

**STUDI KOMPOSIT SERAT KELAPA DENGAN POLIMER KONDUKTIF
SEBAGAI MATERIAL SISTEM PROTEKSI PETIR**

(Skripsi)

Oleh

KIAGENG REKSA PATI

NPM 1715031068



JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2024

ABSTRAK

STUDI KOMPOSIT SERAT KELAPA DENGAN POLIMER KONDUKTIF SEBAGAI MATERIAL SISTEM PROTEKSI PETIR

Oleh

KIANGENG REKSA PATI

Material komposit alami mulai diminati sebagai material alternatif dikarenakan lebih ramah lingkungan dan murah dalam proses pembuatan dibandingkan dengan komposit serat sintetis. Penelitian ini mengusulkan material yang terbuat dari komposit alami yaitu serat kelapa yang dilapisi polianilin (PANI) sebagai penguat dan resin epoksi dengan *filler Multi Walled Carbon Nanotube* (MWCNT). Tujuan dari pelapisan serat kelapa dengan polimer konduktif polianilin dan penggunaan MWCNT sebagai *filler* matriks polimer untuk meningkatkan konduktivitas komposit serat kelapa.

Penelitian ini membuat 3 sampel komposit serat kelapa dengan variasi berat serat kelapa terhadap epoksi resin. Dua sampel dibuat dari komposit serat kelapa dipolimerisasi dengan polianilin dan penggunaan *filler* MWCNT dengan persentase berat serat kelapa terhadap resin epoksi yaitu 5% (CF-PANI 5%/CNT) dan 10% (CF-PANI 10%/CNT). Satu sampel dibuat dari serat kelapa tanpa polimerisasi polianilin dan *filler filler* MWCNT dengan persentase serat kelapa 5% (CF 5%). Tiga sampel dibuat dalam bentuk kotak uji dengan ukuran 30 cm ×

30 cm × 30 cm. Kemudian kotak uji mengalami pengujian tegangan tembus. Pengujian tegangan tembus pada kotak uji memerlukan 2 buah elektroda batang yang diletakkan di bagian atas dan di dalam kotak uji. Elektroda atas dihubungkan ke pembangkit tegangan tinggi impuls, sedangkan elektroda bawah dihubungkan ke pentanahan. Elektroda atas ditempatkan sejajar dengan elektroda bawah dengan jarak ekitar 2 mm. Tegangan impuls yang digunakan untuk pengujian tegangan tembus dibangkitkan dari pembangkit impuls dengan tegangan input AC konstan pada 6 kV. Untuk melihat pengaruh waktu muka gelombang impuls maka nilai induktor dari pembangkit impuls divariasikan sebesar 20 μH , 50 μH , 60 μH , 70 μH , dan 110 μH . Kumparan Rogowski dipasang pada kabel pentanahan dari elektroda bawah untuk mengukur arus saat terjadi tembus antara elektroda atas dan elektroda bawah. Hasil pengukuran dari kumparan Rogowski ditampilkan melalui osiloskop.

Hasil pengukuran tegangan tembus paling tinggi didapatkan dari kotak uji dari komposit CF-PANI 10%/ CNT yaitu 10,6 kV pada nilai induktor 70 μH . Sedangkan tegangan tembus yang paling rendah terjadi pada komposit CF 5% yaitu 8 kV pada nilai induktor 50 μH . Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan tembus yang terjadi cenderung meningkat dengan bertambahnya persentase serat kelapa yang dipolimerisasi dengan polianilin. Nilai induktor juga mempengaruhi tegangan tembus. Semakin tinggi nilai induktor menghasilkan nilai tegangan tembus yang lebih tinggi.

Kata Kunci: Serat Kelapa, Komposit, Tegangan Tembus, Waktu muka, Kumparan Rogowski.

ABSTRACT

STUDY OF COCONUT FIBER COMPOSITE WITH CONDUCTIVE POLYMERS AS MATERIALS FOR LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS

BY

KIAGENG REKSA PATI

Natural composite materials are gaining interest as alternative materials because it's more environmentally friendly and cheap to manufacture compared to synthetic fiber composite. This research propose a material made from natural composite, namely coconut fiber coated with polyaniline (PANI) as reinforcement and epoxy resin with Multi Walled Carbon Nanotube (MWCNT) filler as the polymer matrix. The purpose of coating coconut fiber with polyaniline conductive polymer and using MWCNT as polymer matrix filler is to improve the conductivity of coconut fiber composite.

This study made 3 samples of coconut fiber composite with varying weights of coconut fiber to epoxy resin. Two samples were made from composite of coconut fiber polymerized with polyaniline and the use of MWCNT as a filler with weight percentages of coconut fiber to epoxy resin of 5% (CF-PANI 5%/CNT) and 10% (CF-PANI 10%/CNT). One samples was prepared from coconut fiber without polyaniline polymerization and MWCNT filler with a percentage of coconut fiber of 5% (CF 5%). Three samples were made in the form of a box with a size of 30 cm x 30 cm x 30 cm. The test boxes were subjected to breakdown voltage testing. The breakdown voltage testing on the box required two-rod electrodes placed at the top and inside the box. The top electrode is connected to the impulse high voltage generator, while the bottom electrode is connected to the ground. The top electrode is placed parallel to the bottom electrode with a distance of about 2 mm. The impulse voltage used for the breakdown voltage test was generated from an impulse generator with an AC input voltage set to be constant of 6 kV. To see the effect of the impulse wavefront time, the inductor value of the impulse generator was varied by 20 μ H, 50 μ H, 60 μ H, 70, and 110 μ H. A Rogowski coil was attached to the grounding wire of the bottom electrodes. The measurement result from the Rogowski coil are displayed through an oscilloscope.

The highest breakdown voltage measurement result was 10,6 kV which belongs to the test box of CF-PANI 10%/CNT composite at an inductor value of 70 μ H. The

lowest breakdown voltage was 8 kV which occurred in the CF 5% composite at an inductor value of 50 μ H. The measurement result show that the breakdown voltage tends to increase with the increasing percentage of voltage. A higher inductor value result in a higher breakdown voltage value.

Keywords: Coconut Fiber, Composite, Breakdown Voltage, Rise Time, Rogowski Coil.

**STUDI KOMPOSIT SERAT KELAPA DENGAN POLIMER KONDUKTIF
SEBAGAI MATERIAL SISTEM PROTEKSI PETIR**

Oleh
KIAGENG REKSA PATI

Skripsi

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

Pada

**Program Studi Teknik elektro
Jurusan Teknik elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

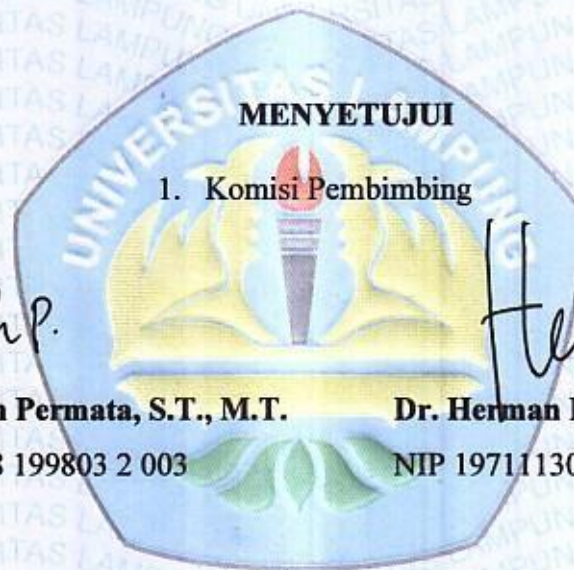
Judul Skripsi : **STUDI KOMPOSIT SERAT KELAPA
DENGAN POLIMER KONDUKTIF SEBAGAI
MATERIAL SISTEM PROTEKSI PETIR**

Nama Mahasiswa : **Kiageng Reksa Pati**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1715031068

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik



1. **Komisi Pembimbing**

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

NIP 19700528 199803 2 003

Dr. Herman H Sinaga, S.T., M.T.

NIP 19711130 199903 1 003

2. **Mengetahui**

Ketua Jurusan

Teknik Elektro

Herlinawati, S.T., M.T.

NIP 19710314 199903 2 001

Ketua Program Studi

Teknik Elektro

Sumadi, S.T., M.T.

NIP 19731104 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

Diah P.
.....

Sekretaris : Dr. Herman H Sinaga, S.T., M.T.

H. Sinaga
.....

Penguji : Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.

N. Purwasih
.....



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M. Sc. ↑

NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 12 Februari 2024

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul **“STUDI KOMPOSIT SERAT KELAPA DENGAN POLIMER KONDUKTIF SEBAGAI MATERIAL SISTEM PROTEKSI PETIR”** merupakan hasil karya sendiri dan bukan hasil karya orang lain. Semua hasil yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Apabila di kemudian hari skripsi ini terbukti merupakan salinan atau dibuat oleh orang lain. Maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung 16 Mei 2024

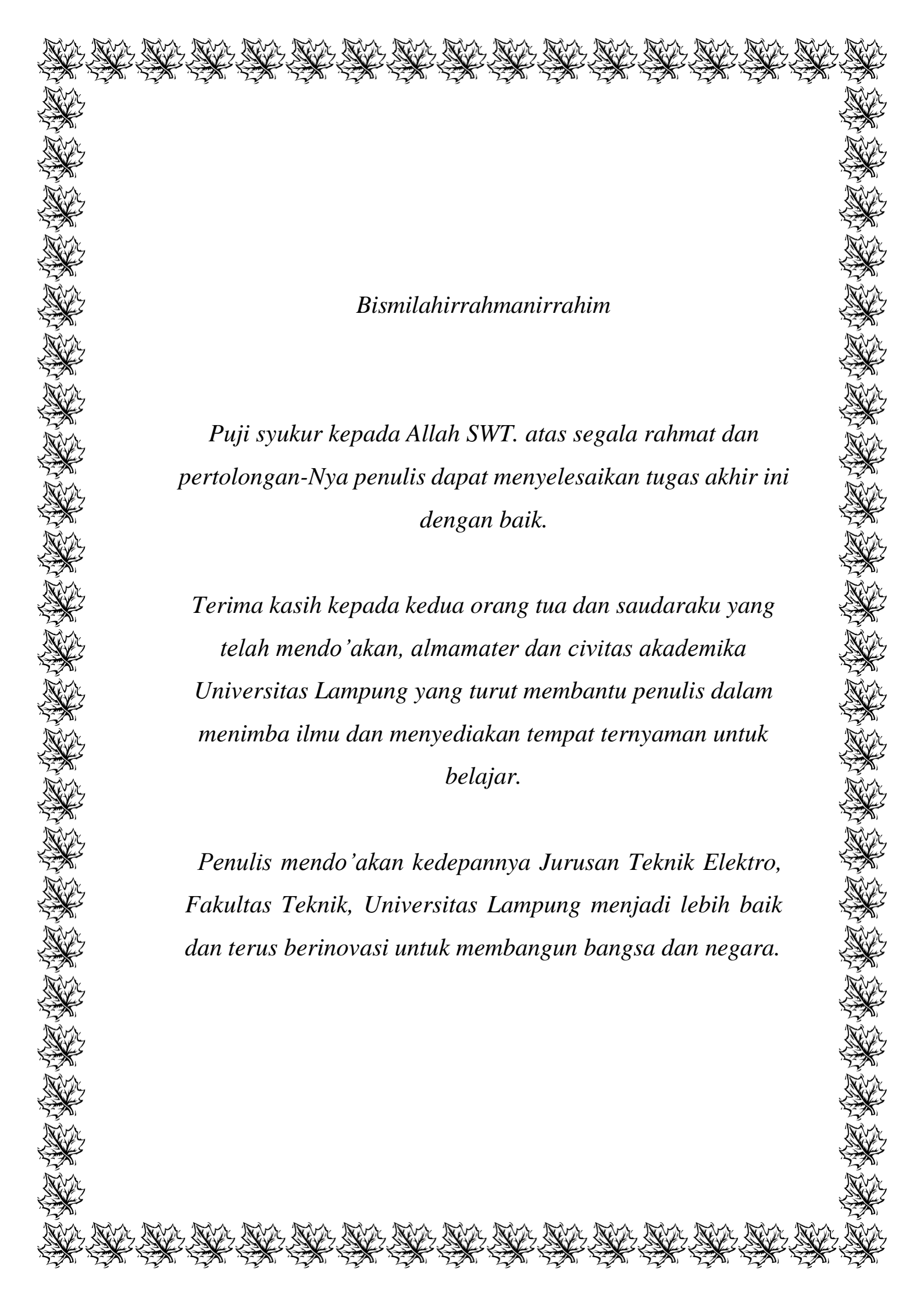


Kiangeng Reksa Pati
NPM. 1715031068

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Pangkajene, Kecamatan Maritengngae, Kabupaten Sidenreng Rappang, Provinsi Sulawesi Selatan pada tanggal 27 November 1998. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Edi Junaedi dan Ibu Hasna. Riwayat pendidikan penulis, lulus sekolah dasar di SD Negeri 1 Nabire pada tahun 2011, lulus sekolah menengah pertama di SMP Negeri 1 Bojonggede pada tahun 2014, lulus sekolah menengah atas di SMA Negeri 1 Tajurhalang pada tahun 2017, dan diterima di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi (SBMPTN) pada tahun 2017.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) Universitas Lampung sebagai anggota Divisi Kerohanian Departemen Pendidikan dan Pengembangan Diri pada tahun 2018 dan 2019, Ketua Umum Forum Silaturahmi dan Studi Islam Fakultas Teknik (FOSSI-FT) Universitas Lampung pada tahun 2019, Kepala Dinas PSDM Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Lampung (BEM FT Unila) pada tahun 2020, dan Ketua Badan PSDM Dewan Perwakilan Mahasiswa Universitas Keluarga Besar Mahasiswa Universitas Lampung (DPM U KBM Unila) pada tahun 2021.



