti MWCNT untuk meningkatkan efektivitas perisai EMI [13]. Epoksi resin yang digunakan adalah *Lycal 1011* yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Resin *Lycal 1011* dan *Hardener* [8]

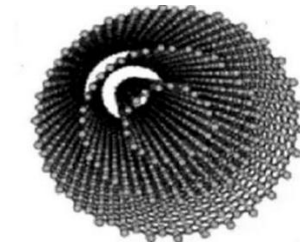
Selain resin, katalis atau *hardener* memainkan peran penting dalam mempercepat reaksi pengerasan resin. *Hardener* berfungsi sebagai inisiator reaksi polimerisasi, memungkinkan resin mengeras dan mencapai sifat mekanik yang optimal. Jenis *hardener* yang digunakan tergantung pada jenis resin yang dipilih, misalnya:

- Amina dan anhidrida sebagai *hardener* untuk resin epoksi.
- Peroksida organik sebagai *hardener* untuk resin poliester tak jenuh [10].

Interaksi antara resin dan *hardener* sangat mempengaruhi hasil akhir biokomposit, termasuk hubungan anyaman jute dengan MWCNT dalam matriks polimer. Pemilihan rasio resin dan *hardener* yang optimal dapat meningkatkan daya rekat antara serat dan matriks, memperbaiki sifat mekanik, serta meningkatkan efektivitas perisai EMI.

2.3 Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT)

Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) adalah salah satu jenis karbon *nanotube* (CNT) yang terdiri dari beberapa lapisan tabung karbon konsentris dengan struktur seperti grafit. MWCNT memiliki diameter luar sekitar 7–100 nm dan panjang yang dapat mencapai beberapa mikrometer. Struktur unik ini memberikan MWCNT sifat mekanik, listrik, dan termal yang luar biasa, sehingga banyak digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi tinggi, termasuk material komposit, sensor, dan perisai elektromagnetik [14]. Struktur MWCNT ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Struktur MWCNT [8]

2.3.1 Sifat-Sifat MWCNT

MWCNT memiliki beberapa sifat unggulan yang membuatnya ideal sebagai *filler* dalam material biokomposit, antara lain:

1. Konduktivitas listrik tinggi: MWCNT memiliki konduktivitas listrik yang sangat baik, menjadikannya material yang efektif untuk aplikasi perisai *electromagnetic interference* (EMI) [15].

2. Kekuatan mekanik tinggi: MWCNT memiliki modulus elastisitas yang dapat mencapai 1 TPa, sehingga meningkatkan kekuatan dan ketahanan material komposit [16].
3. Stabilitas termal tinggi: MWCNT mampu bertahan pada suhu tinggi tanpa mengalami degradasi struktural yang signifikan, menjadikannya material yang cocok untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan termal tinggi [17].

2.3.2 Modifikasi MWCNT untuk Meningkatkan Konduktivitas

MWCNT secara alami memiliki kecenderungan untuk beraglomerasi. Oleh karena itu, diperlukan teknik modifikasi permukaan seperti fungsionalisasi oksidatif atau pengikatan dengan agen penghubung (*coupling agent*) untuk meningkatkan hubungan dengan anyaman jute dan matriks polimer [16]. Fungsionalisasi MWCNT dapat meningkatkan dispersinya dalam matriks polimer serta memperkuat interaksi dengan anyaman jute.

2.3.3 Fungsionalisasi

Fungsionalisasi adalah proses modifikasi permukaan suatu material untuk meningkatkan dispersibilitas, atau reaktivitas dengan bahan lain. Dalam konteks penelitian ini, fungsionalisasi diterapkan pada MWCNT untuk meningkatkan interaksi antara keduanya dalam matriks biokomposit, sehingga memperbaiki sifat mekanik, listrik, dan efektivitas perisai EMI [17].

Beberapa metode utama fungsionalisasi MWCNT meliputi:

1. Fungsionalisasi Oksidatif: MWCNT direndam dalam larutan asam kuat (HNO_3 dan H_2SO_4) untuk membentuk gugus karboksil ($-\text{COOH}$) pada permukaannya, yang meningkatkan dispersibilitas dalam matriks polimer dan interaksi dengan anyaman jute [18].

2. Fungsionalisasi dengan Silan: Modifikasi menggunakan senyawa silan dapat meningkatkan adhesi MWCNT dengan resin epoksi atau polimer lainnya [18].
3. Fungsionalisasi Polimerisasi: Metode ini melibatkan penempelan rantai polimer ke permukaan MWCNT untuk meningkatkan hubungan dengan matriks polimer [19].

Fungsionalisasi yang dilakukan pada penelitian ini dengan menggunakan asam sulfat (HNO_3) 3 M dan hidrogen peroksida (H_2O_2) 30%. Larutan HNO_3 dan H_2O_2 dipilih karena sifat asam kuat yang mudah terionisasi, mudah menguap dan tidak merusak struktur CNT yang dimurnikan. HNO_3 sebagai pengoksidasi kuat yang bertugas memutus ikatan karbon MWCNT untuk menempelkan gugus polar, namun proses ini menyisakan kotoran residu karbon (*debris*). H_2O_2 sebagai pembersih dan pengoksidasi ringan yang bertugas menghilangkan residu karbon tersebut agar permukaan MWCNT bersih dan siap bereaksi. Sehingga MWCNT yang akan dicampurkan ke dalam resin epoksi lebih reaktif [20].

2.4 Konduktivitas Listrik

Secara umum, konduktivitas listrik merupakan ukuran kemampuan suatu material untuk menghantarkan arus listrik ketika diberi medan listrik. Kemampuan ini ditentukan oleh densitas pembawa muatan dan mobilitas muatan tersebut di dalam struktur material. Berdasarkan nilai konduktivitasnya, material dapat diklasifikasikan menjadi isolator, semikonduktor, dan konduktor.

Serat alam seperti jute secara intrinsik memiliki konduktivitas listrik yang sangat rendah, sehingga dikategorikan sebagai material isolator. Sifat isolatif ini disebabkan oleh struktur kimia selulosa yang tidak memiliki elektron bebas untuk

mengalirkan arus. Oleh karena itu, untuk mengubah komposit berbasis serat jute menjadi material konduktif yang efektif khususnya untuk aplikasi peredam interferensi elektromagnetik (*EMI shielding*) diperlukan rekayasa modifikasi permukaan menggunakan polimer konduktif dan pengisi karbon berskala nano.

2.4.1 PANI sebagai Lapisan Konduktif pada Serat

Polianilin (PANI) adalah polimer konduktif yang dapat menghantarkan arus listrik melalui pergerakan muatan di sepanjang rantai karbonnya. Agar memiliki sifat konduktif, PANI harus berada dalam bentuk garam emeraldin (*emeraldine salt*) hasil proses *doping* asam. Namun, ketika fasa garam tersebut dikonversi melalui deprotonasi menjadi bentuk fasa basa murni (*nonconducting emeraldine base*), nilai konduktivitas listriknya merosot tajam hingga berkisar pada nilai rata-rata $1,4 \times 10^{-8}$ S/cm. Bahkan, variasi deprotonasi yang lebih ekstrem dari fasa standar tersebut mampu menghasilkan konduktivitas terendah murni hingga mencapai orde 10^{-11} S/cm, yang secara efektif mengklasifikasikan material dasar ini ke dalam kelompok isolator atau semikonduktor batas bawah [21]. Maka dilakukan proses polimerisasi pada serat jute, PANI akan menempel dan membentuk lapisan tipis yang membungkus permukaan serat. Keberadaan lapisan PANI ini mengubah serat jute yang awalnya bersifat isolator menjadi material yang mampu menghantarkan arus listrik melalui lompatan elektron antar rantai polimer (*charge hopping*) [22].

2.4.2 MWCNT sebagai Jalur Konduktif

MWCNT adalah material karbon berskala nano yang memiliki konduktivitas listrik intrinsik yang sangat tinggi. Fungsionalisasi pada MWCNT berfungsi untuk memperbaiki penyebaran tabung karbon agar tidak menggumpal. Di dalam komposit, MWCNT berfungsi sebagai pengisi konduktif (*conductive filler*).

Kombinasi antara struktur fungsionalisasi MWCNT dan matriks polimer konduktif PANI secara signifikan meningkatkan efisiensi transportasi muatan elektrik [23].

2.4.3 Teori Perkolasi (*Percolation Theory*)

Peningkatan konduktivitas listrik pada komposit hibrida ini secara umum dijelaskan melalui Teori Perkolasi. Pada konsentrasi MWCNT rendah, jalur aliran listrik belum terbentuk karena jumlah *filler* terlalu sedikit. Namun, saat mencapai konsentrasi kritis (*percolation threshold*), jaringan konduktif antara serat jute terpolimerisasi PANI dan jaringan MWCNT mulai saling terhubung satu sama lain menjadi jalur kontinu di seluruh material, menyebabkan konduktivitas listrik komposit meningkat tajam secara drastis [24].

2.5 *Electromagnetic Interference (EMI)*

Dampak fatal seperti terganggunya sinyal avionik pesawat terbang oleh jaringan ponsel, serta malfungsi perangkat medis vital seperti ventilator dan monitor EKG akibat harmonisa tegangan listrik, merupakan bukti nyata betapa seriusnya ancaman *Interferensi Elektromagnetik (EMI)*.

