



UNIVERSITAS INDONESIA

STUDI PENGARUH FRAKSI VOLUME PENGUAT
NANO TEMBAGA (Cu NANO) TERHADAP SIFAT MEKANIS
DAN KONDUKTIVITAS LISTRIK PELAT BIPOLAR
BERBASIS *HYBRID* NANO KOMPOSIT PP/C-CNT-Cu NANO

SKRIPSI

SUTONI
0706268915

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
DESEMBER 2010



UNIVERSITAS INDONESIA

STUDI PENGARUH FRAKSI VOLUME PENGUAT
NANO TEMBAGA (Cu NANO) TERHADAP SIFAT MEKANIS
DAN KONDUKTIVITAS LISTRIK PELAT BIPOLAR
BERBASIS *HYBRID* NANO KOMPOSIT PP/C-CNT-Cu NANO

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

SUTONI
0706268915

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
DESEMBER 2010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.



Nama : Sutoni
NPM : 0706268915
Tanda Tangan :
Tanggal : 16 Desember 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Sutoni
NPM : 0706268915
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi :

**Studi Pengaruh Fraksi Volume Penguat Nano Tembaga (Cu Nano)
Terhadap Sifat Mekanis dan Konduktivitas Listrik
Pelat Bipolar Berbasis *Hybrid* Nano Komposit PP/C-CNT-Cu Nano**

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof.Dr.Ir.Anne Zulfia,M.Sc. (.....)

Penguji 1 : Dr.Ir.Akhmad Herman Yuwono,M.Phil.Eng. (.....)

Penguji 2 : Nofrijon,Ph.D. (.....)

Penguji 3 : Dr.Ir.Verina J.Wargadalam,M.T. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 16 Desember 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena atas berkah dan rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, mulai dari masa perkuliahan sampai dengan penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof.Dr.Ir. Anne Zulfia Syahrial,M.Sc., selaku dosen pembimbing yang telah banyak menyediakan waktu, tenaga dan pemikiran dalam mengarahkan saya dalam melakukan penelitian dan penulisan skripsi ini;
2. Dr.Ir. Verina J. Wargadalam,M.T. dari Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan (P3TKEBT) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) yang telah memberikan dukungan material dan dana untuk penelitian ini;
3. Seluruh staf P3TKEBT Kementerian ESDM, *Pertamina Research and Technical Services*, Sentra Teknologi Polimer (STP), Pusat Penelitian Metalurgi LIPI, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dan Pusat Penelitian Fisika LIPI yang membantu dalam pemrosesan dan pengujian material untuk kelancaran penelitian ini;
4. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan dukungan material dan moral; dan
5. Abi Gibran, sahabat dan rekan seperjuangan dalam melaksanakan penelitian ini.

Akhir kata, saya berharap Allah Subhanahu Wa Ta'ala berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian dan penulisan skripsi ini. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi

Depok, 16 Desember 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Sutoni
NPM : 0706268915
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Studi Pengaruh Fraksi Volume Penguat Nano Tembaga (Cu Nano)
Terhadap Sifat Mekanis dan Konduktivitas Listrik
Pelat Bipolar Berbasis *Hybrid* Nano Komposit PP/C-CNT-Cu Nano**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 16 Desember 2010

Yang menyatakan,

(Sutoni)

ABSTRAK

Nama : Sutoni
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul :

**Studi Pengaruh Fraksi Volume Penguat Nano Tembaga (Cu Nano)
Terhadap Sifat Mekanis dan Konduktivitas Listrik
Pelat Bipolar Berbasis *Hybrid* Nano Komposit PP/C-CNT-Cu Nano**

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh fraksi volume penguat nano tembaga (Cu nano) terhadap konduktivitas listrik dan sifat mekanis pelat bipolar berbasis *hybrid* nano komposit PP/C-CNT-Cu Nano. Penguat nano tembaga ditambahkan dalam tiga variasi formula sebesar 0.5%wt, 1.0%wt, dan 2.0%wt. Karakterisasi sampel meliputi pengujian konduktivitas listrik, kekuatan tarik, kekuatan tekuk, densitas, porositas, dan karakteristik patahan tekuk dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Dari hasil pengujian tersebut, didapatkan bahwa sifat mekanis dan konduktivitas listrik pelat bipolar akan semakin menurun dengan penambahan penguat nano tembaga. Konduktivitas listrik dan sifat mekanis terbaik terdapat pada formula dengan persentase penguat nano tembaga sebesar 0.5 %wt.

Kata kunci:

fuel cell, pelat bipolar, *hybrid* nano komposit, nano tembaga, sifat mekanis, konduktivitas listrik

ABSTRACT

Name : Sutoni
Study Program : Metallurgy and Material Science Engineering
Title :

Study of Influences of Addition of Volume Fraction of Nano Copper Reinforcement to Mechanical Properties and Electrical Conductivity of Bipolar Plate Based of Hybrid Nano Composite PP/C-CNT-Cu Nano

The objective of this research is to understand the influences of volume fraction of nano copper to the electrical conductivity properties and the mechanical properties of bipolar plate based of hybrid nano composite PP/C-CNT-Cu Nano. Nano copper reinforcement is added to three different formulas which are 0,5wt%; 1,0wt%; and 2,0wt%. The material characterizations including electrical conductivity testing, tensile testing, flexural testing, density testing, porosity testing and characterization of morfologi of flexural fracture using Scanning Electron Microscope (SEM). The result testings show that increasing the volume fraction of nano copper causes decreasing of the mechanical properties and the electrical conductivity properties of bipolar plate. The highest electrical conductivity and mechanical properties is the second formula which is added 0,5 wt% of nano copper reinforcement

Key words:

fuel cell, bipolar plate, hybrid nano composit, nano copper, mechanical properties, electrical conductivity

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
DAFTAR SINGKATAN	xv
DAFTAR SIMBOL.....	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Hipotesis	4
1.5. Ruang Lingkup Penelitian	5
1.6. Sistematika Penulisan	6
BAB 2 LANDASAN TEORI	7
2.1. <i>Fuel Cell</i>	7
2.1.1. <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)</i>	10
2.1.1.1. Teknologi PEMFC.....	10
2.1.1.2. Struktur PEMFC	12
2.1.2. Pelat Bipolar	13
2.1.2.1. Fungsi Pelat Bipolar.....	14
2.1.2.2. Material Pelat Bipolar	15
2.1.2.3. Pelat Bipolar Komposit Polimer-Karbon.....	16
2.2. Material Komposit	17
2.2.1. Komposit Bermatriks Polimer	20
2.2.2. Polimer.....	21
2.3. Polipropilena (PP).....	22
2.3.1. Struktur PP.....	23
2.3.2. Sifat PP	26
2.3.3. Kristalisasi dan Nukleasi	26
2.4. <i>Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride (PP-g-MA)</i>	28
2.5. Anti-oksidan.....	31
2.6. Serat Karbon	33

2.7. Grafit	33
2.8. <i>Carbon Nano Tube</i> (CNT)	34
2.9. Nano Tembaga (Cu Nano)	38

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN 39

3.1. Diagram Alir Penelitian	39
3.1.1. Diagram Alir Preparasi dan Fabrikasi Sampel	39
3.1.2. Diagram Alir Pengujian	40
3.2. Komposisi Bahan	40
3.3. Peralatan dan Bahan	41
3.3.1. Peralatan	41
3.3.1.1. Peralatan Preparasi Sampel	41
3.3.1.2. Peralatan Karakterisasi Sampel	45
3.3.2. Bahan	46
3.3.2.1. Polipropilena (PP)	46
3.3.2.2. <i>Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride</i>	47
3.3.2.3. Anti-Oksidan CN-CAT B215	48
3.3.2.4. Serat Karbon Fortafil 243	48
3.3.2.5. Grafit 4012	49
3.3.2.6. CNT (<i>Carbon Nano Tube</i>)	49
3.3.2.7. Nano Tembaga (Cu Nano)	49
3.4. Prosedur Penelitian	50
3.4.1. Pengujian XRF (<i>X-Ray Fluorescence</i>) Cu Nano	50
3.4.2. Pengujian Awal Konduktivitas Listrik Bahan	50
3.4.2.1. Kompaksi Spesimen Uji	50
3.4.2.2. Pengujian Konduktivitas Bahan dengan LCR Meter	51
3.4.2.3. Pengujian Konduktivitas Listrik Bahan dengan <i>Four Point Probe</i>	53
3.4.3. Penimbangan Bahan	54
3.4.4. Pencampuran Kering (<i>Dry Mixing</i>)	55
3.4.5. Pencampuran Panas (<i>Hot Blending</i>)	56
3.4.6. Penghalusan (<i>Crushing</i>)	60
3.4.7. Pencetakan Panas (<i>Hot Pressing</i>)	61
3.4.8. Pengujian Tarik dan Tekuk	64
3.4.8.1. Preparasi Spesimen Uji Tarik	64
3.4.8.2. Preparasi Spesimen Uji Tekuk	65
3.4.8.3. <i>Conditioning</i> Spesimen Uji Tarik dan Tekuk	65
3.4.8.4. Pengujian Tarik (<i>Tensile Test</i>)	65
3.4.8.5. Pengujian Tekuk (<i>Flexural Test</i>)	66
3.4.9. Pengujian Densitas dan Porositas	68
3.4.10. Pengujian Konduktivitas Listrik Sampel dengan metode <i>Four Point Probe</i>	69
3.4.11. Karakterisasi Morfologi Patahan Tekuk SEM & EDS	70

BAB 4 HASIL PENELITIAN 73

4.1. Hasil Pengujian XRF Serbuk Nano Tembaga	73
4.2. Hasil Pengujian Awal Nilai Konduktivitas Listrik Bahan	75

4.3.	Hasil Proses Pencampuran Panas (<i>Hot Blending</i>)	76
4.4.	Hasil Proses <i>Crushing</i>	77
4.5.	Hasil Proses Pencetakan Panas (<i>Hot Pressing</i>)	77
4.6.	Hasil Pengujian Tarik dan Pengujian Tekuk	77
4.6.1.	Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Tarik	78
4.6.2.	Hasil Pengujian Tarik Pelat Bipolar.....	79
4.6.3.	Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Tekuk.....	79
4.6.4.	Hasil Pengujian Tekuk Pelat Bipolar	80
4.7.	Hasil Pengujian Densitas dan Porositas	80
4.7.1.	Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Densitas dan Porositas.....	81
4.7.2.	Hasil Pengujian Densitas Pelat Bipolar.....	81
4.7.3.	Hasil Pengujian Porositas Pelat Bipolar.....	81
4.8.	Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar.....	82
4.9.	Hasil Pengamatan Morfologi Patahan Tekuk Pelat Bipolar dengan SEM dan Pengujian EDS	82
4.9.1.	Hasil Pengamatan Morfologi Patahan Dengan SEM.....	82
4.9.2.	Hasil Pengujian EDS Pelat Bipolar.....	85
BAB 5	PEMBAHASAN	89
5.1.	Analisis Pengaruh Penambahan Nano Tembaga Terhadap Hasil Pengujian Tarik Pelat Bipolar.....	89
5.2.	Analisis Pengaruh Penambahan Nano Tembaga Terhadap Hasil Pengujian Tekuk Pelat	93
5.3.	Analisis Pengaruh Penambahan Nano Tembaga Terhadap Nilai Densitas Pelat Bipolar	95
5.4.	Analisis Pengaruh Penambahan Nano Tembaga Terhadap Nilai Porositas Pelat Bipolar.....	98
5.5.	Analisis Pengaruh Penambahan Nano Tembaga Terhadap Nilai Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar.....	99
5.6.	Analisis Karakteristik Morfologi Patahan Tekuk Pelat Bipolar Dengan SEM.....	101
BAB 6	KESIMPULAN	106
DAFTAR PUSTAKA	107