Bismilahirrahmanirrahim

Puji syukur kepada Allah SWT. atas segala rahmat dan pertolongan-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.

Terima kasih kepada kedua orang tua dan saudaraku yang telah mendo'akan, almamater dan civitas akademika Universitas Lampung yang turut membantu penulis dalam menimba ilmu dan menyediakan tempat ternyaman untuk belajar.

Penulis mendo'akan kedepannya Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung menjadi lebih baik dan terus berinovasi untuk membangun bangsa dan negara.

A decorative border of black and white line-art maple leaves surrounds the text. The leaves are arranged in a rectangular frame, with a single row of leaves along the top and bottom edges, and vertical columns of leaves along the left and right edges.

Motto

“Wahai orang-orang yang beriman, bertakwalah kepada Allah dengan sebenar-benarnya takwa kepada-Nya dan janganlah kamu mati kecuali dalam keadaan muslim.”

(Q. S. Ali Imran : 102)

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT. penulis ucapkan atas rahmat dan pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Tugas akhir yang berjudul “STUDI KOMPOSIT SERAT KELAPA DENGAN POLIMER KONDUKTIF SEBAGAI MATERIAL SISTEM PROTEKSI PETIR” disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung. Pada kesempatan ini, penulis akan menyampaikan terima kasih kepada :

1. Ibu Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T. sebagai pembimbing utama tugas akhir yang telah memberikan masukan, motivasi, dan bantuan materil selama melakukan penelitian tugas akhir.
2. Bapak Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T. sebagai pembimbing pendamping tugas akhir yang telah memberikan masukan dan motivasi yang membangun selama melakukan penelitian tugas akhir.
3. Ibu Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T. sebagai penguji tugas akhir yang telah memberikan masukan dan motivasi selama melakukan penelitian tugas akhir.
4. Bapak Fadil Hamdani, S.T., M.T. sebagai pembimbing akademik yang telah memberikan masukan dan motivasi selama menjadi mahasiswa.
5. Bapak Sumadi, S.T., M.T. sebagai ketua Program Studi S1 Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

6. Ibu Herlinawati, S.T. M.T. sebagai ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
7. Bapak dan Ibu civitas akademik di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
8. Teman-teman angkatan 2017 teknik elektro dan teknik informatika yang sudah saya anggap seperti keluarga sendiri.
9. Kedua orang tua dan saudara saya yang selalu memberi do'a dan dukungan untuk menyelesaikan tugas akhir.
10. Semua pihak yang telah membantu serta mendukung penulis hingga menyelesaikan perkuliahan.

Penulis juga meminta maaf atas segala khilaf apabila terdapat ketidaksempurnaan dalam penyusunan tugas akhir ini. Terima kasih.

Bandar Lampung, 16 Mei 2024

Penulis,

Kiageng Reksa Pati

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
BAB I. PENDAHULUAN	1
10.1. Latar Belakang.....	1
10.2. Tujuan Penelitian	2
10.3. Manfaat Penelitian	3
10.4. Rumusan Masalah.....	3
10.5. Batasan Masalah	4
10.6. Sistematika Penulisan	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Komposit	6
2.1.1. Serat Alami.....	12
2.1.2. Serat Kelapa.....	16
2.1.3. Matriks	19
2.1.4. Polimer Konduktif	24
2.1.5. Multi Walled Carbon Nanotube (MWCNT).....	26
2.2. Sifat Mekanis dan Listrik Komposit	27
2.2.1. Sifat Mekanis	28
2.2.2. Sifat Listrik.....	30
2.3. Sistem Proteksi Petir	31
2.4. Pengukuran Arus Impuls Menggunakan Kumparan Rogowski	34
BAB III. METODE PENELITIAN	38
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	38
3.2. Jadwal Kegiatan Penelitian	38
3.3. Diagram Alir Penelitian	39

3.4.	Alat dan Bahan Penelitian.....	40
3.5.	Prosedur Penelitian	40
3.5.1.	Perlakuan Terhadap Serat Kelapa	41
3.5.2.	Preparasi Serat Kelapa Dilapisi Polianilin.....	43
3.5.3.	Pembuatan Sampel Uji.....	45
3.5.4.	Pengujian Tegangan Tembus	47
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....		50
4.1.	Hasil Pembuatan Sampel Uji	50
4.2.	Hasil Pengukuran.....	51
4.2.1.	Pengukuran Gelombang Impuls.....	51
4.2.2.	Pengukuran Tegangan Tembus	53
4.3.	Analisis Hasil Uji Kotak Komposit.....	59
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN		62
5.1	Kesimpulan.....	62
5.2	Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA		65
LAMPIRAN.....		72

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Klasifikasi serat alami	13
Tabel 2.2 Komposisi unsur kimia serat alami	14
Tabel 2.3 Komposisi kimia serat kelapa.....	17
Tabel 2.4 Jenis polimer konduktif	25
Tabel 2.5 Sifat mekanis beberapa serat alami	30
Tabel 3.1 Jadwal kegiatan penelitian.....	38
Tabel 4.1 Sampel kotak komposit	50
Tabel 4.2 Data hasil pengukuran tegangan impuls.....	52
Tabel 4.3 Data tegangan tembus pada komposit CF 5%	54
Tabel 4.4 Data tegangan tembus pada komposit CF-PANI 5%/CNT	56
Tabel 4.5 Data tegangan tembus pada komposit CF-PANI 10%/CNT	58
Tabel 4.6 Data hasil masing-masing persentase serat komposit.....	59

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Serat kelapa	17
Gambar 2.2 Resin thermoset	20
Gambar 2.3 Resin thermoplastik	22
Gambar 2.4 Polimer konduktif polianilin.....	24
Gambar 2.5 Multi Walled Carbon Nanotube (MWCNT).....	26
Gambar 2.6 <i>Setup</i> pengujian petir buatan menggunakan kendaraan	34
Gambar 2.7 Konstruksi kumparan Rogowski	35
Gambar 2.8 Skema pengukuran arus tinggi impuls dengan kumparan Rogowski.....	36
Gambar 2.9 Kumparan Rogowski	37
Gambar 2.10 Bentuk gelombang keluaran	37
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	39
Gambar 3.2 Diagram blok pembuatan dan pengujian komposit serat kelapa	40
Gambar 3.3 Serat kelapa	41
Gambar 3.4 Rendaman serat kelapa dengan 2%NaOH.....	42
Gambar 3.5 Pencucian serat kelapa.....	42
Gambar 3.6 Pengeringan serat kelapa dengan oven	43
Gambar 3.7 Penimbangan serat kelapa	43

Gambar 3.8 Pencampuran serat, HCl, Aniline, dan Ammonium Persulfat	44
Gambar 3.9 Hasil polimerisasi serat kelapa	44
Gambar 3.10 Resin epoksi dan MWCNT.....	45
Gambar 3.11 <i>Polyvinyl Alcohol</i> (PVA)	45
Gambar 3.12 Hasil cetakan serat komposit	46
Gambar 3.13 Kotak uji komposit serat kelapa	47
Gambar 3.14 Skema Pengukuran tegangan tembus pada kotak komposit.....	47
Gambar 3.15 Suasana pengukuran arus tinggi impuls dengan kumparan Rogowski	48
Gambar 4.1 Perbandingan tegangan tembus dengan variasi nilai induktor pada pengukuran gelombang impuls sumber AC 6 kV	52
Gambar 4.2 Tegangan Tembus pada kotak komposit CF 5%	53
Gambar 4.3 Grafik tegangan tembus dengan variasi nilai induktor pada kotak komposit CF 5%	54
Gambar 4.4 Tegangan Tembus pada kotak komposit CF-PANI 5%/CNT	55
Gambar 4.5 Grafik tegangan tembus dengan variasi nilai induktor pada kotak komposit CF-PANI 5%/CNT	56
Gambar 4.6 Tegangan Tembus pada kotak komposit CF-PANI 10%/CNT	57
Gambar 4.7 Grafik tegangan tembus dengan variasi nilai induktor pada kotak komposit CF-PANI 10%/CNT	58
Gambar 4.8 Perbandingan nilai tegangan tembus yang terukur dengan variasi nilai induktor dan serat kelapa.....	59

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sarana transportasi udara seperti pesawat terbang dan pesawat tanpa awak pada saat di udara mengalami masalah seperti sambaran petir, maupun listrik statis akibat gesekan antara sayap pesawat dengan awan. Saat ini banyak wahana transportasi udara yang menggunakan material komposit untuk menggantikan material logam pada struktur pesawat. Karena komposit bersifat lebih ringan, tidak korosif, dan memiliki kekuatan mekanis yang tinggi. Namun, material komposit memiliki konduktivitas yang lebih rendah dari material logam. Sehingga kemampuan komposit untuk menyalurkan arus petir ke seluruh permukaan badan pesawat tidak sebaik jika menggunakan material logam.

Isu lingkungan yang merebak saat ini menyebabkan semakin banyaknya penelitian mengenai kemungkinan material komposit alami menggantikan material komposit sintetis. Material komposit alami terbuat dari serat alami sebagai penguat (*reinforced*), sedangkan polimer matriks dapat berasal dari polimer sintetis ataupun polimer alami. Komposit serat alami mempunyai konduktivitas yang lebih rendah dari komposit serat karbon karena serat alami tidak mempunyai konduktivitas atau bersifat sebagai isolator. Oleh karena itu

komposit serat alami perlu adanya perlakuan kimia dan fisik untuk meningkatkan konduktivitasnya.

Pada penelitian ini penulis akan membuat komposit alami dari serat kelapa yang digunakan sebagai material proteksi petir. Serat kelapa dipilih karena banyak tersedia di Provinsi Lampung dan Indonesia pada umumnya. Selain itu, untuk meningkatkan nilai tambah serat kelapa yang merupakan limbah. Peningkatan konduktivitas serat kelapa dilakukan dengan pelapisan polimer konduktif polianilin melalui polimerisasi. Sedangkan resin epoksi sebagai matriks diberi serbuk *Multi Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) untuk meningkatkan konduktivitas. Komposit dengan serat kelapa yang dilapisi dengan polianilin dan resin epoksi yang diberi MWCNT diharapkan dapat meningkatkan konduktivitas komposit serat alami sehingga baik digunakan sebagai material sistem proteksi petir.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Membuat material komposit serat kelapa yang dilapisi polianilin sebagai *reinforced* dan resin epoksi dengan serbuk *filler* MWCNT sebagai matriks.
2. Membuat sampel uji berupa kotak komposit serat alami dengan 3 jenis komposisi yang berbeda.
3. Menguji sampel dengan tegangan impuls petir yang mempunyai waktu muka yang berbeda-beda.

4. Menganalisis karakteristik tegangan tembus yang terjadi pada kotak komposit serat alami.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menghasilkan kotak komposit dari serat kelapa dengan polianilin sebagai *reinforced* dan resin epoksi dengan *filler* MWCNT sebagai matriks.
2. Mengetahui karakteristik material komposit serat alami terhadap sambaran impuls petir.
3. Mengetahui pengaruh muka gelombang terhadap tegangan tembus pada kotak komposit serat alami.

1.4. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana proses peningkatan konduktivitas pada komposit serat alami melalui proses polimerisasi polianilin pada serat kelapa dan pemberian MWCNT pada resin epoksi.
2. Bagaimana proses membuat sampel uji untuk pengukuran impuls petir
3. Bagaimana mengukur tegangan tembus pada bahan komposit serat alami menggunakan kumparan Rogowski.
4. Bagaimana menganalisis karakteristik bahan komposit serat alami terhadap sambaran impuls petir.

1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Struktur proteksi petir dimodelkan dengan kotak uji ukuran $30 \times 30 \times 30$ cm.
2. Tegangan impuls petir yang dibangkitkan menggunakan variasi nilai induktor yaitu: 20 μ H, 50 μ H, 60 μ H, 70 μ H, dan 110 μ H.
3. Tegangan uji impuls diatur pada kondisi konstan yaitu tegangan AC sumber 6 kV. Hal ini dikarenakan keterbatasan kapasitas pembangkit impuls yang ada di laboratorium Teknik Tegangan Tinggi JTE Unila.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bagian ini memuat latar belakang, tujuan, manfaat, rumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bagian ini berisi teori terkait komposit, serat alami, kekuatan serat alami, konduktivitas serat alami, serat kelapa, resin epoksi, polimer konduktif, MWCNT, dan sistem proteksi petir.