Tantangan ini menjadi semakin kompleks seiring dengan melonjaknya ketergantungan kita pada perangkat elektronik, baik untuk kebutuhan publik maupun operasi militer yang krusial. Dalam ekosistem ini, perangkat elektronik memiliki peran ganda yang ironis, mereka tidak hanya bertindak sebagai pemicu atau sumber EMI, tetapi di saat yang sama juga rentan menjadi korban dari gangguan elektromagnetik di sekelilingnya.

Berdasarkan sumber terjadinya EMI dibagi menjadi 2, yaitu :

1. Sumber buatan Manusia (perangkat nirkabel, stasiun pemancar, jaringan listrik, industri dan medis, serta peralatan sehari-hari)

2. Sumber alami (petir, badai matahari, radiasi kosmik, *electrostatic discharge*)

Electromagnetic Compatibility (EMC) merupakan sebuah kondisi di mana perangkat elektronik mampu beroperasi secara optimal dan kebal terhadap paparan gelombang elektromagnetik dari lingkungan sekitarnya, serta secara bersamaan tidak memancarkan polusi interferensi yang dapat mengganggu peralatan lain.

Mengacu pada definisi teknis dari standar internasional seperti IEC dan IEEE, konsep EMC ini ditekankan sebagai jaminan keseimbangan dan keandalan dalam sebuah ekosistem elektronik. Kedua standar tersebut menggarisbawahi bahwa setiap peralatan harus dirancang dengan margin keamanan tertentu untuk memenuhi dua syarat mutlak, memiliki tingkat imunitas yang cukup agar tidak mengalami penurunan kinerja (*degradasi*) saat terpapar gangguan luar, serta membatasi tingkat emisi elektromagnetik agar tetap berada di bawah batas toleransi lingkungan sekitarnya [25].

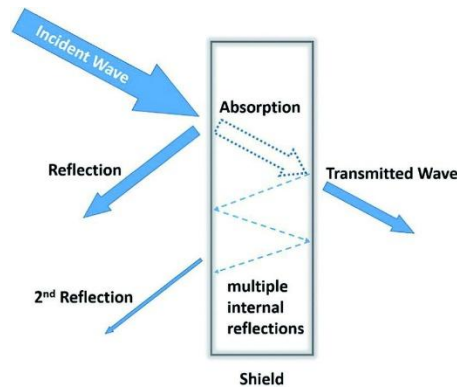
2.6 Perisai *Electromagnetic Interference* (EMI)

Perisai *electromagnetic interference* (EMI) adalah perlindungan terhadap gangguan elektromagnetik yang dapat mengganggu atau merusak kinerja perangkat elektronik. Dalam era teknologi modern, kebutuhan akan material yang mampu meredam EMI semakin meningkat, terutama dalam industri komunikasi, otomotif, dan perangkat medis.

Efektivitas perisai EMI suatu material dinilai berdasarkan *Shielding Effectiveness* (SE), yang mengukur seberapa besar material tersebut dapat mengurangi intensitas medan elektromagnetik. Terdapat tiga mekanisme utama dalam perisai EMI [26] :

1. Refleksi – Terjadi ketika gelombang elektromagnetik dipantulkan oleh permukaan material konduktif, seperti logam atau material berbasis karbon.
2. Absorpsi – Terjadi ketika energi elektromagnetik diserap oleh material melalui interaksi dengan elektron bebas atau dipol dalam struktur material.
3. Pantulan Berganda (*Multiple Reflection*) – Terjadi di dalam material dengan struktur berpori atau *multilayer*, di mana gelombang elektromagnetik mengalami banyak pantulan sebelum akhirnya melemah.

Mekanisme *shielding effectiveness* dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Mekanisme SE (Diadaptasi dari Hightop Metal, 2024)

Sehingga rumus untuk mencari nilai *Shielding Effectiveness* (SE) dari *S-parameter* (S_{11} , S_{12} , S_{21} , dan S_{22}) dapat dilihat pada persamaan (2.1 – 2.3).

$$SE_T = SE_R + SE_A \quad (2.1)$$

$$SE_A = 10 \times \log_{10}\left(\frac{1}{1 - |S_{11}|^2}\right) \quad (2.2)$$

$$SE_R = 10 \times \log_{10}\left(\frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{21}|^2}\right) \quad (2.3)$$

Dimana, SE_T adalah SE total, SE_R adalah SE refleksi, dan SE_A adalah SE absorpsi.

Secara eksperimental melalui alat *Vector Network Analyzer* (VNA), fenomena fisik ini dikuantifikasi menggunakan parameter hamburan (*scattering parameters*), di

mana parameter S_{11} merepresentasikan koefisien refleksi tegangan dan S_{21} merepresentasikan koefisien transmisi tegangan.

Korelasi langsung antara parameter S_{11} dengan panah pantulan (*Reflection*) dinyatakan melalui koefisien refleksi daya, yaitu $R = |S_{11}|^2$. Persamaan ini menunjukkan rasio daya gelombang yang dipantulkan kembali oleh permukaan luar pelindung terhadap daya gelombang datang (*Incident Wave*). Sementara itu, sisa gelombang yang tidak dipantulkan akan masuk ke dalam material pelindung dan mengalami pelemahan energi. Gelombang yang masuk ini berinteraksi dengan struktur internal material sehingga menghasilkan mekanisme absorpsi (*Absorption*) dan refleksi internal ganda (*Multiple Internal Reflections*), sebelum akhirnya sebagian kecil lolos sebagai *Transmitted Wave* ($T = |S_{21}|^2$).

Perhitungan nilai SE tetap dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan teoritis berdasarkan rumus (2.4 – 2.7).

$$SE_A = 20 \log e^{\left(\frac{-t}{\delta}\right)} = 8,7 \left(\frac{t}{\delta}\right) \quad (2.4)$$

Dengan :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.5)$$

$$SE_R = 20 \log\left(\frac{Z_o}{4Z_s}\right) \quad (2.6)$$

Dengan :

$$Z_o = 377 \, \Omega \text{ dan } Z_s = \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}} \quad (2.7)$$

Mekanisme SE_A merupakan proses redaman di dalam material, di mana energi gelombang elektromagnetik dikonversi menjadi energi termal melalui interaksi dengan pembawa muatan. Secara teoritis, nilai SE_A berbanding lurus dengan ketebalan material (t) dan berbanding terbalik dengan *skin depth* (δ). Peningkatan konduktivitas listrik (σ) akan memperkecil nilai δ . Oleh karena itu, material dengan

konduktivitas tinggi dapat memaksimalkan penyerapan energi gelombang (Nilai SE_A besar) karena memiliki nilai *skin depth* yang kecil [27].

Sementara itu, SE_R terjadi di permukaan material akibat adanya ketidaksesuaian impedansi (*impedance mismatch*) antara impedansi ruang hampa ($Z_0 = 377 \Omega$) dengan impedansi material perisai (Z_s). Secara teori, nilai Z_s berbanding terbalik dengan konduktivitas (σ), peningkatan konduktivitas akan memperkecil nilai Z_s . Kondisi ini akan meningkatkan nilai SE_R yang memicu pemantulan gelombang secara masif tepat di permukaan material (bersifat seperti logam) [27].

Dalam penelitian ini, material perisai EMI dikembangkan menggunakan biokomposit berbasis anyaman jute terpolimerisasi dan MWCNT terfungsionalisasi. Kombinasi ini diharapkan mampu menghasilkan material perisai yang ringan, ramah lingkungan, mampu memperkuat mekanisme refleksi dan mengurangi mekanisme absorpsi dalam perisai EMI [28].

2.7 Penelitian Terdahulu

Ferreira dkk.[29] mengeksplorasi fungsionalisasi permukaan kain serat jute alamiah menggunakan nanopartikel perak guna menghasilkan struktur serat yang konduktif. Selaras dengan pengujian material kontrol, karakterisasi awal dilakukan pada substrat kain jute murni tanpa fungsionalisasi (*pristine jute*) yang terlebih dahulu diberi pratransformasi berupa corona plasma sebagai metode pembersihan ramah lingkungan pengganti zat kimia berbahaya. Hasil pengukuran instrumen menggunakan metode *two-point probe* menunjukkan bahwa serat jute tanpa modifikasi bertindak sebagai isolator listrik yang sangat kuat, dengan nilai resistivitas murni yang sangat tinggi yaitu mencapai $1,5 \times 10^7 \Omega.m$. Jika nilai resistivitas tersebut dikonversikan ke dalam parameter hantaran listrik murni, maka

serat jute dasar ini terbukti memiliki nilai konduktivitas alamiah yang sangat rendah, yaitu berada di kisaran $6,67 \times 10^{-8}$ S/m. Batas ambang kelistrikan yang sangat rendah ini memvalidasi bahwa serat alam murni tanpa agen pengisi (*filler*) konduktif memiliki rute kelistrikan yang terisolasi secara masif, sebuah data fondasi sifat fisik (data kontrol) yang sangat esensial sebelum material tersebut ditransformasikan lebih lanjut melalui deposisi partikel logam konduktif guna mengoptimalkan konduktivitasnya.