DAFTAR TABEL

	Halaman
Table 2.1. Rangkuman perbandingan jenis-jenis <i>fuel cell</i>	9
Tabel 2.2. Komponen-komponen Utama PEMFC	12
Tabel 2.3. Sifat Material yang Dibutuhkan untuk Pelat Bipolar Ideal.....	15
Tabel 2.4. Sifat-sifat material untuk pelat bipolar PEMFC.....	16
Tabel 2.5. Sifat-sifat <i>Maleic Anhidride</i>	29
Tabel 2.6. Perbandingan Sifat Serat Karbon Berdasar Bahan Dasarnya	33
Tabel 2.7. Sifat-sifat Umum Grafit	34
Tabel 2.8. Perbandingan sifat mekanis dari CNT dengan material lain.....	36
Tabel 2.9. Perbandingan konduktivitas termal dan listrik CNT dengan material lain	37
Tabel 3.1. Komposisi dan Pengkodean Formulasi Bahan.....	41
Tabel 3.2. Peralatan Preparasi Sampel Pengujian	41
Tabel 3.3. Peralatan Karakterisasi Sampel	45
Tabel 3.4. Spesifikasi <i>Cosmoplene Polypropylene Block Copolymer</i> Grade AH561	46
Tabel 3.5. Spesifikasi <i>Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride</i>	47
Tabel 3.6. Spesifikasi Anti-Oksidan CN-CAT B215	48
Tabel 3.7. Spesifikasi dari <i>Chopped Carbon Fiber Fortafil 243</i>	48
Tabel 3.8. Spesifikasi <i>Carbon Nano Tube (CNT)</i>	49
Tabel 3.9. Spesifikasi Nano Tembaga (Cu Nano).....	49
Tabel 3.10. Parameter proses pencetakan panas (<i>hot pressing</i>)	62
Tabel 3.11. Parameter proses pengondisian spesimen uji tarik & tekuk.....	65
Tabel 3.12. Parameter Proses Pengujian Tarik	66
Tabel 4.1. Hasil Pengujian XRF Serbuk Nanotembaga	73
Tabel 4.2. Hasil Uji Konduktivitas Listrik Bahan dengan LCR Meter.....	74
Tabel 4.3. Hasil Uji Konduktivitas Listrik Grafit dengan metode <i>Four Point Probe</i>	75
Tabel 4.4. Hasil Uji Konduktivitas Listrik Nano Tembaga dengan metode <i>Four Point Probe</i>	75
Tabel 4.5. Hasil Pengujian Tarik Pelat Bipolar.....	79
Tabel 4.6. Hasil Pengujian Tekuk Pelat Bipolar	80
Tabel 4.7. Hasil Pengujian Densitas Pelat Bipolar.....	81
Tabel 4.8. Hasil Pengujian Porositas Pelat Bipolar.....	81
Tabel 4.9. Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar metode <i>Resistivity</i>	82
Tabel 5.1. Nilai Densitas Prediksi Pelat Bipolar	97
Table 5.2. Konduktivitas Listrik Nano Tembaga.....	100

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. <i>Basic Fuel Cell Operation</i>	10
Gambar 2.2. Struktur Rangkaian PEMFC.....	12
Gambar 2.3. Pelat bipolar dengan saluran air.....	13
Gambar 2.4. Letak pelat bipolar (<i>field flow plate</i>) pada PEMFC.....	15
Gambar 2.5. Komposit berdasarkan jenis penguat.....	18
Gambar 2.6. Jenis-jenis interfacial bonding.	20
Gambar 2.7. Polimerisasi propilena menjadipolipropilena	22
Gambar 2.8. Jenis PP berdasarkan bahan yang digunakan	24
Gambar 2.9. Isotaktik	25
Gambar 2.10. Sindiotaktik.....	25
Gambar 2.11. Ataktik	25
Gambar 2.12. Isomerisme geometrical PP	26
Gambar 2.13. Struktur <i>spherulite</i> yang tersusun dari fasa kristalin berlapis (<i>lamellar</i>)	28
Gambar 2.14. PP-g-MA tercangkok pada galeri <i>filler</i>	29
Gambar 2.15. Serbuk nano tembaga (Cu Nano).....	38
Gambar 3.1. Diagram alir preparasi dan fabrikasi sampel	39
Gambar 3.2. Diagram alir proses pengujian sampel.....	40
Gambar 3.3. Diagram Alat Uji Konduktivitas Dalam Bidang (<i>in-plane</i>) Sampel Berdasarkan Standar ASTM D-991.....	52
Gambar 3.4. Grafik Temperatur vs Waktu Proses Pencetakan Panas.....	62
Gambar 3.5. Grafik Tekanan vs Waktu Proses Pencetakan Panas.....	63
Gambar 3.6. Skematis Pengujian <i>Flexural</i>	67
Gambar 3.7. Sampel Pengujian <i>Flexural</i>	67
Gambar 3.8. Diagram alat <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	71
Gambar 4.1. Hasil Proses Pencampuran Panas (<i>Hot Blending</i>)	75
Gambar 4.2. Pellet atau Granula Hasil Proses <i>Crushing</i>	76
Gambar 4.3. Pelat Hasil Proses <i>Hot Pressing</i>	77
Gambar 4.4. Spesimen Pengujian Tarik Pelat Bipolar ASTM D3039	78
Gambar 4.5. Spesimen Pengujian Tekuk Pelat Bipolar ASTM D790	79
Gambar 4.6. Spesimen Pengujian Densitas dan Porositas Pelat Bipolar	80
Gambar 4.7. Spesimen Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar	82
Gambar 4.8. Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 1 Perbesaran 500x	83
Gambar 4.9. Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 2 Perbesaran 500x	83
Gambar 4.10. Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 3 Perbesaran 150x	83
Gambar 4.11. Pengamatan Cu Nano Pada F2 Perbesaran 20000x.....	84

Gambar 4.12.	Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 1 Perbesaran 500x	84
Gambar 4.13.	Morfologi Patahan Tekuk F3 Titik 2 Perbesaran 500x	84
Gambar 4.14.	Morfologi Patahan Tekuk F3 Titik 3 Perbesaran 250x	85
Gambar 4.15.	Pengamatan Cu Nano Pada F3 Perbesaran 20000x.....	85
Gambar 4.16.	Grafik EDS F2 Titik 1	86
Gambar 4.17.	Grafik EDS F2 Titik 2	86
Gambar 4.18.	Grafik EDS F2 Titik 3	87
Gambar 4.19.	Grafik EDS F3 Titik 1	87
Gambar 4.20.	Grafik EDS F3 Titik 2	88
Gambar 4.21.	Grafik EDS F3 Titik 3	88
Gambar 5.1.	Perbandingan Nilai Kekuatan Tarik Pelat Bipolar	89
Gambar 5.2.	SEM Micrograph (a) F2 perbesaran 100x (b) F3 perbesaran 150x	90
Gambar 5.3.	Gambaran Skematik dari Fenomena <i>Craze</i>	91
Gambar 5.4.	Grafik Perbandingan Nilai <i>Elongation at Break</i>	92
Gambar 5.5.	Patahan Pelat Bipolar Hasil Pengujian Tarik	92
Gambar 5.6.	Grafik Perbandingan Nilai Kekuatan Tekuk Pelat Bipolar	93
Gambar 5.7.	SEM Micrograph (a) F2 perbesaran 100x (b) F3 perbesaran 150x	94
Gambar 5.8.	Grafik Perbandingan Nilai Modulus Elastisitas	94
Gambar 5.9.	Patahan Pelat Bipolar Hasil Pengujian Tekuk	95
Gambar 5.10.	Grafik Perbandingan Nilai Densitas Aktual Pelat Bipolar	96
Gambar 5.11.	Perbandingan Densitas Prediksi dengan Densitas Aktual	97
Gambar 5.12.	Grafik Perbandingan Nilai Porositas Pelat Bipolar	98
Gambar 5.13.	Grafik Perbandingan Nilai Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar Metode <i>Four Point Probe</i>	99
Gambar 5.14.	SEM <i>Micrograph</i> F2 titik 1	101
Gambar 5.15.	SEM <i>Micrograph</i> F2 titik 2	102
Gambar 5.16.	SEM <i>Micrograph</i> F2 titik 3	102
Gambar 5.17.	SEM <i>Micrograph</i> Cu Nano pada F2 titik 1	103
Gambar 5.18.	SEM <i>Micrograph</i> F3 titik 1	103
Gambar 5.19.	SEM <i>Micrograph</i> F3 titik 2	104
Gambar 5.20.	SEM <i>Micrograph</i> F3 titik 3	104
Gambar 5.21.	SEM <i>Micrograph</i> Cu Nano pada F3 titik 1	105

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Formulasi Penelitian.....	113
Lampiran 2 Hasil Pengujian XRF Cu Nano.....	114
Lampiran 3 Hasil Pengujian Tarik dan Tekuk.....	115
Lampiran 4 Hasil Perhitungan Nilai Densitas.....	116
Lampiran 5 Hasil Perhitungan Nilai Porositas.....	117
Lampiran 6 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar dengan Metode <i>Four Point Probe</i>	118

DAFTAR SINGKATAN

C	<i>Carbon</i>
CNT	<i>Carbon Nano Tubes</i>
Cu	<i>Copper</i>
DOE	<i>Department of Energy</i>
DWCNT	<i>Double Wall Carbon Nano Tubes</i>
EDS	<i>Energy Dispersed Spectroscopy</i>
GDL	<i>Gas Diffusion Layer</i>
HDT	<i>Heat Deflection Temperature</i>
MEA	<i>Membrane Electrolyte Assembly</i>
MWCNT	<i>Multi Wall Carbon Nano Tubes</i>
PAN	<i>Polyacrylonitrile</i>
PEMFC	<i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i>
PP	<i>Polypropylene</i>
PP-g-MA	<i>Polypropilene Grafted-Maleated-Anhydride</i>
SEM	<i>Scanning Electrone Microscopy</i>
SWCNT	<i>Single Wall Carbon Nano Tubes</i>
TGA	<i>Thermal Gravitimetry Analyzer</i>