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bagian ini berisi jadwal, tempat, diagram, dan prosedur penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini berisi data hasil pengukuran dan analisis berdasarkan teori dasar yang sudah ada.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bagian ini berisi kesimpulan dari penelitian yang sudah dilakukan serta saran untuk penelitian berikutnya.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Komposit

Komposit merupakan material yang tersusun dari campuran dua material atau lebih dengan sifat kimia dan fisik yang berbeda. Dari pencampuran tersebut akan menghasilkan material komposit dengan sifat dan karakteristik yang berbeda dari material dasarnya. Terdapat dua material penyusun dari komposit, yaitu matriks yang berfungsi sebagai pengikat komposit dan serat berfungsi sebagai penguat (*reinforced*) komposit [1]. Matriks umumnya memiliki sifat ulet, tetapi memiliki kekuatan dan kekakuan yang lebih rendah untuk mempermudah pada saat dibentuk atau didesain. Kekuatan tarik komposit dipengaruhi oleh kekuatan permukaan dari matriks, sehingga perbedaan campuran matriks dan penguat dapat menghasilkan kekuatan *adhesive* yang berbeda pada komposit. Penguat (*reinforcement*) komposit berfungsi sebagai penahan beban dari komposit, sehingga kekuatan dari komposit sangat bergantung dari penguat yang digunakan. Oleh karena itu, penguat harus memiliki kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang lebih tinggi dari matriks kompositnya. Berdasarkan jenis penguat yang digunakan, komposit digolongkan menjadi tiga jenis, yaitu :

A. Komposit Partikel (*Particulate Composites*)

Komposit partikel menggunakan partikel serbuk sebagai penguatnya dan terdistribusi secara merata dalam matriksnya. Komposit partikel banyak dibuat untuk bahan baku industri. Kelayakan bahan komposit partikel yang telah dibuat dapat diketahui dengan melakukan pendekatan uji validitas, yaitu dengan mengetahui modulus elastisitas komposit dalam rentang batas atas (*upper bound*) dan batas bawah (*lower bound*) [2].

Aminur *et al* [3] dalam penelitiannya untuk mengetahui sifat fisik, mekanik, dan koefisien serap bunyi bahan akustik dari komposit partikel limbah kayu jati matriks resin poliester. Penelitian ini dilakukan dengan cara serbuk kayu jati diberikan perlakuan 5% NaOH selama 60 menit kemudian dikeringkan dan diayak dengan ukuran 0,841 mm. Hasil penelitian menunjukkan kekuatan tarik komposit tertinggi 11,26 N/mm² pada fraksi volume serat 25% dan kekuatan tarik komposit terendah 7,38 N/mm² pada fraksi volume serat 45%; kekuatan *bending* komposit tertinggi 4,53 N/mm² pada fraksi volume serat 25% dan kekuatan *bending* komposit terendah 4,25 N/mm² pada fraksi volume serat 45%. Sedangkan koefisien serap bunyi komposit pada frekuensi 750 Hz tertinggi 34,506 dan koefisien serap bunyi komposit terendah 26,535. Semakin meningkat fraksi volume serat maka semakin menurun sifat tarik dan *bending* namun koefisien serap bunyi semakin meningkat.

B. Komposit Serat (*Fibrous Composites*)

Komposit serat adalah komposit yang terdiri dari serat dan matriks. Fungsi utama dari serat adalah sebagai penopang kekuatan dari komposit, sehingga kekuatan komposit sangat bergantung dari serat yang digunakan. Tegangan yang dikenakan pada komposit mulanya diterima oleh matriks akan diteruskan kepada serat, sehingga serat akan menahan beban sampai beban maksimum. Oleh karena itu serat harus mempunyai tegangan tarik dan modulus elastisitas yang lebih tinggi daripada matriks penyusun komposit. Pemilihan serat pada komposit juga harus mempertimbangkan beberapa hal salah satunya harga. Harga penting karena sebagai pertimbangan bila akan digunakan pada skala industri.

Muhajir *et al* [4] melakukan penelitian untuk mengetahui kekuatan tarik bahan komposit serat ijuk dan matriks resin epoksi dengan varian tata letak. Dari hasil penelitian yang dilakukan didapatkan kekuatan tarik komposit tertinggi dengan tata letak random sebesar 3,38 kgf/mm² dan perpanjangan sebesar 0,38 mm, *Cross* sebesar 3,03 kgf/mm² dan perpanjangan sebesar 0,86 mm, *continuous* sebesar 2,24 kgf/mm² dan perpanjangan sebesar 1,03 mm, *woven* sebesar 1,64 kgf/mm² dan perpanjangan sebesar 0,64 mm. Bentuk patahan menunjukkan bahwa hasil pengujian tarik mengalami patahan getas, karena ujung patahan terdapat patahan 90⁰ dan kasar, adanya mekanisme *fiber pull out*. Hal ini menunjukkan lemahnya ikatan antara serat dan matriks karena serat mengandung lapisan seperti lilin yang menghalangi ikatan *interface* antar serat dengan matriks.

C. Komposit Lapis (*Laminates Composites*)

Jenis komposit ini terdiri dari dua lapis atau lebih yang digabung menjadi satu dan setiap lapisnya memiliki karakteristik sifat tersendiri. Contoh komposit ini yaitu bimetal, pelapisan logam, kaca yang dilapisi, dan komposit lapis serat.

Prasetya *et al* [5] dalam penelitiannya menggunakan material komposit dengan penguat serat karbon, serat nilon, dan penambahan *filler* dari aluminium serbuk serta matriks dari resin epoksi sebagai material pembuatan bodi lori. Serat disusun berdasarkan variasi karbon-nilon-karbon-nilon-karbon-nilon (CNCNCN), karbon-karbon-nilon-nilon-karbon-karbon (CCNNCC), nilon-nilon-karbon-karbon-nilon-nilon (NNCCNN) dan karbon-karbon-karbon-nilon-nilon-nilon (CCCNNN). Jumlah keseluruhan serat penguat adalah sebanyak 6 lapisan dengan variasi susunan laminasi. *Filler* aluminium serbuk dicampur dengan matriks pengikat dengan komposisi 50% *filler* dan 50% resin. Kemudian sebagai pengikat dipergunakan resin epoksi. Hasil yang didapatkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 17,82 Mpa pada susunan serat laminasi CNCNCN dan kekuatan tarik terendah sebesar 13 Mpa pada susunan serat laminasi NNCCNN.

Berdasarkan penempatan terdapat beberapa tipe serat pada komposit, yaitu :

A. *Continuous Fiber Composite*

Tipe serat ini mempunyai susunan serat panjang dan lurus, membentuk lamina diantara matriksnya. Jenis komposit ini paling banyak digunakan. Kekurangan tipe ini adalah lemahnya kekuatan antar lapisan. Hal ini dikarenakan kekuatan antar lapisan dipengaruhi oleh matriksnya.

Reynaldi *et al* [6] dalam penelitian yang dilakukan untuk mengetahui nilai kekuatan pengujian tarik dan *bending* dari komposit serat pelepah pisang dengan variasi perbandingan berat serat yaitu 30%, 50%, dan 70%. Penelitian dilakukan menggunakan penguat/serat pelepah pisang dengan arah serat lurus/*continuous* dan menggunakan 3 lapisan serat, matriks yang digunakan adalah resin poliester. Hasil penelitian pada pengujian tarik menunjukkan bahwa komposit serat pelepah pisang dengan variasi volume serat 70% memiliki rata-rata nilai kekuatan tarik paling tinggi terhadap variasi volume serat lainnya, yaitu sebesar 25,10 Mpa. Terjadi kenaikan kekuatan tarik pada setiap penambahan variasi volume serat, sedangkan untuk hasil pengujian *bending* menunjukkan bahwa variasi volume serat 30% memiliki nilai kekuatan *bending* paling tinggi yaitu sebesar 43,75 Mpa. Seiring bertambahnya variasi volume serat kekuatan *bending* juga ikut menurun.

B. *Woven Fiber Composite (bi-directional)*

Komposit ini tidak mudah terpengaruh pemisahan antar lapisan karena susunan seratnya juga mengikat antar lapisan. Akan tetapi susunan serat memanjangnya yang tidak begitu lurus mengakibatkan kekuatan dan kekakuan tidak sebaik tipe *continuous fiber*.

Kelkar *et al* [7] dalam penelitiannya menggunakan serat nano *Tetra Ethyl Orthosilicate* (TEOS) dan teknik *electrospinning* dalam laminasi komposit *fiberglass-epon* untuk meningkatkan sifat interlaminar pada komposit *woven*. Tikar anyaman *fiberglass* berlapis elektrospun diresapi dengan resin epoksi menggunakan proses *Heated-Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding* (H-

VARTM). Sifat interlaminar dari komposit hibrid rekayasa nano yang diperoleh dengan menggunakan uji ASTM *Double Cantilever Beam* (DCB) dan uji geser sinar pendek dibandingkan dengan sifat tanpa adanya lapisan serat elektrospun, untuk mempelajari pengaruhnya. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan 20% karena kehadiran nanofiber elektrospun interlaminar TEOS.

C. *Discontinuous Fiber Composite (chopped fiber composite)*

Komposit dengan tipe serat ini dibedakan menjadi :

1. *Aligned Discontinuous Fiber*
2. *Off-axis Aligned Discontinuous Fiber*
3. *Randomly Oriented Discontinuous Fiber*

Alshetiwi *et al* [8] melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh pelapisan ulang pasak komposit yang diperkuat serat prefabrikasi (FRC) menggunakan komposit yang diperkuat serat pendek (SFRC) pengisi massal, dapat mengalir, diskontinu terhadap adaptasi intrakanal pada gigi premolar yang telah dirawat endodontik dengan kondisi lemah. Hasil perbedaan yang signifikan secara statistik pada berat bahan PVS diidentifikasi antara kelompok. Kelompok 1 mempunyai bahan PVS dengan bobot paling ringan, disusul kelompok restorasi dengan tiang *fiber custom* dan tiang *fiber* standar.

D. *Hybrid Fiber Composite*

Hybrid fiber composite merupakan komposit gabungan antara tipe serat lurus dengan serat acak. Pertimbangannya supaya dapat mengeliminir kekurangan sifat dari kedua tipe dan dapat menggabungkan kelebihan keduanya.

Razan *et al* [9] dalam penelitiannya dengan mengkombinasikan serat tandan kosong kelapa sawit dan serat kaca dengan matriks poliuretan untuk mengetahui nilai koefisien perpindahan panas secara konduksi. Dari hasil percobaan dan analisis yang dilakukan pada material komposit *sandwich hybrid* dapat disimpulkan bahwa suhu yang tidak berubah ini akan semakin menurun konduktivitasnya jika penambahan serat tanda kosong kelapa sawit. Nilai konduktivitas yang tidak berubah adalah fraksi 25% karena jumlah serat yang digunakan tidak terlalu banyak.

2.1.1. Serat Alami

Serat alami diekstraksi dari alam seperti tumbuhan dan hewan. Banyak serat yang diambil dari pisang, palem, bambu, bulu kambing, serat goni, serat sisal, dan lain sebagainya [10]. Tabel 2.1 menunjukkan klasifikasi serat alami. Selain itu, ada beberapa penelitian yang menunjukkan serat alami lain yang memiliki potensi seperti serat dari *Rosella* (kembang sepatu), tebu (*scaaharum cilliare*), pinus, ampas tebu, dan lain sebagainya. Komposit dengan berpenguat serat alam mempunyai kekuatan 40% lebih kuat serta lebih ringan dibandingkan komposit serat gelas.

Tabel 2.1 Klasifikasi Serat Alami [10]

Serat Alami	Selulosa/ Lignoselulosa	Kulit	Linen, flax, jute. kenaf, rami
		Daun	Abaka, pisang, nanas, sisal
		Biji	Kapas, katun
		Buah	Serabut kelapa
		Kayu	Eukaliptus
		Tangkai	Gandum, jagung, padi
		Rumput	Bambu, jagung
	Hewan	Bulu/rambut	Bulu Kasmir, rambut kambing, rambut kuda, bulu domba
		Sutra	Mulberri
	Mineral	-	Asbes, serat keramik, serat logam

Proses manufaktur komposit berpenguat serat alam mempunyai keuntungan relatif murah serta ramah lingkungan. Oleh karena itu, material komposit serat alam dapat diproyeksikan menjadi material alternatif pengganti komposit serat sintetis. Konsep penggunaan material alam yang dianjurkan *Food and Agriculture Organization* (FAO) pada dunia industri dengan adanya deklarasi *International Year of Natural Fibres* pada tahun 2009. Pada Tahun 2006 FAO menganjurkan agar mulai tahun 2009 sudah menggunakan material baku yang ramah terhadap lingkungan dan mudah terurai. Komposit serat alam dapat didaur ulang, ringan, tahan korosi, tahan terhadap air, performa menarik, tanpa proses permesinan, sehingga selaras dengan anjuran program lingkungan dari pemerintah yaitu *go green*. Penggunaan material serat alami dapat meningkatkan penyelesaian masalah lingkungan, karena sifatnya yang ramah terhadap lingkungan, harganya murah,

renewable, *biogradable*, dan penggunaan serat alami dapat meningkatkan kepedulian terhadap lingkungan [11].

Serat alami memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan serat sintetis diantaranya; ketersediaanya yang melimpah, harganya murah, dan dapat terurai. Berbagai macam sifat tergantung pada spesies tanaman, kondisi pertumbuhan, dan metode pada saat ekstraksi. Tabel 2.2 menunjukkan komposisi unsur kimia pada serat alam.