Reis dkk.[30] Dalam pendekatan yang lebih menitikberatkan pada perancangan biokomposit pelindung elektromagnetik menggunakan matriks epoksi, 30 wt.% anyaman serat jute, dan *filler Carbon Black* (CB) sebesar 5 wt.%. Penambahan partikel karbon konduktif ini difokuskan untuk menutupi rongga mikro antar serat jute guna memperkuat mekanisme penyerapan (*absorption loss*) gelombang yang datang. Hasil karakterisasi membuktikan bahwa dispersi 5 wt.% *Carbon Black* berhasil meningkatkan nilai redaman secara signifikan dari *baseline* -2 dB menjadi rentang efektivitas SE antara -5 dB hingga -8 dB. Walaupun telah berhasil memanfaatkan paduan serat alam dan karbon, penelitian ini masih menggunakan partikel karbon konvensional berdimensi makro yang memiliki rasio aspek konduktivitas lebih rendah dibandingkan material *nanotube*, sehingga masih menyisakan ruang optimasi untuk menciptakan komposit dengan nilai redaman yang lebih tajam (melewati -8 dB) pada rentang frekuensi yang lebih luas.

Widyawati dkk.[8] mengeksplorasi kelayakan material komposit berbahan dasar serat kelapa yang dilapisi oleh polianilin (PANI) dengan penguat *Multi-Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT) untuk aplikasi pelindung interferensi elektromagnetik (EMI). Proses preparasi spesimen diawali dengan merendam serat

alam ke dalam larutan alkali NaOH 2%, yang selanjutnya dipolimerisasi menggunakan PANI. Material komposit kemudian difabrikasi melalui teknik pengepresan dengan memadukan resin epoksi, dispersi MWCNT, dan fraksi berat serat kelapa yang divariasikan pada persentase 5%, 10%, serta 15%. Berbagai evaluasi karakteristik material dilakukan, mencakup uji konduktivitas listrik melalui metode empat titik, pengujian mekanik tarik merujuk pada standar ASTM D638-1, serta pengukuran efektivitas perisai (SE) pada spektrum 1–20 MHz menggunakan sepasang antena monopole. Hasil karakterisasi membuktikan adanya korelasi positif antara penambahan massa serat kelapa dengan konduktivitas material, di mana variasi komposit 15% serat kelapa mencetak angka tertinggi sebesar 0,0458 S/m. Berbanding terbalik dengan hal tersebut, ketahanan mekanik komposit justru melemah seiring bertambahnya serat, dengan kekuatan tarik maksimal yang hanya menyentuh 26,78 MPa pada variasi 5% serat kelapa. Sementara itu, performa redaman elektromagnetik (SE) komposit ini menghasilkan nilai puncak sebesar -7,69 dB, sebuah capaian yang menyimpulkan bahwa modifikasi material ini masih berada pada taraf rendah dan belum optimal untuk perlindungan EMI.

Tio dkk.[20] menginvestigasi dampak fungsionalisasi kimiawi dan peningkatan fraksi volume partikel *Multi-Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT) guna mendongkrak konduktivitas material *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Tujuan sentral dari riset ini adalah merekayasa CFRP menjadi material penangkal sambaran petir yang lebih efisien, mengingat sifat bawaan dielektrik matriks polimer umumnya sangat buruk dalam menghantarkan arus. Tahapan eksperimen melibatkan modifikasi MWCNT melalui perendaman di dalam larutan asam nitrat

(HNO₃) 3M yang dipanaskan, untuk kemudian dinetralkan dengan air deionisasi dan dikeringkan. Matriks resin epoksi yang telah didispersikan dengan MWCNT terfungsionalisasi (menggunakan variasi 2%, 5%, 8%, dan 10%) lalu diinfusikan ke dalam susunan anyaman serat karbon 3K *twill* (dengan variasi dua dan empat lapis) menggunakan metode *vacuum infusion molding*, sebelum diakhiri dengan proses *curing* suhu ruang selama 8 jam. Hasil pengujian menyimpulkan bahwa kombinasi antara empat lapis serat karbon bersama pembebanan 10% MWCNT berhasil meroketkan konduktivitas listrik secara masif ke angka 0,634 S/m. Lebih jauh, riset ini memvalidasi bahwa perlakuan kimiawi pada MWCNT memainkan peran yang sangat krusial, karena mampu menjembatani interaksi antar muka yang jauh lebih rekat dengan matriks polimer dibandingkan jika menggunakan MWCNT murni.

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 Tegangan Tinggi, Teknik Elektro, UNILA.

Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi, UNILA.

Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Sub Laboratorium
Elektronika Cisitu.

3.2 Jadwal Kegiatan Penelitian

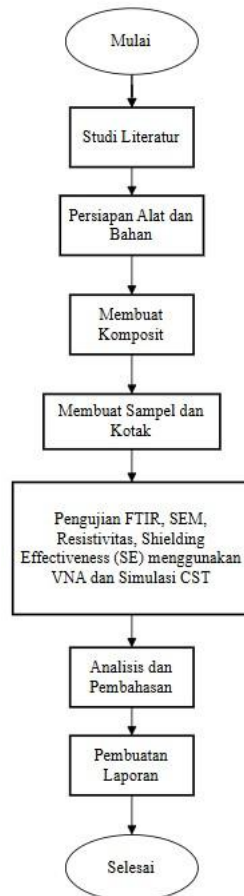
Adapun jadwal kegiatan penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	Jun 25	Jul– Ags 25	Sep– Okt 25	Nov– Des 25	Jan– Feb 26	Mar– Apr 26	Mei 26	Jun 26
1	Studi literatur								
2	Perancangan metode								
3	Seminar Usul								
4	Pembuatan material								
5	Pengujian dan pengambilan data								
6	Analisis pembahasan								
7	Seminar Kompre								

3.3 Diagram Alir Penelitian (*Flowchart*)

Diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1. Dimulai dengan studi literatur, perancangan metode, mempersiapkan alat dan bahan yang akan digunakan, melakukan pembuatan kotak pelindung yang akan di uji, FTIR dan SEM, pengukuran resistivitas, dan *Shielding Effectiveness* (SE). Data yang didapat kemudian dianalisis untuk mendapatkan kesimpulan.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.4 Alat dan Bahan yang Digunakan

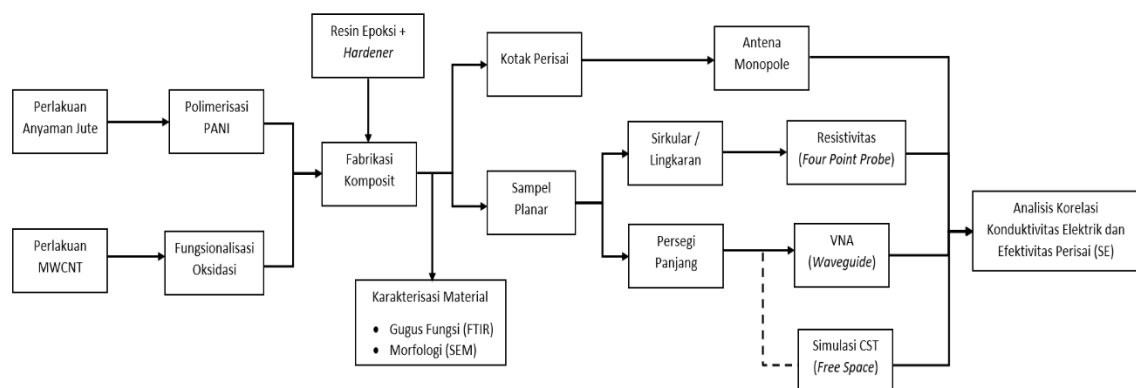
Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1. 1 buah gelas ukur (100 mL) | 16. Cairan <i>Polyvinyl alcohol</i> (PVA) |
| 2. 2 buah gelas ukur (250 mL) | 17. Asam klorida (HCl) |
| 3. 1 buah gelas beker (1 Liter) | 18. <i>Hot plate magnetic stirrer</i> |
| 4. 2 buah gelas beker (500 mL) | 19. Anilin (C ₆ H ₅ NH ₂) |
| 5. 1 buah Labu (500 mL) | 20. Ammonium Persulfate (APS) |

- | | |
|-------------------------------|--|
| 6. Timbangan | 21. 25 Liter air akuades |
| 7. Sendok | 22. Resin <i>Lycal</i> 1011 |
| 8. Gunting atau <i>Cutter</i> | 23. <i>Multi Walled Carbon Nanotubes</i> |
| 9. Penggaris | 24. HNO_3 3 M |
| 10. <i>Mixer</i> | 25. Cairan H_2O_2 30% |
| 11. Sarung Tangan dan Masker | 26. Kertas Saring |
| 12. Solder dan Timah | 27. Generator Fungsi |
| 13. Cetakan ukuran 17 x 17 cm | 28. Osiloskop |
| 14. NaOH 2% | 29. Dua Antena Monopole |
| 15. Anyaman Jute 1 kg | 30. Laptop dan Alat Tulis |

3.5 Prosedur Percobaan

Prosedur percobaan pada pembuatan spesimen komposit hingga proses pengujian dibagi menjadi beberapa bagian sebagaimana ditampilkan pada diagram blok di Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Blok Penelitian

3.5.1 Perlakuan Terhadap Anyaman Jute

Perlakuan alkalisasi menggunakan NaOH 2% dilakukan untuk melarutkan hemiselulosa, lignin, dan pengotor permukaan, yang bertujuan meningkatkan kekasaran topografi serat dan mengoptimalkan ikatan interfasiyal (*mechanical interlocking*) antara anyaman jute dan matriks resin. Berikut adalah tahapan yang dilakukan dalam perlakuan anyaman jute:

1. Menyediakan anyaman jute yang telah dipotong $\pm 3 \times 3$ cm yang ditampilkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Anyaman Jute

2. Merendam anyaman jute dengan NaOH 2 % selama 2 jam yang ditampilkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Rendaman Anyaman Jute dengan 2% NaOH

3. Anyaman jute yang sudah direndam kemudian dicuci dengan akuades hingga bersih yang ditampilkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Pencucian Anyaman Jute dengan Akuades

4. Kemudian anyaman jute di oven dengan suhu 110° selama 6 jam yang hasilnya ditampilkan pada Gambar 3.6.

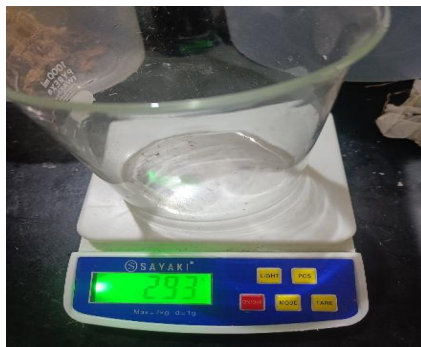


Gambar 3.6 Hasil Perlakuan Anyaman Jute

3.5.2 Polimerisasi Anyaman Jute Dilapisi Polianilin

Polimerisasi anyaman jute dilakukan untuk meningkatkan konduktivitas pada anyaman jute, berikut proses yang perlu dilakukan :

1. Anyaman jute yang sudah diberikan perlakuan NaOH kemudian dipotong ± 10 mm dan ditimbang sebanyak 25 gram yang ditampilkan pada Gambar 3.7 (a) – (b).



(a)



(b)

Gambar 3.7 Berat Jute 25 gram

(a) Berat kosong dari wadah, (b) Berat dari Anyaman Jute sebesar 25 gram

2. Persiapkan larutan penyusun polianilin, polianilin terdiri dari HCl (0,1 mol/L), Anilin (0,2 mol/L), dan APS (0,1 mol/L) yang ditampilkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Penyiapan HCl, APS dan Anilin untuk Polimerisasi

3. Kemudian campurkan 25 gram serat dan 250 mL HCl (0,1 mol/L) lalu diaduk menggunakan HPMS selama 10 menit. Proses dilanjutkan dengan menambahkan 200 mL anilin (0,2 mol/L) aduk kembali selama 10 menit. Lalu tambahkan 160 mL APS (0,1 mol/L) dan kembali diaduk selama 6 jam, proses ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Pencampuran HCl, Anilin, dan APS menggunakan HPMS

4. Hasil polimerisasi di saring dan dicuci dengan akuades, setelah dicuci proses dilanjutkan dengan memasukkan ke oven selama 6 jam dengan suhu 45° , hasil ditampilkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Hasil Polimerisasi Anyaman Jute

3.5.3 Fungsionalisasi MWCNT

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

1. Menimbang MWCNT yang akan difungsionalisasi seberat 8 gram yang ditampilkan pada Gambar 3.11 (a) – (b).



(a)



(b)

Gambar 3.11 Berat MWCNT 8 gram

(a) Berat kosong dari wadah, (b) Berat dari MWCNT sebesar 8 gram

2. Melakukan pengenceran HNO_3 65% (14,34 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 yang ditampilkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Pencampuran MWCNT dengan HNO_3

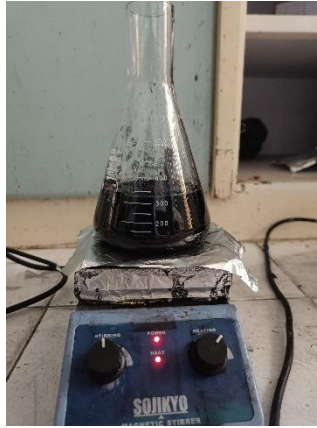
4. Menyaring hasil pencampuran MWCNT dengan HNO_3 menggunakan kertas saring, yang ditampilkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Proses Penyaringan MWCNT dengan HNO_3

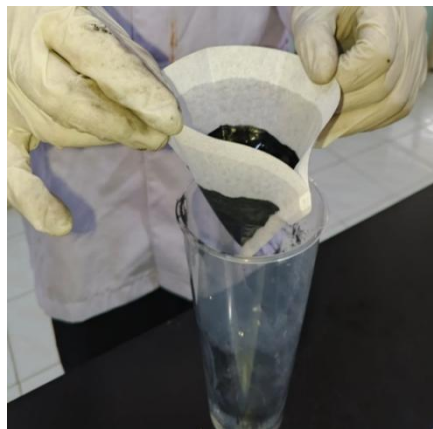
5. Melakukan pengenceran H_2O_2 50% menjadi 30%. Untuk melakukan pengenceran tersebut maka H_2O_2 harus di campur akuades. Pada penelitian ini dibutuhkan 325 ml H_2O_2 30%. Diperlukan 195 mL H_2O_2 50% dan akuades sebanyak sebanyak 130 ml untuk mencapai H_2O_2 30% sebanyak 325 mL.

6. MWCNT hasil penyaringan lalu dicampurkan kedalam 325 ml H_2O_2 30% dengan perlakuan yang sama saat proses pencampuran HNO_3 yang ditampilkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Pencampuran Saringan MWCNT+ HNO_3 dengan H_2O_2

7. Menyaring hasil pencampuran setelah penambahan H_2O_2 menggunakan kertas saring yang ditampilkan pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Proses Penyaringan Akhir Fungsionalisasi

8. Hasil fungsionalisasi kemudian dikeringkan dengan oven dengan suhu 100°C selama 2 jam, hasil ditampilkan pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16 Hasil Akhir Fungsionalisasi MWCNT

Semua perhitungan untuk penyiapan larutan pada perlakuan anyaman jute dan MWCNT di cantumkan pada Lampiran I.

3.5.4 Fabrikasi, Pencetakan dan Pemotongan Komposit

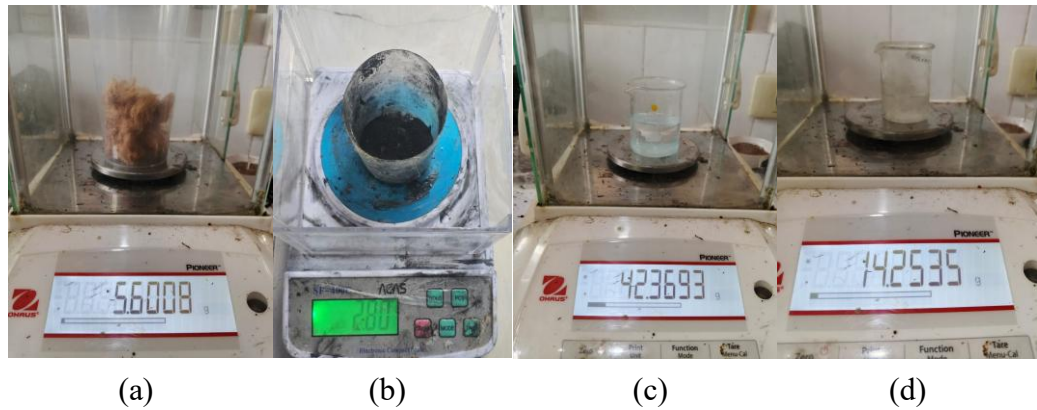
Setelah proses polimerisasi dan fungsionalisasi selesai dilakukan, selanjutnya proses pembuatan sampel pengujian komposit akan dilakukan, dimana fabrikasi dilakukan dengan mencampurkan anyaman jute terpolimerisasi, MWCNT terfungsionalisasi, serta matriks polimer yang terdiri dari gabungan Resin *Lycal* 1011 dengan *hardener* yang memiliki perbandingan 3:1, berikut proses fabrikasi, pencetakan, dan pemotongan komposit yang di lakukan :

1. Menyiapkan cetakan kaca berukuran 17 x 17 cm, lapis kaca dengan *Polyvinyl Alcohol* agar material mudah dilepaskan dari cetakan setelah mengeras, proses ditampilkan pada Gambar 3.17.



Gambar 3.17 Persiapan Pelapisan Kaca dengan *Polyvinyl Alcohol*

2. Siapkan semua material yang akan di campurkan menjadi komposit, campuran terdiri dari anyaman jute, MWCNT, resin dan *hardener*. Material penyusun komposit tersebut ditampilkan pada Gambar 3.18 (a) – (d)..



Gambar 3.18 Penyusun Komposit

(a) Anyaman Jute 10%, (b) MWCNT 5%, (c) Resin 42 mL, (d) *Hardener* 14 mL

3. Menggunakan metode *hand lay up*, campurkan semua komponen penyusun komposit lalu taburkan pada cetakan yang sudah dilapisi PVA, proses ditampilkan pada Gambar 3.19.



Gambar 3.19 Pencampuran Semua Komponen pada Cetakan Kaca

4. Setelah semua penyusun material komposit menyatu di cetakan, tutup kembali bagian atas cetakan dengan kaca yang juga sudah dilapisi dengan PVA. *Press*

cetakan dan diamankan selama 12 jam untuk memastikan bahwa campuran telah mengeras sempurna.