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
$wf\%$	Persen Berat	%
σ_c	Tegangan Tarik Komposit	N/m^2
σ_m	Tegangan Tarik Matriks	N/m^2
σ_f	Tegangan Tarik Penguat (Fiber)	N/m^2
V_m	Fraksi Volume Penguat Matriks	%
V_f	Fraksi Volume Penguat Fiber	%
E_c	Modulus Elastisitas Komposit	N/m^2
E_m	Modulus Elastisitas Matriks	N/m^2
E_f	Modulus Elastisitas Penguat Fiber	N/m^2
ρ_c	Densitas Komposit	$gram/cm^3$
ρ_m	Densitas Matriks	$gram/cm^3$
ρ_f	Densitas Penguat Fiber	$gram/cm^2$
σ	Konduktivitas	S/cm
G	Konduktansi	S
R	Resistivitas	$\Omega.cm$

ρ_{sampel}	Densitas Sampel	gram/cm ³
ρ_{air}	Densitas Air	gram/cm ³
M_u	Massa Sampel di Udara	gram
M_a	Massa Sampel di Air	gram



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi merupakan salah satu kebutuhan yang mutlak diperlukan. Kebutuhan dan permintaan energi semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dunia dan meningkatnya peradaban umat manusia. Berbagai sektor kehidupan terutama dalam bidang industri dan transportasi menuntut konsumsi energi dengan jumlah yang tidak sedikit. Hingga saat ini pemenuhan kebutuhan masyarakat akan energi masih bergantung pada energi yang berasal dari batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Persediaan sumber energi tersebut semakin menipis, karena semuanya tidak dapat diperbaharui. Bahkan diperkirakan pada tahun 2014 bahan bakar yang berasal dari fosil tersebut akan segera habis^[1]. Disamping itu pemanfaatan sumber energi fosil tersebut menghasilkan emisi gas yang dapat menyebabkan permasalahan lain pada lingkungan. Keadaan ini mendorong manusia untuk mencari sumber energi alternatif yang memiliki performa bagus dan ramah lingkungan, serta memiliki harga yang murah seperti halnya energi dari bahan baku fosil^[1,2]. Permasalahan yang masih sering muncul adalah biaya yang tinggi serta kemampuan sumber energi baru yang masih belum setara dengan sumber energi konvensional yang digunakan saat ini.

Salah satu sumber energi alternatif yang sedang dikembangkan saat ini adalah sel tunam (*fuel cell*). *Fuel cell* banyak diminati karena selain merupakan sumber energi strategis^[3], *fuel cell* juga tidak menghasilkan zat emisi yang membahayakan lingkungan. Sistem kerja *fuel cell* membutuhkan hidrogen (H_2) sebagai sumber energi yang akan diubah menjadi energi listrik dan panas serta air sebagai hasil reaksi. Menggunakan gas hidrogen sebagai sumber bahan bakarnya, residu yang dihasilkan hanyalah berupa uap air sehingga tidak mencemari udara. Gas hidrogen sendiri diperoleh dari berbagai cara yang mudah dan murah, salah satunya hanya dengan proses elektrolisis air^[4]. Proses konversi energi tersebut berlangsung melalui suatu reaksi elektrokimia.

Pelat bipolar atau *bipolar plate* adalah komponen dalam rangkaian *fuel cell* yang mempunyai peranan sangat penting. Pelat bipolar ini digunakan sebagai

penghubung elektrik antara dua elektroda dengan kutub yang berbeda. Pelat bipolar berfungsi untuk mendistribusikan gas ke membran, memindahkan air dari setiap sel, penghantar elektron dari anoda ke katoda, penghantar panas dari dan menuju elektroda mengalirkan produk akhir dalam bentuk air dari tiap sel, penghalang perpindahan gas antar sel, dan menjaga stabilitas struktur dari fuel cell itu sendiri. Pelat bipolar dibuat dari material yang memiliki konduktivitas listrik baik dan tidak dapat dilewati oleh gas^[5]. Pada awalnya pelat bipolar terbuat dari bahan konduktor tinggi seperti tembaga, *stainless steel*, grafit maupun aluminium^[6]. Pelat bipolar dengan bahan baku seperti itu memiliki banyak kekurangan, seperti pembuatannya yang relatif lama, sangat sulit, serta berat yang terlalu besar^[6,7]. *Stainless steel* merupakan logam yang tahan korosi dan cukup ringan, namun biaya produksi pelat akan meningkat jika menggunakan material ini. Berbagai penelitian terbaru telah dilakukan untuk membuat pelat bipolar yang murah, ringan, dan berdaya guna, sehingga dapat menggantikan pelat grafit yang harganya masih mahal^[6]. Saat ini, komposit bermatriks polimer sudah banyak diteliti untuk digunakan sebagai material pelat bipolar karena komposit polimer-karbon lebih murah dan lebih ringan bila dibandingkan material seperti baja, aluminium, dan grafit^[6]. Kemampuan proses juga menjadi sebuah persoalan yang penting untuk produksi massal pelat bipolar.

Polymer electrolyte membrane fuel cell atau PEMFC merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang sedang dikembangkan saat ini. PEMFC banyak diminati karena memiliki kerapatan densitas yang tinggi, temperature operasi yang relatif rendah, suplai bahan bakar mudah didapat, dan umur pakai yang lama^[8]. Aplikasi PEMFC mencakup pada peralatan elektronik *portable*, stasioner, dan aplikasi pada kendaraan bermotor^[9]. Namun, kelemahan dari PEMFC disebabkan dari sifat alami polimer yaitu tidak tahan temperatur tinggi, mudah terdegradasi dan sifat konduktivitas listrik yang buruk.

Komponen kunci dari suatu PEMFC adalah elektrolit, lapisan katalis, lapisan difusi gas, dan pelat bipolar^[10,11]. Bagian paling penting dalam PEMFC adalah pelat bipolar yang berfungsi sebagai pemisah gas-gas yang terdapat di dalam sel, mengalirkan arus listrik, dan juga berperan sebagai penyokong struktur dari sel^[8,10]. Pelat bipolar sebagai komponen terpenting pada PEMFC

menyumbang 80% total berat PEMFC^[3,8]. Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa 38% total biaya PEMFC adalah biaya pembuatan pelat bipolar, diikuti oleh biaya elektroda, membrane, dan katalis sebesar 32, 12, dan 11%^[3,8].

Pelat bipolar disyaratkan memiliki konduktivitas listrik yang tinggi ($>100 \text{ S cm}^{-1}$), kekuatan tekuk yang baik ($>25\text{MPa}$), ketahanan impak yang baik ($>25\text{MPa}$), kekuatan tarik yang tinggi ($>41\text{MPa}$), stabilitas kimia dan ketahanan korosi dibawah kondisi operasi PEMFC ($<10^{-6} \text{ Acm}^{-2}$), konduktivitas termal yang tinggi ($>10\text{Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$), permeabilitas yang rendah terhadap hidrogen ($<2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 (\text{cm}^2 \text{ s})^{-1}$), pemuaian panas yang kecil, efisiensi proses yang baik, ringan terutama untuk keperluan transportasi, dan tentunya ekonomis^[9,10]. Dengan demikian, selain pemilihan material yang sesuai juga diperlukan suatu metode yang tepat dalam fabrikasi pelat bipolar untuk mereduksi ukuran, bobot, dan biaya produksi. Kedepannya diharapkan PEMFC dapat diproduksi dalam jumlah massal, tentunya dengan harga ekonomis dan performa yang handal^[6].

1.2. Perumusan Masalah

Konsentrasi dalam pengembangan PEMFC yang ekonomis dan performa bagus adalah pada pemilihan material pelat bipolar dan proses fabrikasinya. Salah satu fokus dalam mereduksi biaya fabrikasi pelat bipolar PEMFC adalah pengembangan material komposit berbasis matriks termoplastik. Komposit bermatriks polimer dipilih dengan pertimbangan material ini ringan, mudah dibentuk, dan memiliki machinability yang baik. Kendala terbesar dalam pemilihan komposit ini adalah konduktivitas listrik dari termoplastik yang buruk. Dalam penelitian ini digunakan polipropilen (PP) sebagai material termoplastik.

Komposit dari karbon-polimer adalah alternatif yang tepat untuk digunakan sebagai bahan pembuat pelat bipolar dengan beberapa alasan diantaranya biaya murah, mudah dalam permesinan dan pencetakan, ketahanan korosi yang baik, dan ringan^[8]. Dengan pertimbangan karakteristik dari material PP diperlukan suatu penguat (*reinforcement*) yang sekaligus dapat meningkatkan konduktivitas listrik dan sifat mekanis pelat bipolar berbasis polimer komposit. Material penguat yang ditambahkan harus bisa dibasahi dengan baik oleh PP dan memiliki *interface*

yang bagus. Untuk membuat komposit dari karbon-polimer beberapa material dicampurkan seperti *polypropylene-grafit-maleated anhydred* (PP-g-MA), grafit 4012 dan anti oksidan CN-CAT A215 sebagai bahan pembuat pelat bipolar. Dalam fokus meningkatkan konduktivitas listrik pelat bipolar maka ditambahkan penguat serat karbon, *carbon nanotubes* (CNT) dan nano tembaga (Cu-nano). Serat karbon dan *carbon nanotubes* (CNT) ditambahkan karena material tersebut memiliki karakteristik sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis yang cukup tinggi sehingga cocok untuk dijadikan penguat pada komposit bermatriks PP. Dalam penelitian ini akan dikaji mengenai pengaruh penambahan fraksi volume penguat nano tembaga (Cu-nano) terhadap sifat mekanis dan konduktivitas listrik dari *hybrid* nano komposit PP/C-CNT untuk aplikasi pelat bipolar pada PEMFC.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC ini adalah sebagai berikut:

- a. Mengetahui mekanisme fabrikasi pelat bipolar berbasis *hybrid* nanokomposit PP/C-CNT-Cu nano, dengan bahan polipropilena (PP), *polypropylene-grafted-maleated-anhydred* (PP-g-MA), *carbon nanotubes* (CNT), serat karbon Fortafile 243, grafit 4012, anti oksidan CN-CAT A215, dan nano tembaga (Cu-nano).
- b. Mengetahui sifat-sifat fisis dan mekanis pelat bipolar berbasis *hybrid* nanokomposit PP/C-CNT-Cu nano, meliputi konduktivitas listrik, kekuatan tarik (*tensile strength*), kekuatan tekuk (*flexural strength*), kerapatan massa (*density*), porositas (*porosity*), dan karakteristik patahan tekuk.
- c. Mengetahui efek penambahan nano tembaga (Cu-nano) terhadap sifat mekanis dan konduktivitas listrik dari pelat bipolar berbasis *hybrid* nanokomposit PP/C-CNT-Cu nano.