Tabel 2.2 Komposisi unsur kimia serat alami [10]

Serat	Selulosa (%)	Hemiselulosa (%)	Lignin (%)	Kadar Air (%)
Pisang	60-65	6-8	5-10	10-15
Sabut	43	< 1	45	10-12
Flax	70-72	14	4-5	7
Jute	61-63	13	5-13	12,5
Rami	80-85	3-4	0,5	5-6
Sisal	60-67	10-15	8-12	10-12
Sun Hemp	70-78	18-19	4-5	10-11
Kapas	90	6	-	7

A. Setiawan dan D. Rahmalina [12] dalam penelitiannya mengembangkan material komposit polimer epoksi berpenguat serat bambu dan serat serabut kelapa sebagai pengganti aluminium untuk aplikasi *running boards* pada kendaraan mobil. Hasil eksperimen menunjukkan nilai modulus elastis optimum komposit sebesar 320.19 Mpa pada fraksi volume serat 10%, rasio serat *hybrid* serat bambu (SB) : serat serabut kelapa (SSK) adalah 50:50, orientasi arah serat

SB 90°, dan orientasi serat SSK 0° telah memenuhi syarat kekakuan *running boards* dengan pembebanan statis sebesar 227 kg dan defleksi yang diizinkan sebesar 5 mm. Sedangkan ketangguhan optimum komposit sebesar 0.4623 J/mm² dapat dicapai pada spesimen dengan fraksi volume serat 7.5%, rasio serat *hybrid* SB : SSK adalah 30:70, orientasi arah serat SB 45°, dan orientasi arah serat SSK 0°.

Titani *et al* [13] dalam penelitiannya membuat komposit berpenguat serat serabut kelapa sebagai pengganti *fiberglass* dengan tujuan mengetahui pengaruh penambahan serat serabut kelapa terhadap nilai energi *impact* yang diserap rata-rata disetiap variasi fraksi berat 0%, 1%, 2%, 3%, 4% menggunakan matriks resin *polyester* untuk aplikasi bahan konstruksi pesawat terbang. Dari hasil pengujian *impact* metode *charphy* dengan standard ASTM E-23 didapatkan energi yang diserap rata-rata tertinggi terjadi pada fraksi berat 4% sebesar 338,6 Joule. Hal ini menunjukkan semakin banyak penambahan fraksi berat serat serabut kelapa, maka energi yang diserap pada pengujian *impact* akan semakin besar.

Husman *et al* [14] melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh panjang serat dan fraksi volume komposit lidah mertua terhadap pengujian tarik. Panjang serat yang digunakan masing-masing 60 mm, 80 mm, 100 mm dan fraksi volume serat 10%, 20%, dan 30% dengan perlakuan alkali NaOH 6% selama 1 jam dan pemanasan pada suhu 80°C selama 2 jam. Metode yang digunakan adalah *hand lay up*. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa pengaruh panjang serat dan fraksi volume serat terhadap pengujian tarik sangat besar sekali. Semakin panjang serat

yang digunakan, maka kekuatan tariknya semakin besar. Semakin banyak persentase serat, semakin banyak semakin kuat. Kekuatan tarik tertinggi sebesar 39,03 Mpa pada panjang serat 100 mm dan fraksi volume 30%. Sedangkan hasil kekuatan tarik terendah sebesar 15,07 Mpa pada panjang serat 60 mm dan fraksi volume serat 10%.

Permintaan komposit dengan serat alami tumbuh secara signifikan pada industri otomotif termasuk pesawat terbang karena bobotnya yang ringan dan ramah lingkungan. Komponen yang ringan dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Komposit serat alami sebagian besar digunakan pada bagian interior seperti *dashboard*, pintu, laci, bantalan kursi, sandaran dan pelapis kabin. Sedangkan penggunaan pada bagian eksterior masih sangat terbatas. Penggunaan serat alami didasarkan pada regulasi persyaratan habis pakai pada produk otomotif di negara-negara uni eropa dan sebagian negara- negara di asia. Selain di bidang otomotif, penggunaan serat alami meluas mulai dari tekstil, konstruksi, farmasi, olahraga, pengemasan, kertas, alat musik, bioenergi, dan biofuel [10].

2.1.2. Serat Kelapa

Serabut kelapa merupakan bagian dari buah kelapa yang membungkus tempurung kelapa, memiliki ketebalan berkisar 5-6 cm. Serat kelapa merupakan bahan alami dari serabut kelapa dengan rendemen antara 80-90 gram serat per butir. Panjangnya sekitar 15-40 cm, dengan diameter 0,1-1,5 mm. Gambar 2.1

menunjukkan serat kelapa yang digunakan dan Tabel 2.3 adalah komposisi kimia dari serat kelapa.



Gambar 2.1 Serat Kelapa

Tabel 2.3 Komposisi kimia serat kelapa [2]

Komponen	Persentase (%)
Air	5,25
Pektin	3,00
Hemiselulosa	0,25
Lignin	45,84
Selulosa	43,44

Selulosa adalah salah satu biopolimer alam yang memiliki banyak gugus hidroksil yang memungkinkan pembentukan jaringan dengan ikatan hidrogen yang sangat baik sebagai reaksi kimia. Selulosa merupakan bagian penyusun utama jaringan tanaman berkayu. Hemiselulosa merupakan senyawa polisakarida yang mudah

larut dalam alkali dan mudah terhidrolisis oleh asam mineral menjadi gula dan senyawa lain. Lignin adalah bagian paling dominan pada selulosa, memiliki peran membentuk lapisan di antara serat yang kemudian mengikat antar serat selulosa dalam kayu atau bukan kayu [15]. Pektin adalah senyawa polimer yang dapat mengikat air, membentuk gel, atau mengentalkan cairan bersama gula dan asam sitrat [16]. Sifat dari serabut kelapa diantaranya adalah tahan terhadap pelapukan gangguan mikroorganisme, serta lebih ringan dari serat lainnya. Serat kelapa tidak mudah membusuk karena tidak terdapat pengurai yang dapat merusak ijuk dan serabut kelapa [17].

Al'Farisi *et al* [18] dalam penelitiannya menggunakan komposit serat sabut kelapa dan resin polyester sebagai material untuk pembuatan helm. Serat sabut kelapa dilakukan perendaman NaOH 6% selama 1 jam, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan komposit dengan variasi susunan serat sabut lurus dan acak, serta komposisi rasio serat sabut kelapa terhadap resin BTQN 157 adalah 0% : 100%, 10% : 90%, 20% : 80%, 30% : 70%, 40% : 60%, 50% : 50%, 60% : 40%, dan 70% : 30%. Pada masing-masing dilakukan uji impact, uji densitas dan uji porositas dan dibandingkan dengan nilai standar material untuk helm berdasarkan SNI 18111-2007. Data hasil yang didapatkan komposit serat sabut kelapa nilai ketangguhan impact yang terbaik terdapat pada komposit 50% serat dan resin 50% dengan nilai sebesar 271,311,29 J/m² pada spesimen serat susunan lurus yang sifat mekaniknya cukup terbilang ulet atau kuat, nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan ketangguhan impact bahan helm SNI 1811-2007 sebesar 9.720 J/m².

2.1.3. Matriks

Matriks digunakan sebagai pengikat *filler* dan melindungi filamen di dalam struktur komposit. Pada umumnya bahan matriks yang sering digunakan dalam komposit antara lain :

1. Polimer

Bahan ini biasanya disebut dengan polimer berpenguat serat (*FRP-Fiber Reinforced Polymers or Plastic*), bahan ini menggunakan polimer berdasar resin resin sebagai matriksnya, seperti kaca, karbon, dan aramid yang digunakan sebagai penguatnya. Matriks polimer dibagi berdasarkan jenis polimer yang digunakan yaitu :

A. Thermoset

Matriks jenis ini yang paling umum digunakan dalam komposit adalah fenolik, epoksi, vinilester, dan poliester. Resin fenolik sering dipilih karena sifatnya yang tahan api, tahan terhadap cairan dan bahan kimia, kekakuannya yang tinggi, serta lebih efisien apabila dikombinasikan dengan serat gelas dan aramid. Resin epoksi dipilih karena sifat mekanik dan termalnya yang tinggi, ketangguhan yang baik, ketahanan air dan ketahanan termal yang baik, tingkat penyusutan yang rendah, serta mudah untuk difabrikasi. Vinilesters menawarkan perpaduan antara sifat mekanik yang baik dan kemudahan dalam proses fabrikasi [19]. Gambar 2.2 menunjukkan resin epoksi dan resin poliester yang termasuk dari jenis matriks polimer Thermoset.



(a) Resin Epoksi



(b) Resin Poliester

Gambar 2.2 Resin Thermoset

Saputra *et al* [20] dalam penelitiannya untuk menganalisis sifat mekanis dan sifat fisis serat serabut kelapa serat bambu matriks epoksi sebagai material bumper mobil. Komposit dibuat menggunakan lima variasi fraksi volume yaitu 5% serat sabut kelapa: 15% serat bambu: 80% matriks, 10% serat sabut kelapa: 10% serat bambu: 80% matriks, 15% serat sabut kelapa: 5% serat bambu: 80% matriks, 0% serat sabut kelapa: 20% serat bambu: 80% matriks dan 20% serat sabut kelapa: 0% serat bambu: 80% matriks dan karakteristik sifat fisis meliputi data densitas, *swelling*, dan serapan air. Hasil pengujian fisis komposit pada *swelling*, dan serapan air menunjukkan bahwa komposit yang dibuat telah memenuhi klasifikasi JIS A5908, sedangkan densitas komposit masih belum memenuhi klasifikasi JIS A5908. Hasil pengujian tarik pada komposit menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik maksimal yang paling besar diperoleh pada fraksi 20% serat bambu : 0% serat sabut kelapa : 80% matriks dengan nilai 95,578 Mpa, yang mana diikuti penurunan kekuatan tarik pada fraksi volume 5% serat sabut kelapa: 15% serat

bambu: 80% matriks, 10% serat sabut kelapa: 10% serat bambu: 80% matriks, 15% serat sabut kelapa: 5% serat bambu: 80% matriks, dan 20% serat sabut kelapa: 0% serat bambu: 80% matriks. Komposit yang dianalisis masih layak digunakan sebagai material pembuat bumper mobil karena kekuatannya tidak kirang dari standar bumper mobil yaitu 8,09 Mpa.

B. Thermoplastik

Matriks jenis ini yang umum digunakan dalam proses pembuatan prepreg thermoplastik antara lain elastomer karet, poliuretan, akrilik, atau campuran dari beberapa resin. Poliuretan menawarkan sifat mekanik yang baik, ketahanan terhadap termal yang baik, serta resiko kegagalan delaminasi yang lebih rendah ketika terkena beban impak. Elastomer karet memiliki sifat mekanik yang paling rendah, resiko kegagalan delaminasi yang paling tinggi, namun memiliki kemampuan menyerap energi potensial yang paling tinggi dibandingkan dengan jenis resin thermoplastik lainnya. Resin polietilena sering digunakan dalam pembuatan prepreg thermoplastik karena dapat dibuat menjadi film yang memiliki densitas rendah. Resin berbasis film lebih mudah dan lebih murah untuk digunakan daripada resin dalam bentuk cairan, tetapi resin ini tidak mengelilingi dan membasahi serat dengan baik sehingga terkadang memberikan performa yang kurang baik. Serat tenun atau serat searah yang memanfaatkan matriks dalam bentuk film biasanya dibuat dengan melelehkan film ke dalam serat. Dengan proses tekan panas film terikat dengan serat dan membentuk prepreg laminasi film thermoplastik. Gambar 2.3 menunjukkan resin poliuretan dan resin polietilena yang termasuk dari jenis matriks polimer Thermoplastik.



(a) Resin Poliuretan



(b) Resin Polietilena

Gambar 2.3 Resin Thermoplastik

Mahyoedin *et al* [21] melakukan penelitian untuk menentukan karakteristik reologi komposit serbuk cangkang kemiri (SCK) berukuran $45 \mu\text{m} < d < 75 \mu\text{m}$ dan resin poliuretan (PU) dengan komposisi bervariasi, yaitu 5%:95%, 10%:90% 15%:85%. Pencampuran SCK dan PU dilakukan dengan *mechanical mixer* dengan kecepatan dan lama pengadukan masing-masing 10, 15, dan 20 menit dan 100, 200, dan 250 rpm. Reologi komposit diperoleh dengan pengujian *rotational viscometer* dan dioptimas dengan metode Toguchi. Penelitian menunjukkan viskositas terkecil 218,66 mPa.s, ditentukan pada komposit dengan komposisi 5%:95%, waktu pengadukan 15 menit dan kecepatan pengadukan 100 rpm.

2. Keramik

Bahan ini digunakan pada lingkungan bertemperatur sangat tinggi, bahan ini menggunakan keramik sebagai matriks dan diperkuat dengan serat pendek atau serabut-serabut (*Whiskers*) di mana terbuat dari silikon karbida. Pembuatan komposit dengan bahan keramik yaitu keramik dituangkan pada serat yang telah

diatur orientasinya. Beberapa bahan yang digunakan pada matriks ini adalah SiC dan SiN.

Sulardjaka *et al* [22] melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh persentase berat serbuk SiC terhadap kekerasan dan kekuatan *bending* material komposit AlSiTiB yang diperkuat dengan serbuk silikon karbida (SiC). Penelitian dilakukan dengan variasi persentase serbuk SiC : 2,5%, 5%, dan 7,5% berat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase berat serbuk SiC semakin meningkat kekerasan dan kekuatan *bending* material komposit.

3. Logam

Matriks jenis ini banyak digunakan pada industri otomotif, bahan ini menggunakan bahan logam seperti aluminium sebagai matriks dan penguatnya dengan serat seperti silikon karbida.

Rahmalima *et al* [23] melakukan penelitian untuk mempelajari pengaruh fraksi volume silikon karbida berbentuk partikulat dengan variasi 5, 10, dan 20% terhadap karakteristik balistik komposit matriks aluminium. Hasil yang didapatkan bahwa peningkatan fraksi volume silikon karbida dari 5%, 10%, dan 20% meningkatkan kekerasan komposit. Penambahan silikon karbida berbentuk partikulat dalam matriks dapat dilakukan secara optimal sampai dengan fraksi volume 20% dengan distribusi yang merata, walaupun dengan meningkatkan fraksi volume silikon karbida dapat meningkatkan *void* di sekitar partikel.