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 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 berukuran 1 x 0,5 cm.
- Pengujian Resistivitas menggunakan material berbentuk piringan berdiameter 10,5 cm.
- Pengukuran *shielding effectiveness* menggunakan Kotak Perisai EMI berukuran 15 x 8 x 5 cm.
- Pengukuran *shielding effectiveness* menggunakan VNA menggunakan sampel planar persegi berukuran 4 x 2,5 cm (rentang *C-Band*).

3.6 Metode Pengukuran

Bagian ini menjelaskan metode yang digunakan untuk melakukan pengujian terhadap perangkat dan sistem yang menjadi objek penelitian. Pengujian dilakukan

untuk memperoleh data karakteristik kinerja alat berdasarkan parameter-parameter tertentu. Adapun jenis pengujian yang dilakukan meliputi:

3.6.1 Pengujian *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).

3.6.2 Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

3.6.3 Pengujian Resistivitas Volume dengan Metode *Four-Point Probe*.

3.6.4 Pengujian *Shielding Effectiveness* (SE) pada VNA.

3.6.5 Pengujian *Shielding Effectiveness* (SE) pada Kotak Perisai EMI.

3.6.6 Simulasi CST *Studio Suite* pada Uji VNA.

Setiap pengujian dilaksanakan berdasarkan prosedur yang mengikuti standar teknis yang berlaku untuk memastikan keakuratan, konsistensi, dan validitas hasil yang diperoleh.

3.6.1 Pengujian *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

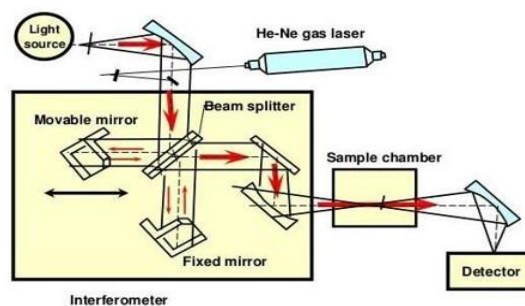
Fourier Transform Infrared (FTIR) merupakan instrumen analitik non-destruktif yang digunakan untuk mendeteksi gugus fungsi, mengidentifikasi senyawa, serta menganalisis komposisi campuran dalam suatu sampel. Dalam penelitian ini, karakterisasi sampel dilakukan menggunakan instrumen FTIR model *Agilent Cary 630* ditampilkan pada Gambar 3.21.



Gambar 3.21 *Agilent Cary 630 Spectrometer* [8]

Sebelum alat digunakan, tempat sampel dibersihkan terlebih dahulu menggunakan etanol. Adapun prinsip kerja utama FTIR melibatkan pancaran radiasi inframerah

(melalui proses interferensi) menuju sampel. Celah pada instrumen berfungsi untuk mengontrol intensitas energi radiasi yang masuk. Ketika radiasi mengenai sampel, akan terjadi proses penyerapan (absorbansi) pada panjang gelombang tertentu, sementara sisa radiasi akan ditransmisikan. Radiasi yang ditransmisikan ini akan diterima oleh detektor, diubah menjadi sinyal terukur, dan akhirnya dikirim ke komputer yang telah dilengkapi perangkat lunak MicroLab untuk dianalisis menjadi spektrum inframerah. Ilustrasi prinsip kerja dari pengujian FTIR ditampilkan pada Gambar 3.22.



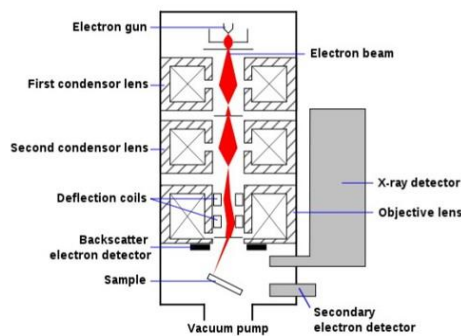
Gambar 3.22 Skematik Pengujian FTIR [8]

3.6.2 Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Secara prinsip dasar, SEM ZEISS beroperasi menggunakan mekanisme pemindaian berkas elektron berenergi tinggi dalam kondisi vakum. Sistem ZEISS umumnya dikenal dengan desain kolom elektronnya yang presisi yang mampu menekan aberasi optik dan memberikan resolusi tinggi bahkan pada tegangan akselerasi rendah.

Scanning Electron Microscopy (SEM) beroperasi dalam kondisi vakum dengan menembakkan berkas elektron berenergi tinggi dari *electron gun*, yang kemudian difokuskan menjadi titik berskala nanometer oleh serangkaian lensa elektromagnetik. Berkas elektron yang sangat terpusat ini diarahkan oleh kumparan pemindai untuk menyapu permukaan spesimen secara sistematis dalam pola *raster*

(baris demi baris). Saat elektron membentur spesimen, interaksi energi kinetik tersebut memicu pelepasan berbagai sinyal, terutama elektron sekunder yang memberikan informasi detail mengenai topografi, dan elektron hambur balik yang menunjukkan kontras komposisi fasa atau unsur. Sinyal-sinyal yang terpancar ini kemudian ditangkap oleh detektor khusus, diubah menjadi tegangan listrik, lalu diproses dan dipetakan oleh sistem perangkat lunak komputer menjadi citra digital beresolusi tinggi yang menampilkan morfologi permukaan material secara akurat. Ilustrasi prinsip kerja dari pengujian SEM ditampilkan pada Gambar 3.23.



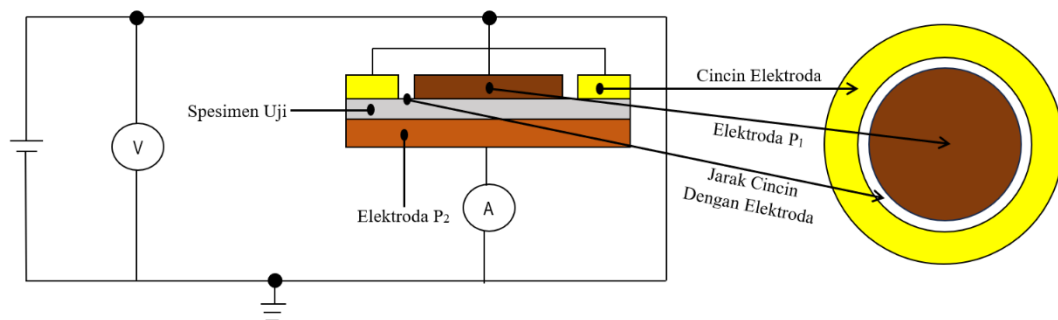
Gambar 3.23 Skematik Pengujian SEM [20]

3.6.3 Pengukuran Resistivitas Volume dengan Metode *Four-Point Probe*

Pengujian konduktivitas listrik dilakukan dengan metode pengujian resistivitas pada material padat. Pengujian dilakukan dengan meletakkan spesimen uji diantara dua elektroda yang bertegangan. Alat dan bahan yang digunakan dalam melakukan pengujian pada penelitian ini adalah sebagai berikut ini.

- | | |
|--|-------------------------------|
| 1. Elektroda piring (P_1) $d=79$ mm | 6. Sumber tegangan (Aki 12 V) |
| 2. Elektroda piring (P_2) $d=105$ mm | 7. Voltmeter |
| 3. Elektroda cincin 12 mm | 8. Amperemeter |
| 4. Kabel | 9. Kamera |
| 5. Penjepit Buaya | 10. Saklar |

Spesimen yang akan diuji terlebih dahulu dipotong dengan diameter 105 mm yang disesuaikan dengan cincin elektroda pengujian pada alat ukur resistivitas volume. Spesimen uji diletakan diantara dua elektroda P_1 dengan P_2 , dan jarak antara elektroda P_1 dengan cincin sebesar 1 mm. Sumber yang digunakan pada pengujian ini adalah sumber DC sebesar 38 volt. Pada pengujian yang menggunakan metode pengujian resistivitas volume pada material padat ini variabel yang didapatkan adalah arus dan tegangan. Kemudian menghitung resistansi volume spesimen dari rasio tegangan dan arus. Adapun rangkaian pengujian pada penelitian ini ditampilkan pada Gambar 3.24.



Gambar 3.24 Skematik Pengukuran Resistivitas Volume

Jika suatu material isolasi ditempatkan diantara dua elektroda yang berbeda tegangan, maka arus pada sumber tegangan nilainya sama dengan jumlah arus pada permukaan dengan arus volume. Pada penelitian ini, nilai arus permukaan sangat kecil sehingga arus yang terbaca adalah arus volume. Jika arus permukaan dibuat sama dengan nol, resistansi yang terukur adalah resistansi volume.

$$R_V = \frac{V}{I_V} \quad (3.1)$$

Resistansi material isolasi bisa diukur dengan cincin konsentris yang terbuat dari dua elektroda piring dan satu elektroda cincin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.24. Radius efektif elektroda pengukuran cincin konsentris adalah:

$$\tau = \frac{2s}{\pi} \ln \cosh \frac{\pi g}{4s} \quad (3.2)$$

$$r = r_1 + \frac{g}{2} - \tau \quad (3.3)$$

Dengan:

r_1 = Radius Elektroda P₁ (39,5 mm)

g = Jarak sela elektroda P₁ dengan elektroda cincin (1 mm)

s = Tebal Material (mm)