1.4. Hipotesis

Pelat bipolar yang disyaratkan oleh *Departement of Energy of Amerika Serikat* (DOE) adalah memiliki konduktivitas listrik sebesar 100 S/cm. Penelitian dilakukan untuk mendapatkan pelat bipolar yang minimum mempunyai nilai

konduktivitas sesuai standar tersebut. Material penguat berupa nano tembaga (Cu nano) memiliki konduktivitas listrik sebesar 5.0×10^3 S/cm dan densitas sebesar 0.35 gr/cm^3 . Penambahan nano tembaga (Cu nano) sebanyak 0.25%, 0.5%, dan 1.0% persen berat, atau sekitar 0.021%, 0.041%, dan 0.080% fraksi volume pelat bipolar akan meningkatkan nilai konduktivitas listrik hingga lebih dari 100 S/cm sehingga sudah memenuhi persyaratan dari DOE (*Department of Energy of United State of America*).

Penelitian terakhir yang dilakukan oleh Yuhua Wang (2006) berhubungan dengan topik ini adalah adanya saling keterkaitan antara kekuatan mekanik dengan sifat konduktivitas dimana semua polimer komposit bipolar plate menunjukkan kemampuan mekanik (*tensile strength* dan *flexural strength*) yang lebih baik dibandingkan plat bipolar grafit namun lebih rendah pada uji kurva polarisasi arus-tegangan (*conductivity test*). Pada tahun 2008 Muhammad Hatta Adam, dan pada tahun 2009 Yoghi Suharjanto telah melakukan penelitian dengan bahan bahan yang serupa dan hampir sama dengan formulasi penelitian ini dan didapat konduktivitas tertinggi 8.6 S/cm. Maka dengan penambahan partikel nano tembaga dan meningkatkan kadar serat karbon, hipotesa penelitian ini adalah: “Penambahan fraksi volume penguat nano tembaga (Cu nano) mungkin akan sangat meningkatkan konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis *hybrid* nanokomposit PP/C-CNT-Cu nano, tetapi sedikit menurunkan sifat mekanik pelat bipolar berbasis *hybrid* nanokomposit PP/C-CNT-Cu nano”.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC ini adalah sebagai berikut:

- a. Material yang digunakan dalam pembuatan komposit pelat bipolar dalam penelitian ini meliputi polipropilena (PP), *polypropylene-grafted-maleated-anhydred* (PP-g-MA), *carbon nanotubes* (CNT), serat karbon Fortafite 243, grafit 4012, anti oksidan CN-CAT A215, dan nano tembaga (Cu-nano).

- b. Formulasi yang digunakan terdiri dari 3 formula yaitu F1, F2, dan F3 dengan variabel bebas fraksi volume penguat nano tembaga (Cu-nano) sebesar 0.021%, 0.041%, dan 0.080%.
- c. Proses pencampuran dilakukan dengan metode pencampuran panas (*hot blending*) dengan temperatur proses pencampuran 180°C dan waktu pencampuran selama 15 menit.
- d. Pembuatan sampel dilakukan dengan proses penekanan panas (*hot pressing*).
- e. Pembuatan dan pengujian sampel uji tarik berdasarkan ASTM D3039 dan uji tekuk berdasarkan ASTM D790.
- f. Karakterisasi sampel meliputi meliputi pengujian konduktivitas listrik, kekuatan tarik (*tensile strength*), kekuatan tekuk (*flexural strength*), kerapatan massa (*density*), porositas (*porosity*), dan karakteristik patahan tekuk dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

- Bab 1 Pendahuluan** berisi latar belakang penelitian, perumusan permasalahan, tujuan penelitian, hipotesis penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.
- Bab 2 Landasan Teori** berisi studi literatur yang berkaitan dengan penelitian ini.
- Bab 3 Metodologi Penelitian** berisi diagram alir penelitian, variabel penelitian, formulasi penelitian, komposisi material, spesifikasi dan karakteristik material, peralatan preparasi sampel pengujian, peralatan karakterisasi sampel dan prosedur penelitian secara terperinci.
- Bab 4 Hasil Penelitian** berisi data-data hasil penelitian.
- Bab 5 Pembahasan** berisi analisis dari hasil penelitian.
- Bab 6 Kesimpulan** berisi kesimpulan akhir berdasarkan pembahasan dan analisis akhir dari penelitian ini.

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1. *Fuel Cell*

Salah satu sumber energi alternatif yang sedang dikembangkan saat ini adalah sel tunam (*fuel cell*). Pada tahun 1839, Sir William Grove berhasil menciptakan *fuel cell* untuk yang pertama kalinya. Dari penelitian yang dilakukan diketahui bahwa air dapat terurai menjadi hidrogen dan oksigen ketika diberikan arus listrik. Proses ini dikenal dengan proses elektrolisis. Hipotesis yang dia keluarkan adalah jika proses elektrolisis air tersebut dibalik maka akan dihasilkan air dan arus listrik. Istilah *fuel cell* kemudian berhasil dipopulerkan 50 tahun kemudian oleh Ludwig Mond dan Charles Langer dimana kedua ilmuwan tersebut membuat suatu model praktis untuk menghasilkan listrik^[12].

Fuel cell adalah seperangkat alat yang memanfaatkan hidrogen sebagai bahan bakar untuk menghasilkan elektron, proton, panas, dan air^[12]. Teknologi *fuel cell* dalam konversi energi secara sederhana dapat digambarkan dalam persamaan reaksi^[12]:



Bahan bakar berupa oksigen dapat diperoleh dari udara sedangkan gas hidrogen bisa diperoleh dari reaksi reformer hidrokarbon yang berasal dari pabrik besar^[4]. Selain itu, gas hidrogen sendiri juga dapat diperoleh dari proses elektrolisis air^[4]. Kendala yang dihadapi dalam hal bahan bakar diantaranya adalah gas hidrogen yang bermolekul kecil, susah dicairkan, dan mudah terbakar sehingga memberikan kesulitan saat penyimpanan dan distribusi. Solusi yang diterapkan untuk menangani gas hidrogen ini diantaranya adalah dengan memperkecil reaktor reformer dengan bahan baku LPG atau gas *methane*, menguraikan metanol yang dibuat dari pabrik besar tetapi dalam bentuk cair sehingga mudah untuk ditransport. Gas hidrogen dapat juga diperoleh dari methanol setelah diuraikan menjadi gas CO dan hidrogen, kemudian gas CO dioksidasi menjadi CO₂ dan air^[4]. Elektron yang dihasilkan selanjutnya dimanfaatkan sebagai arus listrik. Residu yang dihasilkan dari rekasi dalam suatu *fuel cell* hanyalah berupa air sehingga tidak mencemari lingkungan.

Dapat dikatakan bahwa *fuel cell* tidak sama dengan baterai. Baterai bekerja dengan mengubah suatu senyawa kimia menjadi listrik dan kemudian habis, sehingga harus dibuang atau diisi ulang dengan menggunakan suatu catuan daya. Berbeda dengan *fuel cell* yang senyawanya terus mengalir di dalam selnya secara konstan sehingga tidak pernah mati^[13]. Secara singkat dapat dikatakan bahwa sebagai suatu alat konversi energi, *fuel cell* memiliki beberapa keunggulan diantaranya adalah efisiensi energi yang cukup tinggi, tidak mengeluarkan emisi suara sehingga tidak berisik, dan ramah lingkungan karena tidak menghasilkan polutan yang dapat mencemari udara^[4].

Aplikasi *fuel cells* sangat berguna sebagai sumber energi alternatif pada lokasi yang terpencil, seperti pesawat ulang-alik, alat pendeteksi cuaca, kendaraan umum dipelosok daerah, bahkan untuk kalangan militer dengan medan yang relatif sulit. Sistem *fuel cell* yang bekerja menggunakan hidrogen bisa didesain dengan sangat ringan dan mudah dibawa. Rangkaian *fuel cell* juga tidak mempunyai bagian yang bergerak/ bergetar (bila dibandingkan sistem piston pada bahan bakar minyak) dan sama sekali tidak menimbulkan polusi. Sehingga pada kondisi yang ideal, sistem ini tahan uji^[7]. Untuk itu *fuel cell* menjadi kandidat yang sangat baik sebagai sumber energi alternatif.

Fuel cell sebagai dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis, berdasarkan kombinasi tipe bahan bakar dan oksidan, tipe elektrolit yang digunakan, temperatur operasi, dan lain-lain.

Fuel cell berdasarkan jenis elektrolit penyusunnya dapat dibedakan menjadi:

1. *Alkaline Fuel Cell* (AFC),
2. *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC),
3. *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC),
4. *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC),
5. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC), dan
6. *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) [b].

Perbandingan jenis-jenis *fuel cell* diatas dapat dilihat rangkumannya dalam tabel 2.1 dibawah ini:

Table 2.1. Rangkuman perbandingan jenis-jenis *fuel cell*^[14]

Parameter	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	<i>Hydrated Polimeric Ion Exchange Membrane</i>	<i>Potassium Hydroxide In Asbestos Matrix</i>	<i>Immobilized Liquid Phosphoric Acid in SiC</i>	<i>Immobilized Liquid Molten Carbonate in LiAlO₂</i>	<i>Perovskite (ceramic)</i>
Catalyst	<i>Platinum</i>	<i>Platinum</i>	<i>Platinum</i>	<i>Electrode Material</i>	<i>Electrode Material</i>
Electrodes	<i>Carbon</i>	<i>Transition Metal</i>	<i>Carbon</i>	<i>Nickel and NiO</i>	<i>Perovskite</i>
Interconnect	<i>Carbon or Metal</i>	<i>Metal</i>	<i>Graphite</i>	<i>Stainless steel / nickel</i>	<i>Ni, steel or ceramic</i>
Operating Temperature	<i>40-80°C</i>	<i>65-220°C</i>	<i>±205°C</i>	<i>±650°C</i>	<i>600-1000°C</i>
Charge Carrier	<i>H⁺</i>	<i>OH⁻</i>	<i>H⁺</i>	<i>CO₃²⁻</i>	<i>O²⁻</i>
External Reformer	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>No</i>
Prime Cell Components	<i>Carbon based</i>	<i>Carbon based</i>	<i>Graphite based</i>	<i>Stainless Steel based</i>	<i>Ceramic based</i>
Product Water Management	<i>Evaporative</i>	<i>Evaporative</i>	<i>Evaporative</i>	<i>Gaseous Product</i>	<i>Gaseous Product</i>