2.1.4. Polimer Konduktif

Beberapa jenis polimer memiliki daya hantar listrik yang mirip dengan daya hantar listrik senyawa logam. Polimer dengan potensial konduktivitas menjadi penelitian setelah adanya publikasi yang memaparkan tentang pengembangan senyawa-senyawa organik yang dapat menghantarkan arus listrik seperti sifat logam [24]. Polimer konduktif dengan bahan dasar organik seperti Polianilin, polietilena, dan polipirol merupakan polimer organik yang memiliki kemampuan menghantarkan arus listrik dengan sistem konjugasi ikatan rangkap. Sehingga atom karbon mengikat atom karbon lain dengan ikatan tunggal dan ganda secara bergantian yang dapat mempengaruhi sifat konduktif pada polimer terkonjugasi. Polimer konduktif secara luas diproduksi dengan biaya yang relatif lebih murah. Akan tetapi polimer konduktif memiliki keterbatasan dalam hal konduktivitas yang relatif rendah sehingga perlu dilakukan proses doping untuk meningkatkan konduktivitasnya [25]. Gambar 2.4 menunjukkan salah satu polimer konduktif yaitu polianilin dan Tabel 2.4 adalah jenis-jenis polimer konduktif dan karakteristiknya.



Gambar 2.4 Polimer Konduktif Polianilin

Tabel 2.4 Jenis polimer konduktif [26]

Polimer	Konduktivitas ($\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$)	Stabilitas	Kemungkinan Pembuatan
<i>Polyactylene</i>	1000 - 100000	Buruk	Terbatas
<i>Polyphenylene</i>	1000	Buruk	Terbatas
<i>Polyphenylene Sulfide</i>	100	Buruk	Sangat Baik
<i>Polyphenylene Vinylene</i>	1000	Buruk	Terbatas
<i>Polypyroles</i>	100	Baik	Baik
<i>Polythiophenes</i>	100	Baik	Sangat Baik
<i>Polyaniline</i>	10	Baik	Baik

Claudia Merlini *et al* [27] memaparkan proses pembuatan komposit serat kelapa dengan polianilin (PANi) dengan melalui polimerisasi oksidasi *in situ aniline* dan menggunakan besi (III) klorida heksahidrat ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) atau amonium persulfat (APS) sebagai oksidan dan diperkuat dengan poliuretan (PU). Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposit PU/CF-PANi menunjukkan konduktivitas listrik yang lebih tinggi daripada campuran PU dan PU/PANi murni.

Konduktivitas material polimer dapat ditingkatkan dengan menambahkan karbon konduktif, seperti serat karbon, karbon hitam, dan grafit sintetik membentuk material komposit. Akan tetapi, konduktivitas komposit bergantung pada konsentrasi, orientasi, bentuk, ukuran, dan sifat-sifat dari pengisi konduktif yang dipakai [28]. Polimer konduktif menjadi salah satu alternatif yang dapat digunakan karena sifatnya yang ringan, fleksibel, murah, dan mudah untuk

diproduksi. Selain itu penggunaan polimer yang berasal dari alam merupakan salah satu solusi untuk menggunakan material yang ramah lingkungan [25].

2.1.5. Multi Walled Carbon Nanotube (MWCNT)

Multi Walled Carbon Nanotube (MWCNT) merupakan partikel nano yang banyak digunakan sebagai *filler* dalam komposit karena memiliki kekuatan tarik mencapai 200 Gpa yang mana jauh lebih tinggi dari serat karbon yang hanya 3-7 Gpa. Selain itu tingkat kekakuannya juga dapat mencapai 1,2 Tpa atau lima kali lebih besar dari serat karbon [29]. Konduktivitas listrik material komposit tergantung pada jenis *filler* (pengisi), bentuk, ukuran, dan distribusi pengisi di dalam komposit. Sifat bahan pengisi memiliki peran penting dalam menentukan konduktivitas komposit [30]. Gambar 2.5 menunjukkan serbuk MWCNT.



Gambar 2.5 *Multi Walled Carbon Nanotube* (MWCNT)

MWCNT memiliki peran untuk meningkatkan konduktivitas listrik, mekanik, *thermal*, membantu transfer beban dari matriks ke bahan penguat (misalnya tekstil kevlar atau serat karbon). MWCNT memiliki beberapa kesamaan sifat kimia dengan *Single Walled Carbon Nanotube* (SWCNT), perbedaan yang paling

terlihat adalah pada diameter luar yang lebih besar pada MWCNT, namun sifatnya kurang reaktif dibandingkan dengan SWCNT. MWCNT memiliki kepadatan yang sangat rendah antara $0,03 \text{ g/cm}^3$ dan $0,22 \text{ g/m}^3$. MWCNT dapat tahan pada suhu yang sangat panas dan kerapatan arus yang sangat tinggi. Penambahan serbuk CNT 5-10% sudah cukup untuk meningkatkan konduktivitas listrik dari jenis matriks keramik sebesar 5-8 kali lipat dan umumnya sifat mekaniknya juga membaik. Studi yang pernah dilakukan menunjukkan bahwa Konduktivitas listrik pada MWCNT dan SWCNT masing-masing 3000 W/mK dan 2000 W/mK [31].

Aseel Abdulameer Kareem dan Hussein Khazaal Rasheed [32] mengulas peningkatan konduktivitas pada serat karbon (CF) dan matriks resin epoksi yang telah dimodifikasi dengan *Multi Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) menggunakan teknik *dip-coating*. Penggunaan MWCNT menyebabkan peningkatan konduktivitas listrik dan *thermal* dengan membentuk jalur konduksi dalam matriks. Komposit MWCNT-CF/Ep menunjukkan stabilitas *thermal* yang lebih baik daripada komposit yang tidak dimodifikasi.

2.2. Sifat Mekanis dan Listrik Komposit

Penelitian dan inovasi material komposit serat alam mengalami perkembangan yang pesat . Hal ini dikarenakan serat alam memiliki kelebihan dibandingkan dengan komposit serat sintetis. Kelebihan penggunaan komposit serat alam diantaranya adalah dampak terhadap lingkungan yang rendah, dapat diperbaharui, murah, mudah terdegradasi serta dapat digunakan pada berbagai aplikasi. Penggunaan serat alam sebagai penguat pada komposit masih mengalami berbagai

permasalahan. Kelemahan serat alam sebagai penguat komposit antara lain: sifat mekanis rendah, sifat hidrofilik, temperatur proses terbatas, gaya ikat matriks dan serat yang rendah. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian untuk meningkatkan sifat serat alam untuk penguat komposit mulai dilakukan. Salah satu metode untuk mendapatkan penguatan yang baik dari serat alam, dapat dilakukan dengan perlakuan awal serat ataupun dengan merekayasa metode pembuatan serat alam [33].

Komposit polimer saat ini semakin banyak digunakan sebagai bahan struktural menggantikan paduan logam karena rasio kekuatan terhadap beratnya yang tinggi dan ketahanan terhadap korosi. Namun kekurangan dari bahan jenis ini adalah daya hantar listriknya yang rendah sehingga tidak melindungi dari petir dan medan elektromagnetik. Sifat-sifat ini sangat penting bagi industri dirgantara karena tingginya paparan sambaran petir yang jika terjadi pada material dengan konduktivitas listrik rendah dapat menyebabkan kerusakan parah. Komposit epoksi/karbon (EP/CF) paling sering digunakan sebagai dasar untuk meningkatkan konduktivitas listrik karena kekuatannya yang tinggi dan ketahanan yang baik terhadap petir, bahkan tanpa modifikasi [34].

2.2.1. Sifat Mekanis

Kekuatan dan kekakuan dari serat tanaman khususnya dipengaruhi oleh kandungan selulosa, maka upaya untuk meningkatkan kandungan selulosa adalah faktor utama untuk meningkatkan sifat serat. Perlakuan Alkali dengan *Natrium Hidroksida* (NaOH) pada serat alami adalah salah satu cara untuk meningkatkan

kandungan selulosa. Cara ini umum digunakan untuk menghilangkan kotoran-kotoran pada permukaan serat dan menurunkan tegangan permukaannya [35]. Pengaruh perlakuan alkali terhadap sifat permukaan serat alami di mana kandungan optimum air mampu dikurangi sehingga sifat alami serat dapat memberikan ikatan *interfacial* dengan matriks lebih optimal. Perendaman alkali dapat meningkatkan kekuatan tarik komposit serat, karena komposit yang diperkuat serat tanpa alkalisasi maka ikatan antara serat dengan matriks menjadi tidak sempurna karena adanya lapisan lilin di permukaan serat.

Perendaman alkali yang terlalu singkat tidak sepenuhnya dapat menghilangkan lapisan lilin pada serat, namun bila dilakukan terlalu lama maka akan terjadi penurunan kekuatan tarik. Hal ini dipengaruhi oleh hemiselulosa, lignin dan pektin yang hilang maka kekuatan serat akan menurun [36]. Tabel 2.5 menunjukkan sifat mekanis beberapa serat alami.

Diharjo melakukan penelitian [37] terkait pengaruh alkali pada komposit serat rami - polyester dengan variasi perendaman 0 jam, 2 jam, 4 jam, dan 6 jam pada fraksi volume serat 35%. Kekuatan tarik paling optimal didapatkan pada pengukuran perlakuan alkali selama 2 jam dengan nilai 190,27 Mpa. Serat rami yang diperkuat dengan perlakuan 5% NaOH, mengindikasikan patahan tanpa adanya *fiber pull out*.

Tabel 2.5 Sifat Mekanis Beberapa Serat Alami [38]

Serat	Kepadatan (g/cm ³)	Kekuatan Tarik (Mpa)	Modulus Young (Gpa)	Regangan
Jute	1.23	325-770	37.5-55	2.5
Flax	1.38	700-1000	60-70	2.3
Hemp	1.35	530-1110	45	3
Rami	1.44	915	23	3.7
Pisang	1.35	721.5-910	29	2
Nanas	1.5	1020-1600	71	0.8
Kenaf	1.2	745-930	41	1.6
Sabut	1.2	140.5-175	6	27.5
Sisal	1.2	460-855	15.5	8
Abaka	1.5	410-810	41	3.4
Kapas	1.21	250-500	6-10	7

Nugroho melakukan penelitian [39] terkait fraksi volume NaOH terbaik untuk meningkatkan kekuatan tarik dan regangan pada serat tandan kosong kelapa sawit. Perlakuan alkali NaOH dengan variasi fraksi volume 4%, 6%, dan 8% selama 2 jam diperoleh kekuatan tarik dan regangan paling optimal pada fraksi volume 4% yaitu sebesar 36,4 Mpa dan nilai regangan 1,95%.

2.2.2. Sifat Listrik

Konduktivitas listrik sangat penting bagi komposit yang menggunakan serat alami sebagai penguat. Serat alami memiliki sifat konduktif yang lebih rendah dibandingkan serat sintetis seperti serat karbon dan serat kaca. Terdapat minat

yang muncul dalam pengembangan dan penerapan komposit polimer konduktif yang diperkuat serat alami dalam berbagai aspek industri. Polimer konduktif seperti polipirol, polianilin, dan politiofena banyak digunakan karena karakteristik listrik dan optiknya yang unik. Pelapisan polimer konduktif polipirol pada komposit berbasis serat selulosa bambu dapat meningkatkan sifat listriknya dengan konduktivitas listrik adalah $8,4 \times 10^{-3}$ S/cm [40]. Konduktivitas listrik serabut kelapa berlapis polianilin dengan komposit poliuretan (PU) adalah $(1 \pm 0,39) \times 10^{-2}$ S/cm hingga $(1 \pm 0,39) \times 10^{-1}$ S/cm [41]. Merlini *et al* [42] dalam penelitiannya dengan komposit matriks poliuretan (PU) menggunakan serat palem persik (PPF) yang dilapisi dengan polipirol (PPy) menunjukkan konduktivitas listrik yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran PU dan Ppy yaitu sebesar $(2.2 \pm 0.30) \times 10^{-1}$ S/cm. Sridhar *et al* [43] mengulas peningkatan konduktivitas listrik pada serat batang tebu yang dipolimerisasi dengan polianilin. Penggunaan polianilin menyebabkan peningkatan konduktivitas listrik sebesar 0,33646 S/cm.

2.3. Sistem Proteksi Petir

Sambaran petir pada mobil dan pesawat terbang biasanya dianggap sebagai peristiwa langka. Namun bila terjadi bisa berakibat fatal bagi sistem elektronik, kontrol, dan beresiko kematian bagi pengemudi kendaraan [44][45]. Menurut penelitian yang dilakukan di Amerika Serikat dan Jepang, jumlah penumpang yang mengalami cedera dan kematian akibat sambaran petir mengalami peningkatan dalam beberapa tahun terakhir [46][47]. Pada pesawat terbang sebagian besar strukturnya terdiri dari material logam. Perubahan kemudian dilakukan dengan mengganti material logam dengan *Carbon Fiber Reinforced*

Polymer (CFRP), namun konduktivitas listriknya tidak sebaik material logam seperti aluminium. Hal ini yang merupakan masalah yang serius pada upaya perlindungan dari sambaran petir [45].