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

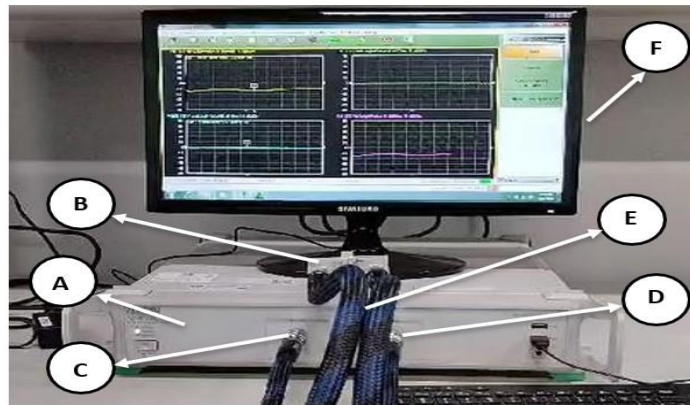
$$\rho_v = \frac{R_v \pi r^2}{s} \quad (3.4)$$

Kemudian, nilai konduktivitas material didapatkan dengan persamaan:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_v} \quad (3.5)$$

3.6.4 Pengujian *Shielding Effectiveness* (SE) pada VNA.

Pengukuran *Shielding Effectiveness* (SE) menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) merupakan metode analitik standar yang paling komprehensif dalam mengevaluasi performa material pelindung interferensi elektromagnetik (EMI). Tujuan mendasar dari pengujian menggunakan instrumen ini adalah untuk mengekstraksi nilai parameter hamburan atau *S-parameter* (S_{11} , S_{12} , S_{21} , dan S_{22}) yang merepresentasikan interaksi propagasi gelombang saat menabrak dan melewati spesimen biokomposit uji. Pengujian sampel ini menggunakan VNA tipe Anritsu MS46322A dan *Waveguide WR 137*. Desain pengukuran SE menggunakan VNA ditunjukkan pada Gambar 3.25.



Gambar 3.25 Rangkaian Uji VNA (Diadaptasi dari Anisa, 2024)

Keterangan: A. *Vector Network Analyzer* (VNA) D. Port 2

B. *Waveguide WR 137*

E. Kabel Koaksial

C. Port 1

F. Monitor (*S-Parameter*)

Pengujian *S-parameter* pada sampel dilakukan dalam rentang frekuensi *C-band* menggunakan *waveguide* pada rentang frekuensi dari 5,85 – 8,2 GHz. Hasil pengujian VNA menghasilkan data *S-parameter* dalam 2 bentuk, baik dalam bentuk real – imajiner dan desibel. Pengujian dilakukan dalam 2 keadaan, dimana keadaan pertama ketika sampel tidak dimasukkan kedalam *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:

$$|S_{21}| = \sqrt{(\text{Re } S_{21})^2 + (\text{Im } S_{21})^2} \quad (3.6)$$

$$SE_T = 20 \log \frac{|S_{21} \text{ sampel}|}{|S_{21} \text{ referensi}|} \quad (3.7)$$

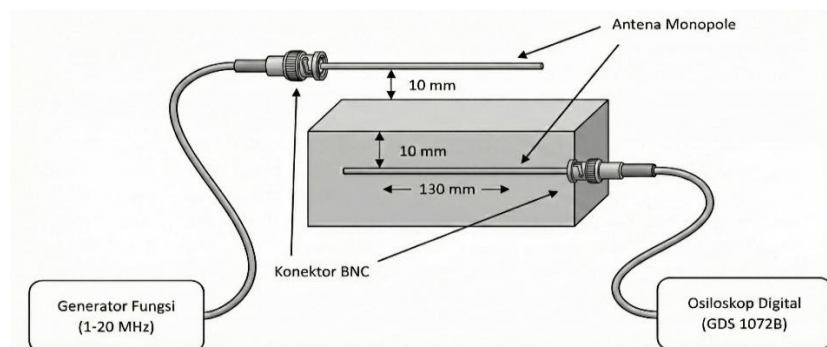
Fungsi paling mendasar dari sebuah material perisai adalah untuk mencegah energi elektromagnetik masuk ke atau keluar dari suatu ruang. Karena S_{21} secara langsung mengukur persentase gelombang yang bocor atau lolos menembus material

pelindung, parameter ini menjadi indikator utama keberhasilan perisai. Terlepas dari bagaimana cara material tersebut melemahkan gelombang elektromagnetik di dalamnya, selama nilai $|S_{21}|$ mendekati nol, maka material tersebut telah sukses menjalankan tugas utamanya sebagai perisai pelindung. Itulah sebabnya S_{21} menjadi sorotan utama dalam mengevaluasi efektivitas perisai.

3.6.5 Pengukuran SE pada Kotak Perisai EMI

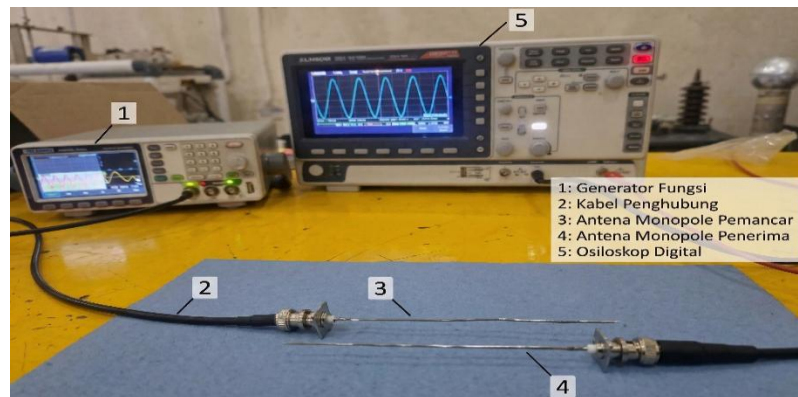
Sistem pengukuran menggunakan dua antenna monopole, yaitu satu antenna sebagai pemancar (Tx) yang dihubungkan ke function generator sebagai sumber sinyal dan ditempatkan di luar kotak, serta satu antenna lainnya sebagai penerima (Rx) yang terhubung ke osiloskop melalui konektor BNC dan ditempatkan di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

Dalam pengujian *shielding effectiveness*, material perisai ditempatkan di antara antenna Tx dan Rx. Material ini berfungsi sebagai penghalang untuk mengurangi atau menghambat transmisi sinyal elektromagnetik dari Tx ke Rx. Dengan mengukur perbedaan level sinyal yang diterima oleh Rx dengan dan tanpa material perisai, dapat dihitung seberapa efektif material tersebut dalam menghalangi sinyal. Semakin besar penurunan sinyal yang diterima (diukur dalam desibel, dB), semakin tinggi nilai *shielding effectiveness* nya. Skematik pengujian pada kotak perisai EMI ditunjukkan pada Gambar 3.26.

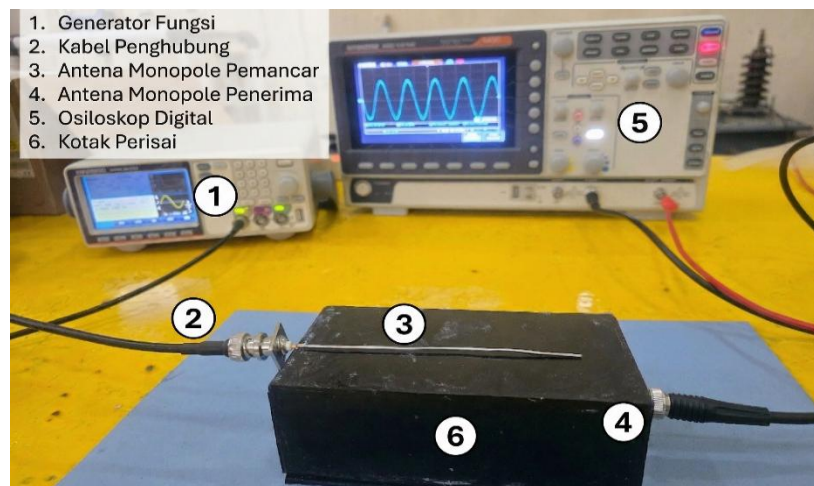


Gambar 3.26 Desain Pengujian SE pada Kotak Perisai EMI

Pengujian dilakukan pada 2 kondisi, yakni tanpa kotak dan dengan kotak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.27 – 3.28.



Gambar 3.27 Rangkaian Uji SE tanpa Kotak Perisai EMI



Gambar 3.28 Rangkaian Uji SE dengan Kotak Perisai EMI

Generator sinyal berfungsi untuk membangkitkan sinyal pulsa pada frekuensi tertentu (pada percobaan ini menggunakan 1-20 MHz) yang akan dipancarkan oleh antena monopole pengirim. Kemudian antena monopole penerima diletakkan didalam kotak pelindung. Antena monopole sebagai penerima dihubungkan dengan osiloskop untuk menampilkan gelombang yang diterima. Oleh karena itu pengukuran parameter dilakukan sebelum dan sesudah menggunakan kotak pelindung. Besar sinyal yang ditangkap oleh antena penerima ditampilkan pada osiloskop, nilai tegangan sinyal diterima terbaca dalam satuan mV. Kemudian

perhitungan hasil pengukuran *Shielding Effectiveness* (SE) menggunakan persamaan 3.8 dimana tegangan terbaca tanpa kotak dibandingkan dengan tegangan terbaca dengan kotak.

$$SE = 20 \log \frac{V_{dengan}}{V_{tanpa}} \quad (3.8)$$

Hasil perhitungan SE akan bernilai negatif dengan satuan desibel (dB).