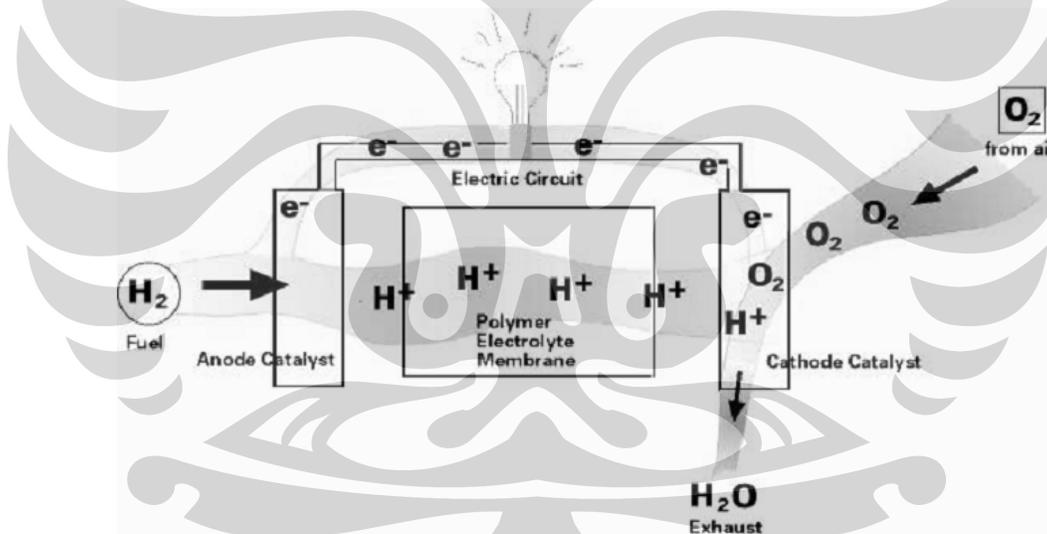
Dari berbagai jenis *fuel cell* tersebut, jenis PEMFC memiliki aplikasi yang cukup luas yaitu dapat diaplikasikan pada peralatan elektronik *portable, mobile & residential generation*, mobil, kapal dan lain-lain. Hal ini disebabkan PEMFC memiliki range yang sangat luas untuk menghasilkan daya yaitu dari 1-100 KW. PEMFC dapat menjadi sumber energi listrik yang menjanjikan di masa depan untuk aplikasi stasioner dan transportasi^[13]. PEMFC dapat digunakan pada

temperatur operasi 60 hingga 100°C, dengan karakteristik kerapatan energi tinggi dan memiliki kepekaan terhadap CO.

2.1.1. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)*

2.1.1.1. Teknologi PEMFC

Polymer electrolyte membrane fuel cell atau biasa disebut juga dengan *proton exchange membrane fuel cell* adalah salah satu jenis fuel cell yang mempunyai kelebihan dengan dapat bekerja pada temperatur rendah, ringan, dan dapat dibuat dengan ukuran kecil sehingga dapat mengurangi biaya produksi. PEMFC adalah sebuah perangkat elektrokimia yang mengubah secara langsung energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik melalui reaksi berpasangan oksidasi-reduksi^[6]. Secara skematis PEMFC terlihat seperti pada gambar 2.1 berikut:



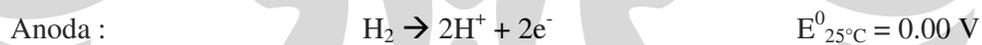
Gambar 2.1. *Basic Fuel Cell Operation*^[12]

PEMFC menggunakan membran pertukaran ion sebagai elektrolit yang merupakan konduktor yang paling baik. Membran ini berupa lapisan tipis padat yang berfungsi sebagai elektrolit pemisah katoda dan anoda kemudian secara selektif mengontrol transport proton dari anoda ke katoda dalam *fuel cell* dan dapat menghasilkan energi listrik. Untuk memenuhi daya yang dibutuhkan maka membran ini disusun dalam jumlah yang besar dan dipisahkan oleh pelat bipolar.

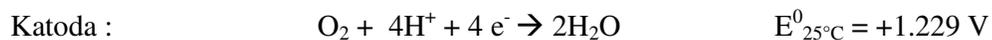
PEM FC merupakan sumber energi yang sangat baik bila diaplikasikan pada alat transportasi, karena perangkatnya mudah didistribusikan dan mudah dibawa^[15, 16]. Selain itu, PEMFC memiliki potensial *solid state*, ringan, rapat arus yang tinggi, dan beroperasi pada temperatur rendah^[17]. Pada lima tahun terakhir, penelitian PEMFC mengalami peningkatan yang signifikan. Industri otomotif melakukan investasi melalui berbagai usaha dalam mengkomersialisasi PEMFC pada mobil, dengan harapan mampu bersaing dengan kendaraan bermesin bakar internal^[18].

Di sisi lain, ada berbagai hambatan dalam pengkomersialisasian PEMFC, seperti kurangnya produksi hidrogen dan infrastruktur distribusi, rendahnya kerapatan/densitas wadah penyimpanan gas, masalah kekuatan susunan PEMFC, serta biaya produksinya masih tinggi. Sebagai salah satu komponen utama dari PEMFC, pelat bipolar membutuhkan material dan desain yang baru dalam rangka mengurangi biaya produksi serta untuk mengurangi bobot PEMFC^[6].

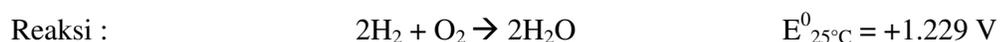
Pada PEMFC, hidrogen akan berpindah dari anoda secara difusi melalui bagian (*gas diffusion layer*) menuju lapisan katalisator dimana molekul hidrogen tersebut akan terurai menjadi elektron dan proton dengan reaksi elektrokimia setengah sel sebagai berikut :



Proton dan elektron akan menuju katoda tetapi melalui path atau jalan yang berbeda. Proton akan berjalan melewati membran elektrolit menuju katoda dan elektron akan berjalan melalui sirkuit eksternal menuju katoda. Pada katoda, oksigen dari udara luar akan berdifusi melalui katoda *gas diffusion layer* menuju katoda katalis. Oksigen akan bereaksi dengan proton dan electron hasil penguraian hydrogen pada anoda dan akan membentuk air (H₂O) kemudian pada saat yang bersamaan juga memproduksi panas seperti reaksi setengah sel berikut:

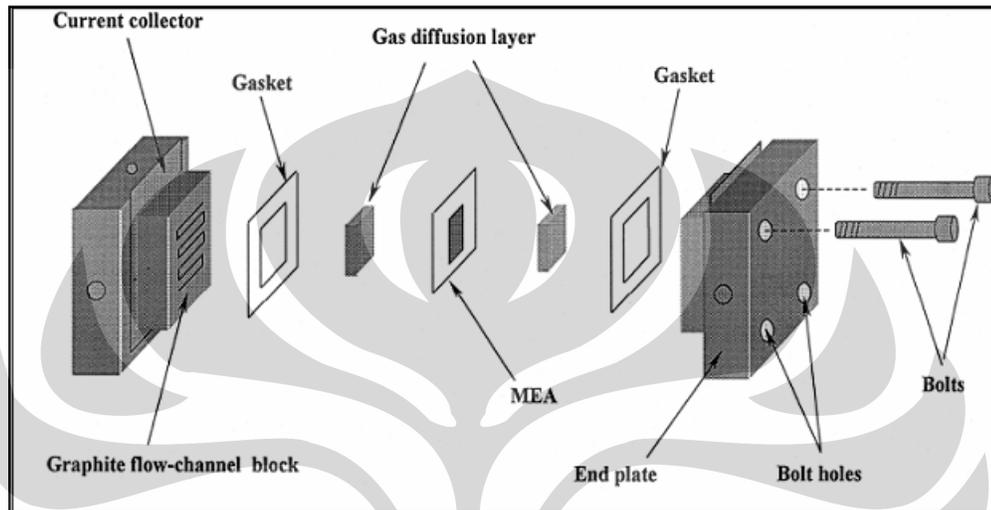


Sehingga reaksi secara keseluruhan yang terjadi pada anoda dan katoda adalah sebagai berikut :



2.1.1.2. Struktur PEMFC

Rangkaian PEMFC terdiri dari *membrane electrolyte assembly* (MEA) dengan lapisan katalis di kedua sisinya, lapisan difusi gas (GDL), gaskets, pelat bipolar, penyimpanan arus, dan pelat penutup. Secara skematis rangkaian dari suatu PEMFC diperlihatkan dalam gambar 2.2 di bawah ini:



Gambar 2.2. Struktur Rangkaian PEMFC^[6]

PEMFC terdiri dari empat komponen utama seperti ditunjukkan dalam tabel 2.2 di bawah:

Tabel 2.2. Komponen-komponen Utama PEMFC^[19]

Komponen	Bahan Penyusun	Fungsi
<i>Membrane Electrolyte Assembly</i> (MEA)	Polimer solid terimpregnasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda. Kertas atau kain karbon berpori untuk <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	Terdiri dari 2 elektroda, 1 membran elektrolit, dan 2 GDL. Membran memisahkan 2 setengah-reaksi sel dan melepas proton dari anoda ke katoda. Lapisan katalis yang terdispersi pada elektroda memacu setiap setengah reaksi. GDL mendistribusikan gas secara merata ke katalis di

		membran, mengalirkan elektron dari area aktif menuju pelat bipolar dan membantu pengaturan air.
Pelat Bipolar	Grafit, <i>stainless steel</i> , atau komposit polimer termoplastik	Mendistribusikan gas di bagian area aktif membran, mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda, membuang air keluar sel.
Pelat Penutup	Material dengan kekuatan mekanis yang baik (biasanya baja atau alumunium)	Menyatukan rangkaian <i>fuel cell</i> .
Penyimpan Arus	Logam dengan kontak elektrik dan konduktivitas yang baik (biasanya tembaga)	Menyimpan dan mentransfer arus listrik dari dalam ke luar sirkuit.

2.1.2. Pelat Bipolar

Pelat bipolar merupakan bagian dari struktur sistem *fuel cell* yang memiliki fungsi ganda, yaitu sebagai pengatur pendistribusian bahan bakar *fuel cell* (gas hidrogen-oksigen) dan sebagai pengumpul arus listrik yang dihasilkan sistem *fuel cell*. Fungsi lain dari pelat bipolar ini adalah sebagai struktur penguat (*integrity*) susunan *fuel cell*. Pelat ini biasa dibuat dari grafit, logam (alumunium, *stainless steel*, titanium, dan nikel), atau dapat juga dibuat dari komposit^[20]. Saluran alir gas dicetak pada permukaan pelat sebagai tempat aliran gas-gas yang bereaksi.

Gambar 2.3 menunjukkan sebuah pelat bipolar PEMFC dengan saluran alir:



Gambar 2.3. Pelat bipolar dengan saluran air^[21]

Sebagai komponen utama pada PEM FC, pelat bipolar memenuhi bagian yang signifikan dari total biaya dan bobot rangkaian *fuel cell*. Pelat bipolar mencakup 80% total bobot dan 45% biaya, sehingga hal ini bersifat kritis dan perlu pertimbangan dalam mendesain *fuel cell*^[20]. Pembuatan saluran alir (*flow path*) pada permukaan pelat bipolar juga salah satu proses yang membutuhkan biaya. Hal ini menjadi faktor kunci yang menghambat komersialisasi PEMFC. Oleh karena itu, diperlukan pelat bipolar yang murah, tipis, dan ringan, sehingga dapat mengurangi bobot, volume, dan biaya produksi *fuel cell*.