A. X. Siregar dalam penelitiannya [48] membahas *grounding system* pada pesawat terbang jenis Boeing 737-200 yang dirancang agar dapat mengamankan pesawat terbang dari sambaran petir. Pada saat terjadi sambaran petir pada badan pesawat terbang, maka sistem proteksi dan *static discharge* akan bekerja untuk mengalirkan muatan listrik ke udara. Bila masih terdapat sisa muatan listrik pada saat pelepasan ke udara, maka *Electrostatic Discharger Sensitive Device* (EDSD) atau *Line Replaceable Unit* (LRU) akan bekerja membuang sisa muatan listrik pada pesawat terbang. Selanjutnya sisa muatan listrik yang ada dibuang dengan menggunakan *static grounding* pada saat pesawat mendarat (*landing*).

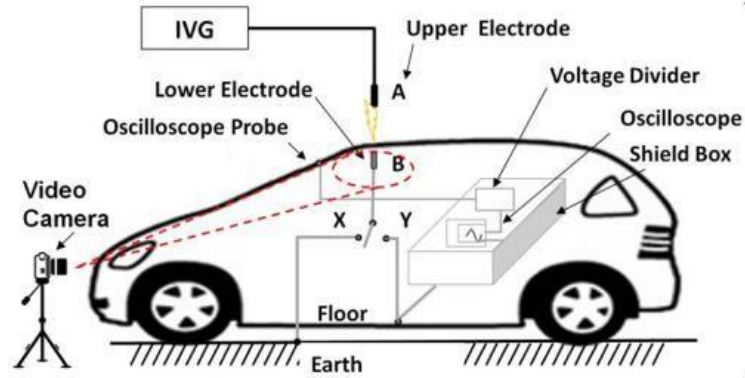
M. Khoirudin dalam penelitiannya [49] menyelidiki sistem kerja proteksi petir pada pesawat terbang yang menggunakan komponen *Static Discharge* dan menentukan letak pemasangannya pada pesawat terbang. Metode bola gulir digunakan untuk mengetahui titik yang berpotensi terkena sambaran petir dan titik pemasangan *Static Discharge*. Setelah dilakukan penelitian untuk memproteksi dari arus petir sebesar 100 kA pada pesawat terbang yang tidak beroperasi ditetapkan radius bola gulir sebesar 32 m dan pada saat beroperasi ditetapkan radius bola gulir sebesar 38 m, titik pemasangan *static discharge* adalah pada ujung sayap paling luar dan ekor pesawat terbang paling luar dari *elevator* maupun *rudder* baik ketika sedang beroperasi maupun tidak beroperasi. Pada saat

static discharge bekerja dengan normal maka sangat kecil kemungkinan sambaran petir mengenai peralatan elektronik dan bodi pesawat terbang.

Untuk mempelajari dampak petir, Naito *et al* [50] menerapkan petir buatan ke sebuah kendaraan dengan menggunakan generator tegangan impuls (IVG) dan menyelidiki jalur arus petir di dalam kendaraan dan di antara roda dan tanah. Pengukuran juga untuk melihat apakah sampel uji yang digunakan dapat berlaku sebagai sangkar faraday yang ideal untuk melindungi interior dari medan elektromagnetik.

Alkhteeb *et al* [44] dalam penelitiannya melakukan pengujian impuls petir pada material *Carbon Fiber Reinforced Plastic* (CFRP) yang diletakkan pada bagian atap kendaraan dalam keadaan tanpa penumpang. Elektroda atas di pasang di sekitar 600 mm dari atap kendaraan. Kendaraan ditempatkan di atas lembaran tembaga yang dihubungkan ke tanah. Sebuah kamera video diposisikan di luar kendaraan untuk merekam fenomena listrik di sekitar kendaraan yang diuji dengan petir buatan. *Setup* pengujian petir buatan dilakukan seperti pada Gambar

2.6. Elektroda bawah disejajarkan dengan elektroda atas dan celah antara elektroda bawah dan langit-langit kendaraan adalah sekitar 10 mm. Elektroda bawah terhubung ke lantai kendaraan dengan kabel pentanahan.



Gambar 2.6 *Setup* pengujian petir buatan menggunakan kendaraan

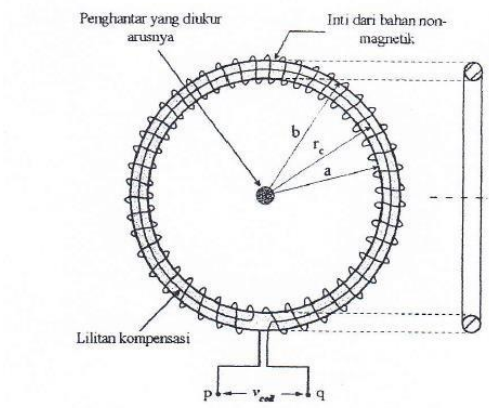
Probe osiloskop direkatkan ke langit-langit kabin untuk mengukur tegangan lonjakan yang disebabkan oleh petir buatan. Sinyal tegangan direkam menggunakan osiloskop digital setelah diturunkan menggunakan pembagi tegangan. Peralatan pengukuran disimpan dalam kotak logam yang ditempatkan di dalam kabin untuk melindungi dari medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh petir buatan.

2.4. Pengukuran Arus Impuls Menggunakan Kumpan Rogowski

Pengukuran arus tinggi impuls tidak seperti halnya pengukuran arus tinggi frekuensi daya. Arus tinggi impuls berlangsung dalam waktu yang sangat singkat, yaitu dalam orde mikro sekon dan nilai puncak arus impuls sangat tinggi. Karena itu, cara pengukuran arus yang biasa dilakukan pada instalasi tenaga listrik tidak dapat dilakukan [51]. Kumpan Rogowski merupakan kumpan dengan inti udara yang dapat mengukur arus bolak-balik dan arus impuls berkecepatan tinggi berdasarkan Hukum Ampere dan Faraday [52]. Ada banyak kelebihan kumpan Rogowski, diantaranya adalah tidak menyebabkan kerusakan pada beban besar,

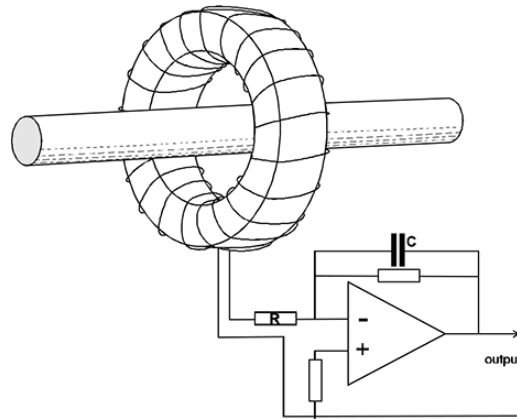
kemampuan untuk mengukur arus besar (mulai dari beberapa miliampere hingga 1 MA) karena inti non-magnetik, ringan, bandwidth lebar diantara 0,1 Hz hingga 1 GHz, murah, lebih aman karena tidak ada koneksi langsung dengan sirkuit utama, dan respon transien yang sangat baik [52][53][54]. Kekurangan dari metode ini adalah interferensi medan magnet dari luar yang nilainya kecil sudah dapat mempengaruhi reabilitas dan kepresisiannya.

Konstruksi kumparan Rogowski diperlihatkan pada Gambar 2.7. Konstruksi tersebut dinamakan kumparan Rogowski dengan satu-lapis belitan (*single later winding Rogowski Coil*) [55]. Belitan tersebut dililitkan di sepanjang inti toroid, jumlah belitannya dibuat sebanyak mungkin hingga memenuhi semua permukaan toroid. Medan magnet di sekitar penghantar dapat menginduksikan tegangan pada belitan tersebut sehingga akan mempengaruhi ketelitian pengukuran arus yang mengalir pada penghantar. Untuk menghindari pengaruh medan magnet yang datang dari luar, toroid bersama dengan kumparannya diselubungi dengan tabir logam yang ditanahkan [51].



Gambar 2.7 Konstruksi kumparan Rogowski

Skema pengukuran arus tinggi impuls menurut metode Rogowski ditunjukkan pada Gambar 2.8.



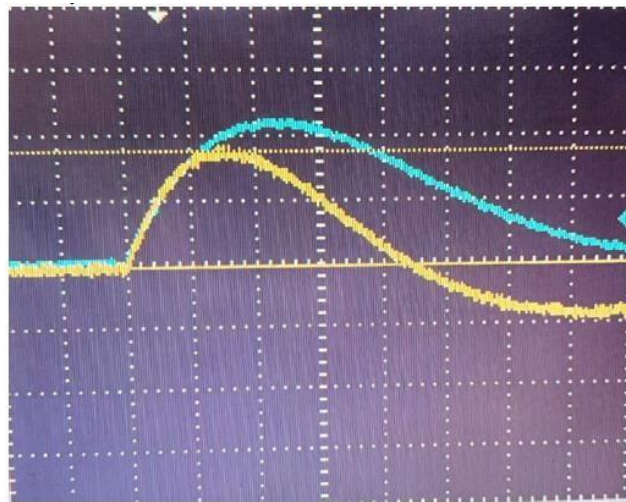
Gambar 2.8 Skema Pengukuran Arus Tinggi Impuls Dengan kumparan Rogowski

Untuk mengukur arus, penghantar ditempatkan di tengah kumparan Rogowski. Jika arus listrik mengalir pada penghantar, maka tegangan induksi akan muncul pada ujung-ujung kumparan Rogowski. Tegangan induksi tersebut merupakan integrasi dari tegangan induksi pada setiap lilitan dari kumparan Rogowski. Tegangan induksi pada ujung-ujung kumparan Rogowski berbanding lurus dengan differensial arus yang diukur. Untuk mendapatkan sinyal arus yang diukur, maka sinyal keluaran kumparan Rogowski harus dilewatkan pada rangkaian integrator yang sebanding dengan arus keluaran [56].

Kumparan Rogowski merk YUANXING tipe R-LCS25 [57] merupakan salah satu jenis yang digunakan untuk mengukur arus impuls. Gambar 2.9 menampilkan bentuk fisik kumparan Rogowski dan Gambar 2.10 adalah referensi bentuk gelombang dari pengukuran menggunakan kumparan Rogowski tipe ini. Adapun *datasheet* daripada kumparan Rogowski terdapat pada lampiran 5.



Gambar 2.9 Kumparan Rogowski



Gambar 2.10 Bentuk gelombang keluaran

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun waktu dan tempat penelitian ini dilaksanakan pada :

Waktu : April 2022 - Februari 2024

Tempat : - Laboratorium Teknik Elektro Universitas Lampung
 - Laboratorium LTSIT Universitas Lampung

3.2. Jadwal Kegiatan Penelitian

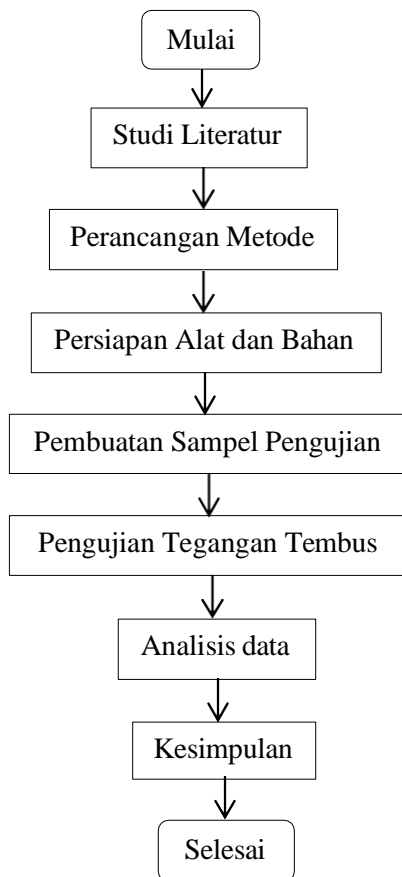
Adapun jadwal kegiatan penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian

Kegiatan	2022												2023												2024							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2						
Studi Literatur																																
Perancangan Metode																																
Seminar Usul																																
Pembuatan Material																																
Pengukuran dan Pengambilan Data																																
Analisis dan Pembahasan																																
Seminar Hasil																																
Perbaikan Data/Pengukuran Ulang																																
Ujian Komprehensif																																

3.3. Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir pada penelitian ini terdapat pada Gambar 3.1 yang menunjukkan langkah kerja penelitian.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

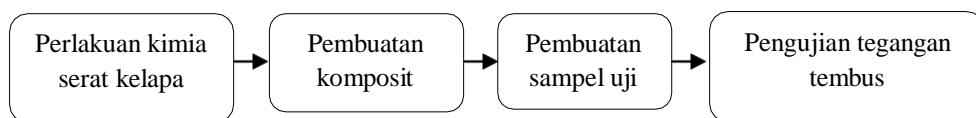
3.4. Alat dan Bahan Penelitian

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

- | | |
|--|------------------------------------|
| 1. NaOH | 9. <i>MWCNT</i> |
| 2. Serat kelapa | 10. PTT Impuls |
| 3. Cairan <i>Polyvinyl Alcohol</i> (PVA) | 11. Osiloskop |
| 4. HCl | 12. Kumparan Rogowski |
| 5. Polianilin | 13. Laptop |
| 6. Ammonium Persulfate (APS) | 14. Kaca ukuran 30 cm x 30 cm x 30 |
| 7. Aquades | cm |
| 8. Resin Epoksi + hardener | |

3.5. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dari pembuatan komposit hingga pengukuran material komposit dengan menggunakan tegangan tinggi impuls dibagi menjadi beberapa bagian yaitu ditunjukkan pada diagram blok yang dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram blok pembuatan dan pengujian komposit serat kelapa

Pada tahap pertama adalah membuat alat dan bahan penelitian meliputi perlakuan terhadap serat kelapa berupa proses perendaman serat kelapa dengan NaOH untuk menghilangkan kotoran yang menempel pada serat dan mengurangi kadar lignin

pada serat sehingga meningkatkan sifat mekanis serat. Kemudian dilanjutkan ke tahap pelapisan serat kelapa dengan polianilin melalui proses polimerisasi. Resin epoksi yang diberi serbuk *Multi Walled Carbon Nanotube* digunakan sebagai perekat serat kelapa dalam pembuatan komposit. Komposit serat kelapa dibuat dengan proses *hand lay-up*. Pada tahap terakhir adalah pengujian sampel uji dengan pembangkit tegangan tinggi impuls untuk mengukur tegangan tembus menggunakan kumparan Rogowski.