3.6.6 Simulasi CST *Studio Suite* pada Uji VNA

CST *Studio Suite* adalah perangkat lunak simulasi elektromagnetik 3D komprehensif yang digunakan untuk merancang dan menganalisis perilaku komponen pada frekuensi tinggi. Penggunaan perangkat ini sangat krusial dalam memvalidasi hasil pembacaan VNA karena kemampuannya yang superior dalam mereplikasi lingkungan pengujian fisik ke dalam model digital. Dibandingkan dengan aplikasi simulasi lainnya, CST menawarkan keunggulan spesifik berupa *Time Domain Solver* berbasis *Finite Integration Technique* (FIT) yang sangat efisien untuk mengekstraksi data pada rentang frekuensi yang lebar (*broadband*). Selain itu, fitur pendefinisian properti material yang sangat detail di dalam CST memungkinkan simulasi interaksi gelombang elektromagnetik terhadap material uji menjadi jauh lebih akurat, sehingga menghasilkan korelasi *S-parameter* yang sangat identik dengan hasil pengukuran VNA di dunia nyata dalam keadaan ideal. Tujuan utama dari simulasi ini adalah untuk mereplikasi lingkungan pengujian secara digital. Dengan menyandingkan data empiris dari VNA dan data numerik dari CST, kita dapat mengidentifikasi pergeseran frekuensi atau anomali yang mungkin terjadi akibat ketidaksempurnaan peralatan, toleransi fabrikasi maupun gangguan eksternal seperti *noise* dari lingkungan atau dari perangkat elektromagnetik lain pada saat pengujian langsung.

Simulasi CST membutuhkan beberapa inputan dari *user* agar bekerja menyerupai kondisi material di keadaan nyata, misalnya ketebalan material, massa jenis (ρ), dan permitivitas relatif material (ϵ_r) pada masing-masing frekuensi yang dihitung menggunakan pendekatan matematis *Nicholson Ross Weir* (NRW), sedangkan untuk gap antara port dan material dibuat tertutup sehingga tidak ada hamburan sinyal yang keluar dari area simulasi. Panjang dan lebar material juga dibuat konstan dalam parameter simulasi CST karena ke 9 variasi sampel memiliki nilai yang sama yaitu 4 x 2,5 cm sesuai dengan *waveguide WR 137* untuk rentang *C-band*.

Untuk ketebalan material, data sudah didapatkan ketika melakukan pengukuran resistansi volume, sehingga tidak perlu melakukan perhitungan.

Untuk massa jenis (ρ) material, hitung terlebih dahulu total massa untuk semua komponen penyusun biokomposit (Serat, MWCNT, Resin, dan *Hardener*), kemudian hitung volume total dari ukuran cetakan kaca yakni 17 x 17 cm (sebagai panjang dan lebar) dan ketebalan cetakan/material (sebagai tinggi). Kemudian, hitung massa jenis dengan persamaan:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.9)$$

Massa jenis material memiliki satuan kg/m^3 , inputkan nilai massa jenis kedalam ke CST pada sub menu *material properties* di bagian *density*.

Langkah selanjutnya hitung permitivitas relatif material (ϵ_r /epsilon) yang dihitung menggunakan pendekatan matematis *Nicholson Ross Weir* (NRW). Gabungkan data S_{11} dan S_{21} dari percobaan VNA baik untuk sampel maupun referensi yang masih dalam bentuk real – imajiner sebagai pondasi awal menghitung nilai epsilon.

Selanjutnya, kita akan menghitung K (konstanta menengah) yang merepresentasikan S -parameter yang telah dieliminasi dari efek propagasi internal material dengan persamaan:

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2 \times S_{11}} \quad (3.10)$$

Kemudian, Koefisien Refleksi (Γ) adalah nilai memberi tahu sifat pantulan murni di permukaan akibat profil impedansi material. Nilai ini didapatkan dari:

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (3.11)$$

Nilai koefisien refleksi harus mematuhi hukum kekekalan energi untuk material pasif (seperti biokomposit). Karena material pasif tidak mungkin memantulkan energi lebih besar daripada yang diterimanya, Anda harus memilih tanda plus (+) atau minus (-) yang menghasilkan magnitudo absolut $|\Gamma| \leq 1$.

Berikutnya, Faktor Transmisi (T) adalah variabel turunan yang menunjukkan seberapa besar redaman dan perlambatan fase yang dialami gelombang semata-mata karena sifat internal material. Persamaan yang digunakan adalah:

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21}) \times \Gamma} \quad (3.12)$$

Lalu, Parameter Propagasi ($\frac{1}{\Lambda^2}$) menunjukkan ukuran kuantitatif dari bagaimana gelombang elektromagnetik berinteraksi dengan struktur internal material per satuan jarak. Nilai parameter propagasi didapatkan dari persamaan berikut:

$$\frac{1}{\Lambda^2} = -\left(\frac{1}{2\pi d} \ln\left(\frac{1}{T}\right)\right)^2 \quad (3.13)$$

Dengan d adalah ketebalan material dalam cm dan satuan parameter propagasi adalah cm^{-2}

Langkah berikutnya, Permeabilitas relatif (μ_r) menggambarkan seberapa kuat material tersebut mampu 'menangkap' dan menahan daya magnet dari sebuah gelombang. Angka ini didapatkan dari persamaan:

$$\mu_r = \frac{\left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right) \times \left(\frac{1}{A}\right)}{\sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (3.14)$$

Terakhir, Permittivitas relatif (ϵ_r) secara fundamental menunjukkan bagaimana struktur internal material merespons dan berinteraksi dengan komponen medan listrik dari gelombang elektromagnetik yang melaluinya. Nilai ini dicari dari:

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r} \left(\frac{1}{\lambda_c^2} + \frac{1}{A^2} \right) \quad (3.15)$$

Dengan :

λ_0 = Panjang gelombang ruang hampa (dicari dari $\frac{c}{\text{Frekuensi (Hz)}}$)

c = Kecepatan cahaya ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

λ_c = Panjang gelombang cut off (dicari dari $2 \times a$)

a = Lebar dimensi dalam untuk *waveguide WR 137* (3.485 cm)

Setelah didapatkan nilai real dan imajiner pada permitivitas relatif. Pastikan bahwa nilai permitivitas tersebut sesuai dengan teori yang ada. Secara sederhana, permitivitas real (ϵ') harus bernilai lebih dari satu karena ruang hampa (vakum) adalah batas absolut terbawah tanpa materi yang bernilai satu ($\epsilon'=1$); sehingga kehadiran materi fisik apa pun pasti membawa molekul yang terpolarisasi dan menambah kapasitas penyimpanan energi di atas nilai ruang hampa. Di sisi lain, permitivitas imajiner (ϵ'') tidak boleh bernilai negatif karena parameter ini merepresentasikan jumlah energi elektromagnetik yang hilang atau terdisipasi

menjadi panas; berdasarkan hukum kekekalan energi, material dielektrik yang pasif hanya bisa menyerap energi ($\epsilon'' \geq 0$), sedangkan nilai negatif secara fisika tidak masuk akal karena itu berarti material tersebut secara ajaib menciptakan atau memancarkan energinya sendiri.

Parameter terakhir yang dibutuhkan CST yaitu nilai tan delta untuk menjalankan simulasi. Nilai tangen delta didapatkan dari:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3.16)$$

Nilai yang diinputkan kedalam CST untuk bagian permitivitas ini hanya partisi frekuensi sepanjang rentang *waveguide* yang digunakan (5,85 – 8,2 GHz), nilai epsilon real, dan nilai tangen delta yang digabung kedalam satu file .txt. Kemudian file .txt tersebut di impor ke CST pada sub menu *material properties* di bagian *dielectric dispersion*.

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

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, pengujian karakteristik, dan analisis simulasi yang telah dilakukan, kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Biokomposit berbasis serat alami jute terpolimerisasi *polyaniline* (PANI) dengan variasi *filler* MWCNT terfungsionalisasi asam telah berhasil difabrikasi. Analisis FTIR mengonfirmasi keberhasilan polimerisasi PANI yang ditandai oleh puncak kuat cincin benzenoid pada bilangan gelombang $1505,8\text{ cm}^{-1}$, serta keberhasilan fungsionalisasi oksidasi MWCNT yang dibuktikan oleh adanya vibrasi C-O dari gugus karboksilat (-COOH) pada area 1237 cm^{-1} .
2. Hasil pengujian morfologi menggunakan SEM menunjukkan bahwa modifikasi permukaan dengan PANI-MWCNT secara efektif meningkatkan ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) antara serat dan matriks. Rongga (*void*) besar yang teramati pada sampel tanpa *filler* (JF 30 – CNT 0) dapat diminimalisir pada sampel JF 30 – CNT 5 karena serat telah terlapisi oleh polimer konduktif dengan sebaran MWCNT yang merata di sekitar serat.
3. Hasil pengujian sifat listrik menunjukkan bahwa peningkatan persentase serat jute pada fraksi MWCNT tinggi (5%) justru menurunkan nilai konduktivitas listrik, karena sifat alami serat jute sebagai insulator memutus jejaring konduktif tiga dimensi di dalam matriks. Komposisi

optimum diperoleh pada sampel JF 10 – CNT 5 dengan nilai konduktivitas listrik tertinggi mencapai $2,719 \times 10^{-7}$ S/m.