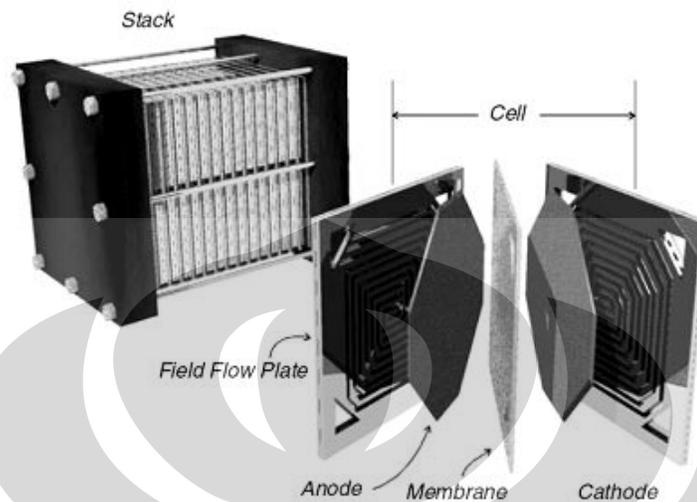
Pada aplikasi di bidang transportasi, bobot secara khusus menjadi bahan pertimbangan, karena penambahan bobot berarti mengurangi efisiensi bahan bakar. Salah satu jenis *fuel cell* dalam aplikasi kendaraan bermotor membutuhkan 200 - 400 pelat bipolar. Dalam kasus ini, diperlukan pemilihan material dan metode pemrosesan pelat bipolar yang tepat, agar dapat diaplikasikan pada industri otomotif^[22]. Material baru pelat bipolar untuk industri otomotif harus memiliki konduktivitas yang tinggi dan kerapatan massanya rendah bila dibandingkan material lain, seperti baja, aluminium, dan grafit. Selain itu, pelat bipolar harus dapat diproduksi secara massal^[6].

2.1.2.1. Fungsi Pelat Bipolar

Fungsi utama pelat bipolar, antara lain^[6]:

- Mengalirkan elektron ke seluruh sirkuit :
- Mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda dan katoda,
- Menyatukan rangkaian *fuel cell* yang dilengkapi voltase (rangkaian *fuel cell* tergantung pada bentuk pelat bipolar)
- Mengalirkan dan mendistribusikan gas ke elektroda secara merata.
- Memisahkan oksidan dan bahan bakar gas, memasukkan H₂ ke anoda dan O₂ ke katoda, serta membuang air hasil reaksi.
- Sebagai penguat mekanik sekaligus penahan membran tipis dan elektroda, serta sebagai penjepit rangkaian *fuel cell*.
- Sebagai konduktor panas untuk meregulasikan temperatur *fuel cell* dan memindahkan panas dari elektroda ke saluran pendingin.

Pelataan pelat bipolar pada PEMFC diperlihatkan pada gambar 2.4 di bawah ini:



Gambar 2.4. Letak pelat bipolar (*field flow plate*) pada PEMFC^[7]

Selain itu, agar pelat bipolar mampu menjalankan fungsinya, maka untuk mendesain sebuah pelat bipolar harus memenuhi sifat-sifat standart yang telah ditetapkan oleh DOE (*Departement of Energy U.S*) seperti yang terlihat pada tabel 2.3 dibawah ini:

Tabel 2.3. Sifat Material yang Dibutuhkan untuk Pelat Bipolar Ideal^[6]

Parameter	Standar Nilai
Konduktivitas Listrik	> 100 S/cm
Kekuatan	Mampu menahan tekanan 200 Psi
Bobot	Maksimum 200 gram/pelat
Volume	1 L/kW/stack
Biaya Fabrikasi	< \$ 0,0045/cm ²
Kerapatan Arus Decay	< 10% per 5000 jam operasi
Daya Tembus (<i>permeability</i>)	Maksimum kebocoran H ₂ 10 ⁻⁴ cm ³ /s-cm ²

2.1.2.2. Material Pelat Bipolar

Ada berbagai jenis material yang dapat digunakan untuk material pelat bipolar, seperti; logam dengan atau tanpa pelapisan, grafit, komposit karbon/polimer, komposit karbon/karbon. Pelat logam sering dilapisi dengan

Universitas Indonesia

lapisan antikorosi pada permukaannya, sementara pelat grafit diimpregnasi dengan sealant treatment untuk mengurangi daya tembus gas. Berbagai penelitian terbaru telah dilakukan untuk membuat pelat bipolar yang murah, ringan, dan berdaya guna, sehingga dapat menggantikan pelat grafit yang harganya masih mahal^[6]. Sifat material pelat bipolar diperlihatkan pada tabel 2.4 di bawah ini:

Tabel 2.4. Sifat-sifat material untuk pelat bipolar PEMFC^[23]

Bahan	Paduan	Karakteristik
Grafit	Diimpregnasi dengan polimer	Konduktivitas tinggi, tebal, getas, biaya membuat saluran air mahal
Logam atau paduan logam	Paduan Ni, paduan Cr, stainless steel, baja titanium	Konduktivitas tinggi, korosi, biaya membuat saluran air mahal
Komposit	Komposit polimer/karbon komposit karbon/karbon	Ringan, murah, konduktivitas rendah dibandingkan grafit dan logam
Plastik konduktif	Plastik cair kristalin	Konduktivitas relatif rendah

Dari berbagai jenis material yang dapat digunakan untuk membuat pelat bipolar diatas, maka untuk mendapatkan material yang murah, ringan dan dapat diproduksi secara massal kita dapat menggunakan material komposit. Pada penelitian kali ini akan dicoba untuk membuat pelat bipolar dari komposit polimer/karbon.

2.1.2.3. Pelat Bipolar Komposit Polimer-Karbon

Material baru untuk pelat bipolar yang mampu mengurangi bobot *fuel cell* sangatlah diperlukan. Saat ini, komposit bermatriks polimer sudah banyak diteliti untuk digunakan sebagai material pelat bipolar karena komposit polimer-karbon lebih murah dan lebih ringan bila dibandingkan material seperti baja, alumunium, dan grafit. Kemampuan proses juga menjadi sebuah persoalan yang penting untuk produksi massal pelat bipolar. Oleh karena itu, komposit polimer-karbon menjadi alternatif menarik dari pelat bipolar logam atau grafit. Idealnya, pelat komposit harus memenuhi target sebagai berikut^[6]:

- Konduktivitas yang tinggi (100 S/cm);
- Daya tembus (*permeability*) hidrogen harus sama atau di bawah rentang daya tembus membran penghantar ion;
- Sifat-sifat mekanik yang baik;
- Stabilitas panas saat kondisi kerja *fuel cell* (-40 sampai 120 °C untuk *fuel cell* penggerak kendaraan bermotor);
- Kerapatan massa yang rendah;
- Stabilitas kimia dalam kondisi kontak dengan bahan bakar, oksidan, dan air yang mungkin sedikit bersifat asam (korosi < 16 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$);
- Tahan korosi;
- Daya tembus yang rendah terhadap bahan bakar dan oksidan (daya tembus gas $\text{H}_2 < 2 \times 10^{-6} \text{cm}^3/\text{scm}^2$);
- Muai panasnya rendah;
- Dapat ditiru ulang, secara khusus mampu meniru ulang saluran alir yang dimanufaktur pada pelat dalam toleransi teknik;
- Mudah diselesaikan untuk dapat diterima standar kualitas;
- Dapat didaur ulang.

Melalui pemilihan matriks polimer yang tepat, komposit polimer-karbon dapat memberikan sifat inert terhadap bahan kimia dan keketatan terhadap gas. Polimer termoplastik dan termoset dapat dipilih menjadi matriks komposit dengan ditambahkan bahan pengisi konduktif, seperti; karbon hitam, serat karbon, grafit, dan partikel logam. Mesin cetak tekan (*compression molding*) dan cetak injeksi (*injection molding*) digunakan untuk memfabrikasi pelat bipolar dengan saluran alir pada permukaan pelatnya. Pemilihan metode proses yang tepat dapat mengurangi biaya produksi pelat bipolar.

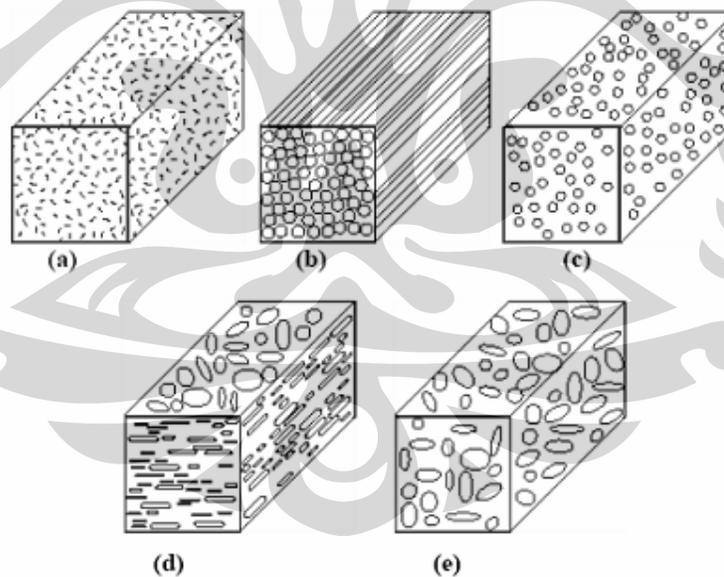
2.2. Material Komposit

Komposit adalah gabungan antara bahan matrik atau pengikat yang diperkuat. Bahan material ini terdiri dari dua bahan penyusun, yaitu bahan utama sebagai bahan pengikat dan bahan pendukung sebagai pengisi. Bahan utama membentuk matrik di mana bahan pengisi ditanamkan di dalamnya. Bahan pengisi

dapat berbentuk serat, partikel, serpihan atau juga dapat berbentuk yang lain^[24]. Dimana dalam penelitian ini, matriks yang digunakan dapat digolongkan sebagai *Polymer Matrix Composites* (PMC), atau lebih detailnya lagi, digolongkan dalam komposit berpengisi serbuk karbon atau *Polymer Carbon Composite*.

Untuk memperoleh sifat bahan komposit seperti yang diinginkan, langkah pertama yang perlu diperhatikan adalah mengetahui sifat dari bahan matriks. Dari pengetahuan tentang sifat-sifat bahan matriks inilah dapat dipilih material apa yang harus diisikan pada bahan matriks untuk memperbaiki karakteristik matriks^[25]. Pada dasarnya, matriks meneruskan tegangan yang diberikan kepada partikel pengisi sehingga ketahanan bahan komposit semakin bertambah.