3.5.1. Perlakuan Terhadap Serat Kelapa

1. Menyiapkan serat kelapa yang sudah dibersihkan dari batok kelapa seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Serat Kelapa

2. Merendam serat kelapa dengan larutan NaOH 5% selama 2 jam seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Rendaman Serat Kelapa dengan 2% NaOH

3. Serat kelapa yang sudah direndam kemudian dibersihkan dengan aquades secukupnya hingga bersih seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Pencucian Serat Kelapa

4. Selanjutnya serat kelapa selama 6 jam menggunakan oven dengan suhu 70°C seperti pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Pengeringan Serat Kelapa Dengan Oven

3.5.2. Preparasi Serat Kelapa Dilapisi Polianilin

1. Serat kelapa yang telah diberikan perlakuan kimia kemudian dipotong 10 mm dan menggunakan 6 gram dari serat kelapa untuk proses preparasi seperti pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Penimbangan Serat Kelapa

2. Memasukkan serat ke dalam gelas bekker (1000 mL), lalu ditambahkan 336 mL larutan HCl (0,1 mol/L), stirer selama 10 menit. Selanjutnya, ditambahkan 336 mL larutan aniline (0,2 mol/L) ke dalam gelas bekker, stirer

selama 10 menit. Selanjutnya, tambahkan 336 mL larutan *Ammonium Persulfate* (0,1 mol/L) ke dalam gelas bekker, stirer selama 6 jam dengan suhu ruangan atau 25°C seperti pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Pencampuran Serat, HCl, Polianilin, dan Ammonium Persulfat

3. Setelah 6 jam, kemudian serat kelapa dicuci dengan larutan HCl. Selanjutnya, keringkan serat kelapa ke dalam oven selama 6 jam dengan suhu 45°C. Hasil dari proses preparasi dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Hasil Polimerisasi Serat Kelapa

3.5.3. Pembuatan Sampel Uji

1. Mencampurkan resin + pengeras dengan perbandingan 2:1 (60 gram resin : 30 gram pengeras) Seperti pada Gambar 3.10. Kemudian MWCNT dicampurkan ke dalam resin epoksi dengan menggunakan *mixer*.



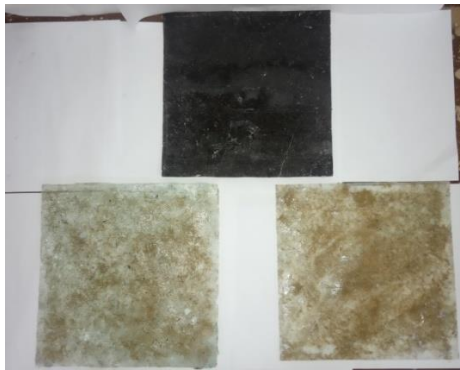
Gambar 3.10 Resin epoksi yang dicampurkan dengan MWCNT

2. Melumasi cetakan (kaca) dengan cairan PVA seperti pada Gambar 3.11 sebagai zat anti-perekat untuk mencegah menempelnya material komposit pada cetakan.



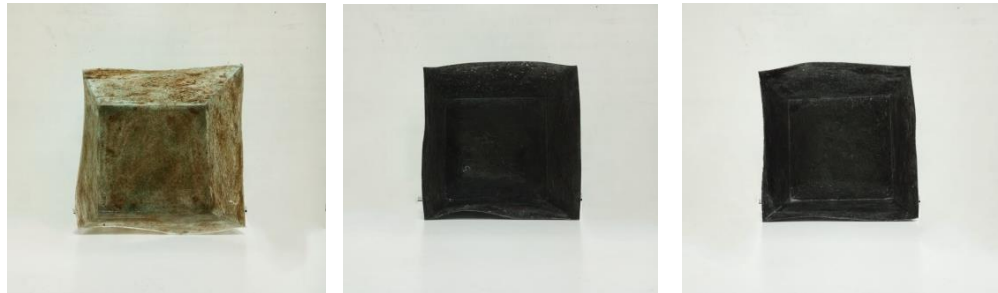
Gambar 3.11 Polyvinyl Alcohol (PVA)

3. Menaburi cetakan dengan serat kelapa menggunakan teknik *hand lay up*. Kemudian oleskan resin epoksi yang telah ditambah dengan *filler* MWCNT ke dalam cetakan secara merata. Lalu cetakan ditutup menggunakan kaca dan memberi pemberat di atasnya agar resin lebih merata. Dan didiamkan selama beberapa jam agar mengeras dan komposit dapat dilepaskan dari cetakan. Hasil cetakan komposit serat kelapa dapat dilihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Hasil Cetakan Komposit Serat Kelapa

4. Setelah komposit mengering dan dilepaskan dari cetakan, kotak uji dibuat dengan menggabungkan 5 lembar komposit dengan ukuran 30 x 30 x 30 cm. Gambar 3.13 menunjukkan hasil pembuatan 3 jenis kotak uji komposit serat kelapa.

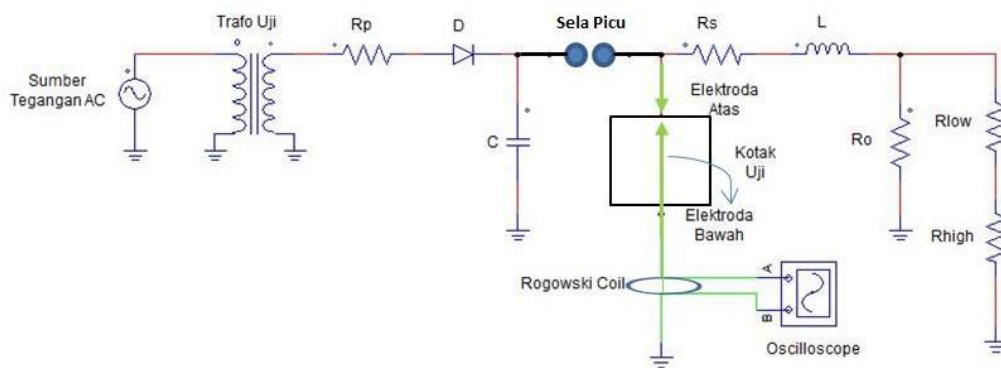


a) CF 5% b) CF-PANI 5%/CNT c) CF-PANI 10%/CNT

Gambar 3.13 Kotak Uji Komposit Serat Kelapa

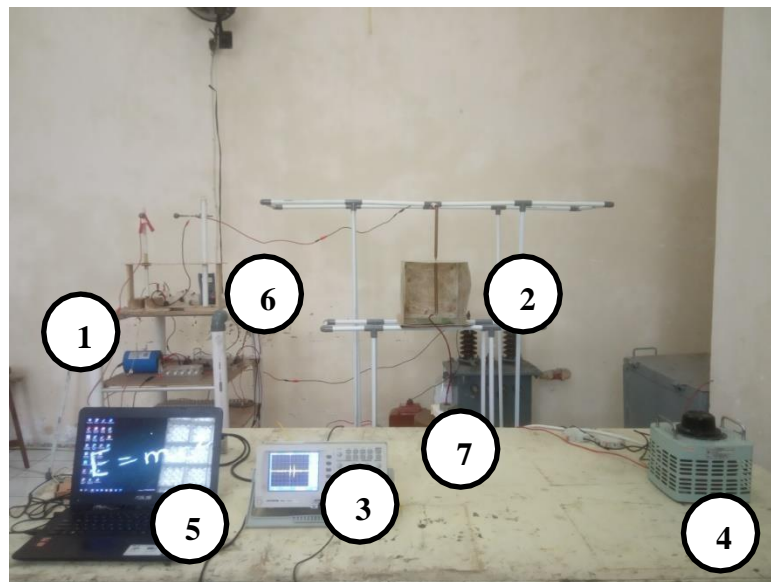
3.5.4. Pengujian Tegangan Tembus

Pembangkit tegangan impuls di laboratorium Teknik Tegangan Tinggi JTE Unila merupakan pembangkit *handmade* sehingga gelombang tegangan impuls petir yang dihasilkan belum memenuhi dengan standar IEC 600060-1 yaitu gelombang tegangan impuls dengan waktu muka (T_f) dan waktu ekor (T_r) sebesar $1,2 \pm 30\% \times 50 \pm 20\% \mu s$. Gambar 3.14 menunjukkan skema pengukuran tegangan tembus pada kotak komposit.



Gambar 3.14 Skema pengukuran tegangan tembus pada kotak komposit

Untuk mengukur tegangan tembus diperlukan 2 buah elektroda batang yang diletakkan di atas dan di dalam kotak uji. Elektroda bawah disejajarkan dengan elektroda atas dan celah antar elektroda dengan kotak komposit adalah 2 mm. Elektroda atas dihubungkan ke pembangkit tegangan tinggi, sedangkan elektroda bawah dihubungkan ke pentanahan. Gambar 3.15 menunjukkan suasana pada saat pengukuran tegangan tembus dan ditampilkan beberapa alat pendukung dalam pengambilan data.



Gambar 3.15 Suasana pengukuran tegangan tembus dengan kumparan Rogowski (keterangan 1. Rangkaian PTT Impuls, 2. Sampel Uji dan Elektroda Pengukuran, 3. Osiloskop, 4. Voltage Regulator, 5. Laptop, 6. Multimeter, dan 7. kumparan Rogowski)

Kumparan Rogowski ditempatkan pada kabel pentanahan yang terhubung dengan elektroda bawah. Ketika terjadi tembus, maka arus akan mengalir melalui kabel

pentanahan. Arus ini diukur dengan kumparan Rogowski dan ditampilkan dalam bentuk gelombang tegangan melalui osiloskop.

Prosedur pengukuran yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan kotak komposit yang akan digunakan dan penopang kotak komposit yang terbuat dari pipa PVC. Kemudian menyiapkan peralatan alat tulis dan laptop.
2. Meletakkan kotak komposit pada penopang dan mengatur jarak antar elektroda uji dengan kotak komposit berjarak 2 mm serta memasang kabel pentanahan pada elektroda bawah kotak komposit. Lalu, meletakkan kumparan Rogowski pada bagian kabel pentanahan elektroda bawah sebagai alat ukur tegangan tembus.
3. Menyiapkan rangkaian pengujian tegangan tembus.
4. Membangkitkan tegangan impuls dengan *setting* tegangan input pada 6 kV AC.
5. Mengukur tegangan tembus.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun Kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Kotak komposit yang dibuat dari serat yang dipolimerisasi dan resin yang diberi *filler* MWCNT yaitu CF-PANI 5%/CNT dan CF-PANI 10%/CNT menghasilkan tegangan tembus yang lebih besar dari kotak komposit CF5% tanpa polimerisasi. Hal ini karena konduktivitas pada kotak uji dengan persentase serat kelapa yang dipolimerisasi polianilin lebih besar daripada serat kelapa yang tanpa polimerisasi.
2. Tegangan tembus pada komposit CF-PANI 10%/CNT lebih besar daripada komposit CF-PANI 5%/CNT karena konduktivitas komposit CF-PANI 10%/CNT lebih besar akibat kandungan serat kelapa yang dipolimerisasi polimerisasi lebih banyak.
3. Nilai induktor yang digunakan pada rangkaian mempengaruhi nilai tegangan tembus yang dihasilkan. Semakin tinggi nilai induktor, menghasilkan nilai tegangan tembus yang cenderung lebih tinggi pada kotak uji. Hal ini terlihat pada kotak uji CF-PANI 10%/CNT.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Pengukuran sebaiknya dilakukan pada kelembaban dan suhu ruangan yang sama.
2. Pengujian tegangan tinggi impuls menggunakan tegangan impuls petir standar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pujiati, Retno. 2017. Analisa Teknis Bahan Komposit Dari Serat Alami Ampas Tebu Untuk Bahan Alternatif Pembuatan Kulit Kapal [Skripsi]. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- [2] Zebua, Rahmat. 2015. Preparasi dan Karakterisasi Komposit Resin Dgeba (Diglycidyl Ether of Bisphenol A) secara In-situ dengan Pengisi Seat Sabut Kelapa [Tesis]. Universitas Sumatera Utara. Medan.
- [3] Aminur dkk., “Komposit Partikel Kayu Jati Matriks Resin Poliester Untuk Bahan Akustik”, *SN2TIR Program Pendidikan Vokasi Universitas Halu Oleo*, 2019.
- [4] Muhajir, M. dkk, “Analisis Kekuatan Tarik Bahan Komposit Matriks Resin Berpenguat Serat Alam Dengan Berbagai Varian Tata Letak”, *Jurnal Teknik Mesin*, no. 2, 2016.
- [5] Prasetya, H W. dkk, “Material Komposit Laminasi Serat Karbon-Nylon Dengan *Additive Aluminium Powder* Untuk Body Lori”, *Jurnal Penelitian Sekolah Tinggi Transportasi Darat*, vol. 13, no. 2, pp. 30-37, 2022, doi:10.55511/jpsttd.v13i2.640.
- [6] Reynaldi, I Z. dkk, “Analisis Kekuatan Tarik Dan *Bending* Dari Komposit Serat Pelepah Pisang Menggunakan Metode *Hand Lay Up* Dengan Variasi Perbandingan Berat”, *Teknika STTKD : Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, vol. 8, no. 1, pp. 152-159, 2022, doi:10.56521/teknika.v8il.600.
- [7] Kelkar, Ajit D. dkk, “Effect of Electrospun Fibers On The Interlaminar Properties Of Woven Composites”, *Advanced Materials Research*, vol. 47- 50, pp. 1031-1034, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.47-50.1031.
- [8] Alshetiwi, Dawood. dkk, “Adaptation of Relined Fiber Post Using Discontinuous Shot Fiber-Reinforced Resin Composit to Restore Weakened Endodontically-Treated Premolars”, *European Journal of General Dentistry*, vol. 12, no. 5, 2023, doi:10.1055/s-0043-57245.