4. Hasil pengujian dan simulasi *Shielding Effectiveness* (SE) menunjukkan performa paling optimal pada sampel JF 10 – CNT 5. Pada pengujian eksperimen, nilai SE maksimal mencapai -7,269 dB (frekuensi 6,5315 GHz menggunakan VNA) dan -9,847 dB (frekuensi 14 MHz menggunakan antenna monopole). Sementara itu, simulasi numerik CST menunjukkan nilai SE puncak sebesar -20,562 dB. Diskrepansi ini disebabkan oleh kondisi ideal simulasi yang mengasumsikan material homogen tanpa cacat, sedangkan sampel fisik mengalami ketidakhomogenan akibat keterbatasan kompresi manual.
5. Berdasarkan korelasi sifat listrik dan nilai efektivitas perisainya, biokomposit JF 10 – CNT 5 dinyatakan layak digunakan sebagai material perisai EMI tingkat rendah (*low-end shielding*) untuk aplikasi perangkat elektronik komersial/konsumen, di mana secara eksperimental material ini telah mampu meredam hingga $\approx 90\%$ paparan daya gelombang elektromagnetik.

5.2 Saran

Berdasarkan keterbatasan parameter dan pengalaman teknis selama pelaksanaan penelitian ini, beberapa saran yang dapat direkomendasikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Untuk pemilihan spesifikasi antena monopole pada pengujian kotak perisai EMI, lakukan penyesuaian dari segi panjang dan diameter antena, serta alat penunjang pengujian seperti rentang pembangkitan generator fungsi yang terbatas pada 1–20 MHz, karena ketidaksesuaian antena monopole terhadap rentang frekuensi akan menurunkan performa pengukuran SE secara keseluruhan.
2. Untuk optimalisasi metode fabrikasi, lakukan peralihan dari sistem kompresi manual menggunakan beban statis ke penggunaan mesin *hydraulic press* otomatis (*hot/cold press*) yang terkalibrasi, guna memastikan homogenitas distribusi tekanan, kestabilan kontrol ketebalan sampel, serta eliminasi rongga udara di dalam matriks secara maksimal.
3. Untuk pengembangan performa *Shielding Effectiveness* (SE), lakukan eksplorasi pada variasi ketebalan sampel atau jumlah lapisan (*layer*) anyaman serat jute, karena peningkatan dimensi ketebalan material akan memperpanjang jalur atenuasi gelombang elektromagnetik melalui mekanisme absorpsi internal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Baysal, P. Yayla, and H. S. Türkmen, “A review on engineering biocomposites and natural fiber-reinforced materials,” *J. Sustain. Constr. Mater. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 231–249, 2022, doi: 10.47481/jscmt.1136018.
- [2] M. J. John and S. Thomas, “Biofibres and biocomposites,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 71, pp. 343–364, 2008, doi: 10.1016/j.carbpol.2007.05.040.
- [3] D. D. L. Chung, “Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials,” *Carbon N. Y.*, vol. 39, no. 2, pp. 279–285, 2001, doi: 10.1016/S0008-6223(00)00184-6.
- [4] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, 2012, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.
- [5] B. Pradeepa, M. Malathi, and A. V. Kiruthika, “Properties of Jute Fibre Reinforced Polymer Composites – A Review,” *Eur. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 10–29, 2023, doi: 10.33422/ejest.v6i1.1052.
- [6] M. P. Westman, L. S. Fifield, K. L. Simmons, S. G. Laddha, and T. A. Kafentzis, “Natural Fiber Composites : A Review,” Richland, Washington, 2010. doi: 10.2172/989448.
- [7] N. Karim, F. Sarker, S. Afroj, M. Zhang, P. Potluri, and K. S. Novoselov, “Sustainable and Multifunctional Composites of Graphene-Based Natural Jute Fibers,” *Adv. Sustain. Syst.*, vol. 5, no. 3, pp. 1–12, 2021, doi:

10.1002/adsu.202000228.

- [8] D. Permata, Widyawati, H. H. Sinaga, N. Purwasih, and S. Widiarto, “Study of electrical volume-conductivity, tensile strength, and electromagnetic shielding effectiveness of coconut fiber composite,” *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 73, pp. 73–80, 2023, doi: 10.3233/JAE-220295.
- [9] K. G. Satyanarayana, “Biodegradable polymer composites based on brazilian lignocellulosic,” *Rev. Matéria*, vol. 15, no. 2, pp. 088–095, 2010.
- [10] G. Odian, *Principles of Polymerization*, 4th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [11] M. F. Ashby and D. R. H. Jones, *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design*, 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. doi: 10.1016/c2009-0-64289-6.
- [12] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2018. doi: 10.1142/9789814374064_0002.
- [13] P. K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007.
- [14] P. M. Ajayan, O. Stéphan, C. Colliex, and D. Trauth, “Aligned carbon nanotube arrays formed by cutting a polymer resin-nanotube composite,” *Science (80-.)*, vol. 265, pp. 1212–1214, 1994, doi:

10.1126/science.265.5176.1212.

- [15] J. N. Coleman, U. Khan, W. J. Blau, and Y. K. Gun'ko, "Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites," *Carbon N. Y.*, vol. 44, pp. 1624–1652, 2006, doi: 10.1016/j.carbon.2006.02.038.
- [16] A. K. Jagadeesan, K. Thangavelu, and V. Dhananjeyan, "Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties and Applications," in *21st Century Surface Science - a Handbook*, IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.92995.
- [17] Y. Y. Huang and E. M. Terentjev, "Dispersion of Carbon Nanotubes: Mixing, Sonication, Stabilization, and Composite Properties," *Polymers (Basel)*, vol. 4, pp. 275–295, 2012, doi: 10.3390/polym4010275.
- [18] S. Kalia, B. S. Kaith, and I. Kaur, "Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites - a review," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 49, no. 7, pp. 1253–1272, 2009, doi: 10.1002/pen.21328.
- [19] M. Cadek, J. N. Coleman, V. Barron, K. Hedicke, and W. J. Blau, "Morphological and mechanical properties of carbon-nanotube-reinforced semicrystalline and amorphous polymer composites," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, no. 27, pp. 5123–5125, 2002, doi: 10.1063/1.1533118.
- [20] T. D. Kristian, "Studi penambahan CNT untuk meningkatkan konduktivitas CFRP sebagai material badan pesawat Unmanned Aerial Vehicle (UAV),"

Universitas Lampung, 2020.

- [21] R. G. G. Jaroslav Stejskal, “POLYANILINE . Polyaniline. Preparation of a Conducting Polymer (IUPAC Technical Report),” *Pure Appl. Chem.*, vol. 74, no. 5, pp. 857–867, 2002, doi: 10.1351/pac200274050857.
- [22] M. A. A. Syed Shaheen Shah, Himadri Tanaya Das, Hasi Rani Barai, “Boosting the Electrochemical Performance of Polyaniline by One-Step Electrochemical Deposition on Nickel Foam for High-Performance Asymmetric Supercapacitor,” *Polymers (Basel)*., vol. 14, no. 2, p. 270, 2022, doi: 10.3390/polym14020270.
- [23] E. R.-M. Silvia Beatriz Brachetti-Sibaja, Diana Palma-Ramírez, Aidé Minerva Torres-Huerta, Miguel Antonio Domínguez-Crespo, Héctor Javier Dorantes-Rosales, Adela Eugenia Rodríguez-Salazar, “CVD Conditions for MWCNTs Production and Their Effects on the Optical and Electrical Properties of PPy / MWCNTs , PANI / MWCNTs Nanocomposites by In Situ Electropolymerization,” *Polymers (Basel)*., vol. 13, no. 3, p. 351, 2021, doi: 10.3390/polym13030351.
- [24] K. P. Jiacheng Zhang, Andrew Heath, Richard J. Ball, “Effect of fibre loading on the microstructural, electrical, and mechanical properties of carbon fibre incorporated smart cement-based composites,” *Front. Mater.*, vol. 9, p. 1055796, 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.1055796.
- [25] A. Mariscotti, “Critical Review of EMC Standards for the Measurement of Radiated Electromagnetic Emissions from Transit Line and Rolling Stock,”

- Energies*, vol. 14, no. 3, p. 759, 2021, doi: 10.3390/en14030759.
- [26] J. M. Thomassin, C. Jérôme, T. Pardoen, C. Bailly, I. Huynen, and C. Detrembleur, “Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 74, no. 7, pp. 211–232, 2013, doi: 10.1016/j.mser.2013.06.001.
- [27] S. T. Saju Daniel, “Shielding Efficiency Measuring Methods and Systems,” in *Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: Fundamentals, Properties, and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 2019, pp. 61–87.
- [28] L. L. Wang, B. K. Tay, K. Y. See, Z. Sun, L. K. Tan, and D. Lua, “Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon-based materials prepared by screen printing,” *Carbon N. Y.*, vol. 47, no. 8, pp. 1905–1910, 2009, doi: 10.1016/j.carbon.2009.03.033.
- [29] R. F. Diana P. Ferreira, Armando Ferreira, “Searching for Natural Conductive Fibrous Structures via a Green Sustainable Approach Based on Jute,” *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 1, p. 63, 2018, doi: 10.3390/polym10010063.
- [30] R. H. M. Reis *et al.*, “Ballistic and Electromagnetic Shielding Properties of Epoxy Resin Reinforced with Carbon Black and Jute Fabric,” *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 3, p. 336, 2025, doi: 10.3390/polym17030336.