Komposit dapat dikelompokkan berdasarkan jenis matriksnya, seperti komposit bermatriks logam, komposit bermatriks polimer, dan komposit bermatriks keramik. Selain jenis matriks, komposit juga dikelompokkan berdasarkan bentuk penguatnya sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2.5 berikut ini:



Gambar 2.5. Komposit berdasarkan jenis penguat^[7]: (a) komposit serat pendek acak, (b) komposit serat panjang sejajar, (c) komposit partikulat, (d) komposit serpihan, dan (e) komposit berpengisi

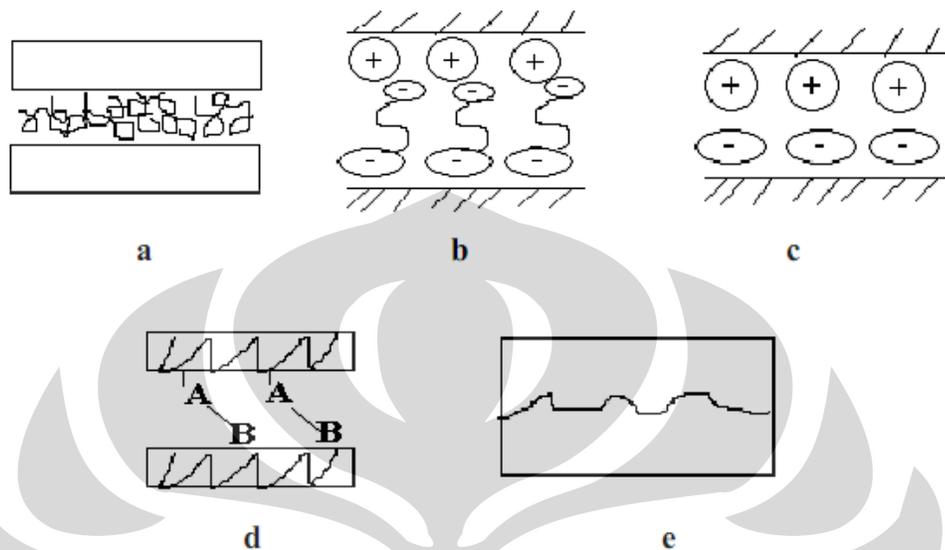
Sebagai hasil penggabungan dari dua jenis material atau lebih, akan didapatkan sifat-sifat terbaik dari kedua material tersebut. Sebagian besar penelitian terhadap material komposit telah berhasil menciptakan material komposit yang memiliki sifat-sifat:

- Kekuatan yang tinggi
- Ketangguhan yang tinggi
- Ketahanan terhadap *creep* yang baik
- *Tensile strength* yang tinggi
- Ringan namun kuat

Sifat-sifat dari suatu material komposit ditentukan oleh:

- **Komposisi**
Komposisi penguat dan matriks komposit mempengaruhi karakteristik komposit tersebut. Semakin banyak komposisi material dalam komposit, semakin besar dominasi material tersebut dalam menentukan sifat material komposit.
- **Interface**
Merupakan permukaan antara matriks dan penguat yang menentukan proses transfer tegangan tarik antara matriks-penguat-matriks yang akan sangat berpengaruh terhadap *specific strength*, *specific stiffness*, *fracture toughness*, dan *creep resistance*. Bentuk *interface* yang baik berpengaruh terhadap kemampuan antara matriks dan penguat untuk bersatu dan berikatan dengan erat. Tanpa adanya kecocokan antara matriks dan penguatnya, maka matriks dan penguat tidak mampu untuk bersatu serta membuat komposit rusak. Untuk menyatukan antara dua material komposit yang tidak mau bersatu digunakan *wetting agent* yaitu bahan kimia yang berguna untuk mengurangi tegangan antara kedua *interface* material sehingga mampu untuk menyatukan kedua material.
- **Interfacial Bonding**
Bersatunya matriks dan penguat dalam komposit terjadi karena adanya ikatan antara keduanya. Ikatan antara matriks dan penguat merupakan komponen yang penting untuk mempengaruhi sifat dari komposit. Semakin kuat ikatan keduanya, maka kekuatan komposit akan meningkat dan meningkatkan

kemampuan transfer tegangan antar permukaan komposit. Gambar 2.6 di bawah menunjukkan jenis-jenis *interfacial bonding*.



Gambar 2.6. Jenis-jenis interfacial bonding^[13] (a) *Molecule entanglemen*, (b) *Cationic attraction*, (c) *Electrostatic*, (d) *Reaksi kimia*, (e) *Mechanical bonding*

Molecule entanglemen adalah ikatan antar molekul di permukaan serat sehingga menyatukan kedua material komposit. *Cationic attraction* atau *ionic surface* adalah ikatan yang timbul dari perbedaan molekular ion pada komposit. *Electrostatic* adalah ikatan yang disebabkan oleh perbedaan muatan listrik secara atomik antara penguat dan matriks di permukaan *interface* yang mengakibatkan tarik-menarik, bila ada gas ikatan akan melemah. *Reaksi kimia* adalah ikatan kimia yang terjadi pada *interface* ikatan akan bertambah erat dengan adanya *coupling agent*. *Mechanical bonding* adanya mekanisme *interlocking* pada permukaan sehingga semakin kasar permukaan, ikatan yang terjadi makin kuat.

2.2.1. Komposit Bermatriks Polimer

Merupakan jenis komposit yang menggunakan polimer sebagai matriks pengikat, sedangkan bahan penguatnya dapat berupa serat, partikel, atau serpihan. Jenis serat yang biasa dipakai sebagai penguat dalam komposit bermatriks polimer adalah serat karbon, serat gelas, dan serat aramid (Kevlar)^[24,26]. Keunggulan dari

material polimer yang dijadikan sebagai matriks dalam komposit polimer adalah sebagai berikut:

- Memiliki stabilitas dimensi yang baik
- Memiliki resistansi yang baik terhadap *moisture* dan *solvent*.
- Pemrosesan dapat dilakukan pada temperatur yang tidak terlalu tinggi

Tujuan dibentuknya komposit bermatriks polimer umumnya karena alasan manufaktur, yaitu biaya pembuatan yang relatif lebih rendah, dapat diproduksi secara massal, mudah dibentuk dan memiliki kemampuan permesinan (*machinability*) yang baik^[27,28]. Selain itu, tujuan umum lainnya adalah untuk memperoleh produk dengan ketangguhan yang tinggi dan relatif lebih ringan. Secara khusus polimer dipilih sebagai matriks karena harganya murah, ketersediaan jumlah yang memadai, tahan terhadap bahan kimia, dan memiliki sifat-sifat mekanik yang baik, serta tidak tembus air maupun udara^[29]. Komposit yang dibuat dari campuran antara matriks polimer dengan bahan pengisi konduktif seperti karbon hitam, serat karbon, grafit, dan partikel logam disebut dengan komposit konduktif polimer. Pelat bipolar yang terbuat dari komposit polimer konduktif memiliki bobot yang ringan dan daya tembus gas yang rendah, serta mampu mengurangi biaya manufaktur dengan produksi massal^[6].

2.2.2. Polimer

Secara garis besar material polimer dapat diklasifikasikan menjadi^[30]:

- Termoplastik

Merupakan material polimer dengan struktur rantai molekul lurus ataupun bercabang yang dapat diberikan siklus pemanasan secara berulang sehingga dapat dilakukan proses daur ulang. Contoh polimer jenis ini adalah polipropilena (PP), polietilena (PE), *Poly Vinyl Chloride* (PVC), polistirena (PS) dan lain-lain.
- Termoset

Merupakan material polimer dengan struktur rantai jaring silang ketat di mana polimer termoset ini tidak dapat diberikan siklus pemanasan secara berulang. Contoh polimer jenis ini adalah bakelit, *unsaturated polyester*, *epoxy*, *polyurethane* dan lain-lain.

➤ Elastomer

Merupakan material polimer yang lebih umum dikenal sebagai karet (*rubber*) yang memiliki struktur rantai molekul jaring silang longgar sehingga polimer elastomer ini memiliki keuletan yang cukup tinggi. Contoh polimer jenis ini adalah karet alam, *Styrene Butadiene Rubber* (SBR), *buthyl rubber* dan lain-lain.

Diantara ketiga jenis material polimer tersebut, material termoplastik dipilih sebagai salah satu matriks dalam pembuatan komposit dengan alasan:

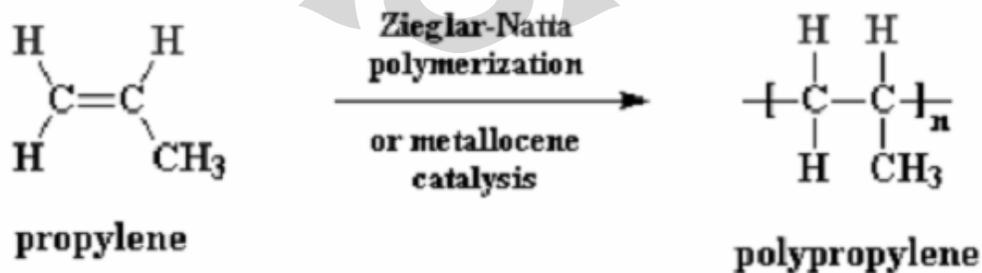
- Memiliki kekuatan impak yang tinggi.
- Memiliki resistansi terhadap perpatahan (*fracture resistant*) yang tinggi.
- Memiliki regangan pada saat perpatahan (*strain in fracture*) yang tinggi.
- Memiliki waktu penyimpanan yang tidak terbatas pada temperatur ruang.
- Waktu fabrikasi yang lebih pendek.
- Dapat dilakukan proses daur ulang.

Namun keterbatasan dari komposit bernatriks termoplastik diantaranya:

- Memiliki viskositas lelehan (*melt viscosities*) yang cukup tinggi.
- Memiliki ketahanan terhadap pemuluran (*creep resistant*) yang rendah.
- Memiliki stabilitas termal (*thermal stability*) yang rendah.

2.3. POLIPROPILENA (PP)

Polipropilena (PP) merupakan polimer hidrokarbon linier hasil reaksi polimerisasi dari propilena yang dapat dinotasikan sebagai C_nH_{2n} . Polipropilena ditemukan pertama kali oleh Giulio Natta (Italia) dengan melanjutkan penelitian Karl Ziegler (Jerman) pada tahun 1954. Makromolekul polipropilena terdiri dari 10.000 sampai 20.000 unit monomer^[31]. Reaksi polimerisasi propilena diilustrasikan pada gambar dibawah.