- [9] Razan, Dwi. dkk, “Komposit Sandwich Hybrid Kombinasi Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Dan Serat Kaca Dengan Matrix Polyurethane”, *Jurnal Penelitian dan Karya Ilmiah Lembaga Penelitian Universitas Trisakti*, vol. 5, no. 2, 2020, doi:10.25105/pdk.v5i2.7360.
- [10] Pecas, P. dkk, “Natural Fiber Composites and Their Applications : A Review”, *Journal of Composites Science*, vol. 2, no. 66, 2018, doi:10..3390/jcs2040066.
- [11] Hastuti, S., Budiono, H. S., Ivadiyanto, D. I., Nahar, M. N. (2021). Peningkatan Sifat Mekanik Komposit Serat Alam Limbah Sabut Kelapa (Cocofiber) yang Biodegradable. *Reka Buana : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, 6(1), 30-37. doi:https://doi.org/10.33366/rekabuana.v6i1.2257.
- [12] A. Setiawan, D. Rahmalina, “Pengembangan Komposit Polimer Epoxy Berpenguat Serat Bambu Dan Serat kelapa Untuk Aplikasi Running Boards”, *TEKNOBIZ*, vol. 5, no. 1, 2015.
- [13] Titani, Fena R. dkk, “Pemanfaatan Serat Sabut Kelapa Sebagai Material Penguat Pengganti Fiberglass Pada Komposit Resin Polyester Untuk Aplikasi Bahan Konstruksi Pesawat Terbang”, *Techno*, vol. 19, no. 1, pp. 023-028, 2018, doi: 10.30595/techno.v19i1.2397.
- [14] Husman. dkk, “Pengaruh Panjang Serat dan Fraksi Volume Komposit Lidah Mertua Terhadap Pengujian Tarik”, *Manutech : Jurnal Teknologi Manufaktur*, vol. 15, no. 02, 2023, doi:10.33504/manutech.v15i02.281.
- [15] Gustinenda, Beta Y. 2017. Sintesis Superabsorben Aerogel Selulosa Berbasis Sabut Kelapa [Skripsi]. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- [16] F. P. Nurani., “Penambahan Pektin, Gula, dan, Asam Sitrat Dalam Pembuatan Selai dan Marmalade Buah-buahan”, *Journal of Food Technology and Agroindustry*, vol. 2, no. 1, 2020.
- [17] Nasution, Polaris., dkk., “Karakteristik Fisik Komposit Sabut Kelapa Sebagai Insulator Palka Ikan”, *Berkala Perikanan Terubuk*, vol. 42, no. 2, 2014.

- [18] Al'farisi, Cory D. dkk, "Pembuatan Komposit dari Serat Sabut Kelapa dan Resin Polyester sebagai Material untuk Helm", *Journal of Bioprocess Chemical and Environmental Engineering Science*, vol.4, no. 2, pp. 57-64, 2023.
- [19] Mardiyati, "Komposit Polimer Sebagai Material Tahan Balistik", *Jurnal Inovasi Pertahanan dan Keamanan*, vol. 1, no. 1, pp. 20-28, 2018, doi:10.5614/jipk.2018.1.1.3.
- [20] Saputra, Reynaldi. dkk, "Analisis Sifat Mekanis dan Sifat Fisis pada Komposit Serat Sabut Kelapa Serat Bambu Matriks Epoxy sebagai Material Bumper Mobil", *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 17, no. 1, pp. 37-48, 2022, doi:10.32497/jrm.v17i1.3014.
- [21] Mahyoedin, Yovial. dkk, "Karakteristik Reologi Komposit Serbuk Cangkang Kemiri dan Poliuretan", *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, vol. 4, no. 1, 2019, doi:10.52447/jktm.v4i1.1466
- [22] Sulardjaka, Nugroho, S., Wacono, D. D., "Pengaruh Persentase Berat Serbuk SiC Terhadap Kekerasan dan Kekuatan *Bending* Komposit dengan Matriks AlSiTiB yang Diperkuat Serbuk SiC", *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 17. no. 3, pp. 156-161, 2015, doi: 10.14710/rotasi.17.3.156-161.
- [23] Dwi Rahmalina, Bondan T., Sofyan, Bambang Suharno, Eddy S. Siradj, *Pengaruh Fraksi Volume Penguat Silikon Karbida terhadap Karakteristik Balistik Komposit Matriks Aluminium*, *Majalah Pengkajian Industri*, vol. 6, no. 1, April 2012, pp. 51-56.
- [24] Heager, A. *Conductive Polymers, The Nobel Prize in Chemistry*, 2000.
- [25] Sitorus, B., Suendo, V., Hidayat, F., "Sintesis Polimer Konduktif sebagai Bahan Baku Perangkat Penyimpanan Energi Listrik", *Jurnal ELKHA*, vol. 3, no. 1, 2011.
- [26] Saputra, Beringin. 2009. *Pengaruh Penambahan Polianilin Terhadap Karakteristik Komposit Epoxy Resin/Grafit Sintesis dan Carbon Black Sebagai Material Pelat Bipolar Untuk Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell [Skripsi]*. Universitas Indonesia. Depok.

- [27] C. Merlini., dkk., “Polyaniline-coated Coconut Fibers : Structure, Properties and Their Use as Conductive Additives in Matrix of Polyurethane Derived from Castrol Oil,” *Polymer Testing*, vol. 38, pp. 18-25, 2014, doi: 10.1016/j.polymertesting.2014.06.005.
- [28] Pramono, A., Zulfia, A., “Konduktivitas Listrik Komposit Polimer Polipropilena/Karbon untuk Aplikasi Pelat Bipolar Fuel Cell”, *SETRUM*, vol. 1, no. 1, 2012, doi:10.36055/setrum.v1i1.446.
- [29] D. Abdullah., dkk., “Peningkatan Sifat Mekanik Polimer Epoksi Akibat Penambahan Multi-Wall Carbon Nanotube (MWCNT) dengan Fraksi Berat 5% Melalui Metode Dispersi Ultrasonik”, *Proceeding Seminar Tahunan Teknik Mesin XI (SNTTM XI) & Thermofluid IV UGM*, 2012.
- [30] Alemour B, Bradan O, Hassan MR (2019) A Review of Using Conductive Composite Materials in Solving Lightning Strike and Ice Accumulation Problems in Aviation. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 11:e1919. <https://doi.org/10.5028/jatm.v11.1022>.
- [31] L. Dong-Kwan., dkk., “Electrical and Thermal Properties of Carbon Nanotube Polymer Composites with Various Aspect Ratios”, *Materials 2022*, 15, 1356, doi:10.3390/ma15041356.
- [32] A. A. Kareem, H. K. Rasheed, “Electrical and Thermal Characteristics of MWCNTs Modified Carbon Fiber/Epoxy Composite Films,” *Sciendo*, vol. 37, no. 4, 2019, doi: 10.2478/msp-2019-0081.
- [33] Sulardjaka, Nugroho, S., Ismail, R., “Peningkatan Kekuatan Sifat Mekanis Komposit Serat Alam menggunakan Serat Eceng Gondok (Tinjauan Pustaka)”, *TEKNIK*, vol. 41, no. 1, pp. 27-39, 2020, doi:10.14710/teknik.v41i1.23473.
- [34] Krajewski, Dariusz., dkk., “Methods for Enhancing the Electrical Properties of Epoxy Matrix Composites”, *Energies*, vol. 15, no. 13, pp. 4562, 2022, doi:10.3390/en15134562.
- [35] I. Mawardi, A. Rizal, “Kajian Perlakuan Serat kelapa Terhadap Sifat Mekanis Komposit Epoksi Serat kelapa”, *Jurnal Polimesin*, vol. 15, no. 1, 2017.

- [36] Rindrawan, Felicitas F. 2016. Karakteristik Kekuatan Komposit Serabut Kelapa Dengan Variasi Arah Serat [Skripsi]. Universitas Sanata Dharma. Yogyakarta.
- [37] K. Diharjo, “Pengaruh Perlakuan Alkali Terhadap Sifat Tarik Bahan Komposit Serat Rami-Polyester”, *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 8-13, 2006.
- [38] S. Habibie, dkk, “Serat Alam Sebagai Bahan Komposit Ramah Lingkungan, Suatu Kajian”, *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 2, no. 2, 2021.
- [39] G. E. Nugroho. 2017. Karakteristik Komposit Berpenguat Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan NaOH Dengan Fraksi Volume 4%, 6%, dan 8% [Skripsi]. Universitas Sanata Dharma. Yogyakarta.
- [40] P. Khamwongsa, dkk, “Significant Enhancement of Electrical Conductivity of Conductive Cellulose Derived from Bamboo and Polypyrrole”, *Electric Power Systems Research*, vol. 9, no. 34, pp. 100314, 2022, doi:10.1016/j.jcomc.2022.100314.
- [41] Widyawati. 2022. Pembuatan Komposit Pelindung Interferens Elektromagnetik Dengan Penggunaan Bahan Komposit Serat Alam Berbasis Polimer Konduktif [Skripsi]. Universitas Lampung. Lampung.
- [42] C. Merlini, G. M. O. Barra, M. D. P. P. da Cunha, S. D. A. S. Ramoa, B. G. Soares, A. Pegoretti, “Electrically Conductive Composites of Polyurethane Derived From Castor Oil With Polypyrrole-Coated Peach Palm Fibers”, *Polymer Composites*, vol. 38, no. 10, 2015, doi:10.1002/pc.23790.
- [43] R. Sridhar, R. Karthikeyan, S. Solaiachari, R. Suresh, “Appraising The Microstructure and Electrical Conductivity Characteristics of *Polyaniline*-coated Natural Fiber Composites”, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, doi:10.1007/s13399-024-05519-z.
- [44] Alkhteeb, Sultan A., dkk, “Artificial Lightning Tetst on Metal and CRFP Automotive Bodies: A Comparative Study”, *SAE International Journal of Transportation Safety*, vol. 7, no. 1, 2019, doi: 10.4271/09-07-01-0001.

- [45] Evans S, Revel I, Cole M, “Lightning Strike Protection of Aircraft Structural Joints”, *International Conference on Lightning Protection*, 2014.
- [46] Yamamoto K, Takahashi N, Naito Y, Yanagawa S, Matsui M, “Accident of Automobile Due to Lightning”, *International Conference on Lightning Protection*, 2014.
- [47] Yanagawa S, Yamamoto K, Naito Y, Takahashi N, Matsui M, “Investigation of Lightning Accidents on Automobiles”, *Electric Power Systems Research* 139, 2016.
- [48] Siregar, Arizona X. 2009. Proteksi Pesawat Terbang Boeing 737-200 Terhadap Sambaran Petir [Skripsi]. Universitas Sumatera Utara. Medan.
- [49] Khoirudin, Mukhlis. 2020. Sistem Keamanan Pesawat Terbang Terhadap Listrik Statis dan Sambaran Petir [Skripsi]. Universitas Muhammadiyah Surakarta. Surakarta.
- [50] Naito Y, Yanagawa S, Yamamoto K, “High Voltage Impulse Experiment on Electric Automobiles and its Verification”, *International Conference on Lightning Protection*, 2014.
- [51] B. L. Tobing. 2003. Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi. PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- [52] M. H. Samimi, A. Mahari, M. A. Farahnakian, H. Mohseni, “The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review”, *IEEE Sensors Journal.*, vol. 15, no. 2, pp. 651-658, 2014, doi:10.1109/JSEN.2014.2362940.
- [53] Chucheng Xiao, Lingyin Zhao, T. Asada, W. G. Odendaal, J. D. van Wyk, “An Overview of Integratable Current Sensor Technologies”, *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of The Industry Applications Conference*, 2003., vol. 2, pp. 1251-1258.
- [54] I. A. Metwally, “Self-Integrating Rogowski Coil for High-Impulse Current Measurement”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 2, pp. 353-360, 2010, doi:10.1109/TIM.2009.2023821.

- [55] B. Anto, A. Saputra, "Transduser Arus Bolak-Balik Menggunakan Kumparan Rogowski", *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi dan Industri (SNTIKI)*, ISSN : 2085-9902, 2012.
- [56] Nanyan, Ayob N., dkk, "The Rogowski Coil Sensor in High Current Application : A Review", *IOP Publishing*, vol. 318, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/318/012054.
- [57] M. Liu, "Lightning Impulse Current Sensor" July 18, 2022, Publisher by Shandong YUANXING Electronics. www.yuanxing.net.