Gambar 2.7. Polimerisasi propilena menjadi polipropilena^[7]

Polipropilena (PP) adalah bagian dari keluarga *polyolefin* dan termasuk kelompok termoplastik karena material ini dapat mengalami perlakuan panas dan tekanan yang berulang kali tanpa mengalami perubahan sifat. Aplikasinya yang luas dalam kehidupan kita sehari – hari dikarenakan keunggulan – keunggulan yang dimiliki PP dibanding plastik lainnya dalam hal kombinasi sifat-sifat listrik, ketahanan panas, kekakuan, ketangguhan, ketahanan kimia, stabilitas dimensi, kilap permukaan dan *melt flow* dengan harga yang relatif lebih murah.

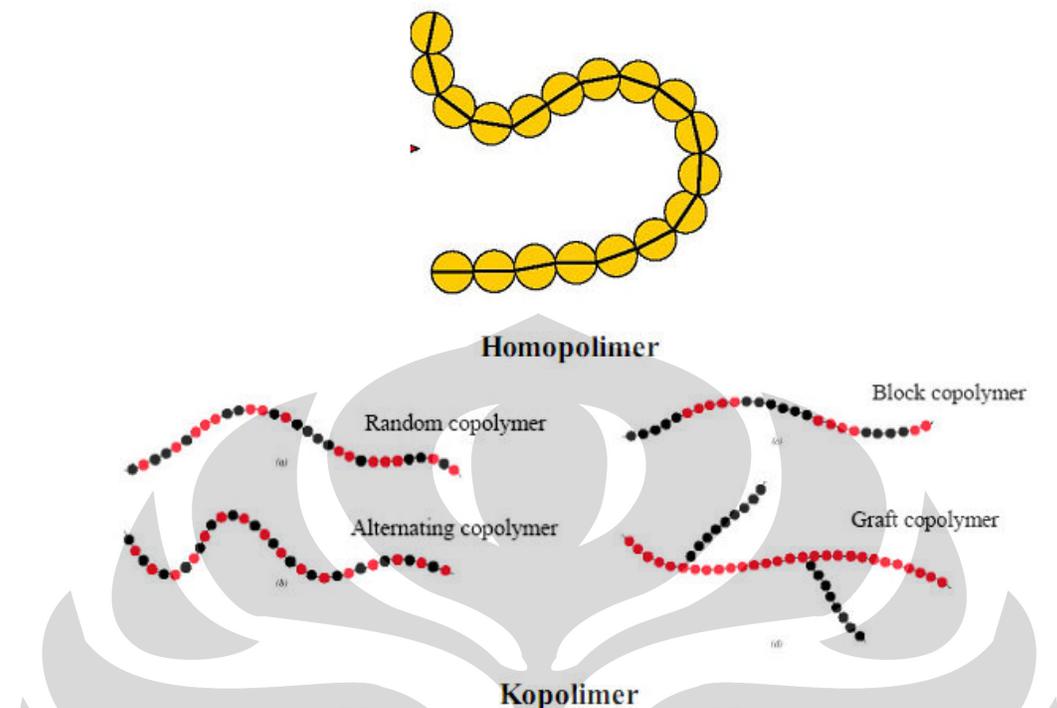
Diantara semua komoditi plastik, PP merupakan plastik teringan. Densitasnya yang rendah (*specific mass* of 0.9) memberikan keuntungan dalam kebutuhan material yang lebih sedikit untuk menghasilkan suatu part dibandingkan plastik lainnya^[31].

PP digolongkan sebagai polimer semikristalin, sehingga sifat fisik dan mekaniknya dipengaruhi oleh derajat kristalinitasnya. Kenaikan kristalinitas akan meningkatkan sifat kekuatan tarik (*tensile strength*) dan kekakuan namun menurunkan ketangguhannya.

Adanya kelompok metil (CH_3) pada propilen menyebabkan terjadinya sedikit kekakuan rantai dan dapat mengganggu kesimetrisan molekulnya. Hal tersebut menyebabkan PP mengalami kenaikan suhu T_g (*glass temperature*), kekakuan yang lebih dan T_m (*melting point temperature*) mencapai 170°C . Di lain pihak, kehadiran ikatan tersier (*tertiary carbon*) di rantai utama mengakibatkan tingginya sensitivitas PP atau lemah terhadap reaksi oksidasi, *environmental exposure*, atau pada temperatur tinggi^[31].

2.3.1. Struktur PP

Berdasarkan bahan penyusun yang digunakan, polimer PP dapat dikategorikan menjadi 2 jenis yaitu homopolimer dan kopolimer. Homopolimer adalah polimer yang tersusun dari satu jenis monomer, sedangkan kopolimer adalah polimer yang tersusun dari lebih dari satu jenis monomer. Di pasaran PP banyak kita temui dengan jenis homopolimer. Struktur dari ketiga jenis PP berdasarkan bahan yang digunakan dapat dilihat dalam gambar 2.8 di bawah ini:



Gambar 2.8. Jenis PP berdasarkan bahan yang digunakan^[13]

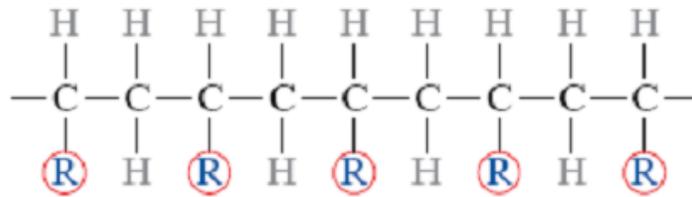
Struktur dari PP juga mengalami isomerisasi. Isomerisasi adalah polimer yang memiliki komposisi kimia yang sama tetapi berbeda dalam susunan atomnya. Keteraturan dan simetri dari susunan atom/grup samping dapat mempengaruhi sifat-sifat polimer secara signifikan. Isomerisasi dari polimer dibagi menjadi dua yaitu isomerisme stereo dan isomerisme geometrikan. Isomeri stereo adalah isomerisme yang disebabkan oleh perbedaan lokasi atom-atom R atau grup-grup samping. Struktur dari PP yang mengalami isomerisme stereo adalah^[32]:

➤ Isotaktik

Pada isotaktik, seluruh grup metil terletak disisi yang sama pada rantai karbon. Polimer komersial biasanya mengandung > 95% isotaktik. Bentuk isotaktik adalah bentuk yang paling biasa dan bersifat kaku dengan kristalinitas yang tinggi serta titik lebur yang tinggi pula. Dalam polimer komersial, makin tinggi isotaktiknya, makin tinggi pula kristanilitas serta kekuatan tarik, modulus dan kekerasannya sedangkan sifat-sifat struktur lainnya tetap. Dengan keteraturan gugus metil ini, maka rantai polimer dapat dikemas lebih padat sehingga

Universitas Indonesia

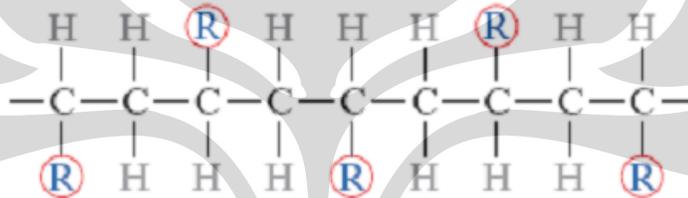
menghasilkan plastik yang tahan panas dan kuat. Struktur isotaktik dapat dilihat dalam gambar 2.9 di bawah ini:



Gambar 2.9. Isotaktik^[31]

➤ Sindiotaktik

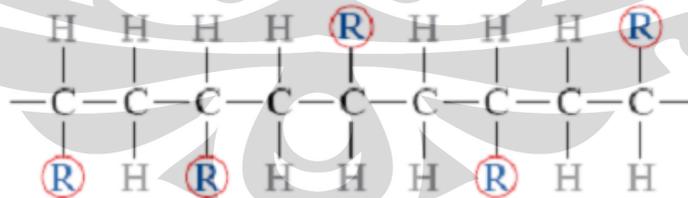
Pada sindiotaktik, grup metil terletak berselang-seling pada sisi yang berbeda. Struktur sindiotaktik diperlihatkan dalam gambar 2.10 di bawah ini:



Gambar 2.10. Sindiotaktik^[31]

➤ Ataktik

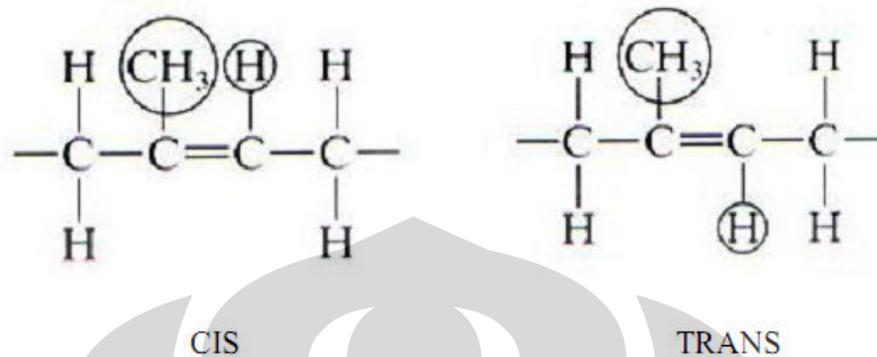
Pada ataktik, grup metil terletak acak. Memiliki kristalinitas yang rendah. Apabila PP dalam keadaan seluruhnya ataktik, maka bersifat amorf. Wujud fisiknya antara karet dan lilin. Struktur ataktik dapat dilihat dalam gambar 2.11 di bawah ini:



Gambar 2.11. Ataktik^[31]

Sedangkan isomer geometrikal adalah isomer yang disebabkan oleh perbedaan grup R dan atom H terhadap posisi ikatan ganda pada rantai. Isomer geometri dibagi menjadi 2 macam yaitu CIS dan TRANS. Bila grup R dan atom H berada pada sisi yang sama dari rantai utama, maka dinamakan CIS, sedangkan bila grup R dan atom H berada pada posisi yang bersilangan pada rantai utama

disebut dengan *trans*^[33]. Gambar 2.12 dibawah ini menunjukkan perbedaan antara isomer CIS dan TRANS dari material PP.



Gambar 2.12. Isomerisme geometrikal PP^[31]

2.3.2. Sifat PP

Beberapa karakteristik PP adalah sebagai berikut^[31]:

- Kejernihan.
- Ketahanan *moisture* / air yang sangat baik. Hal ini dikarenakan ikatan hidrokarbon yang menyebabkan PP menjadi non-polar.
- Ketahanan kimia yang baik terhadap hidrokarbon, alkohol dan reagen non-oksidasi.
- Kekuatan impak yang baik.
- Tidak beracun.

Sedangkan keterbatasan dari PP adalah sebagai berikut^[31]:

- Kekuatan impak yang lemah pada temperatur rendah.
- Mudah terdegradasi oleh sinar UV.
- Mudah terbakar.
- Mudah terserang pelarut klorin dan senyawa aromatik.
- Sulit berikatan.
- Mudah teroksidasi.

2.3.3. Kristalisasi dan Nukleasi

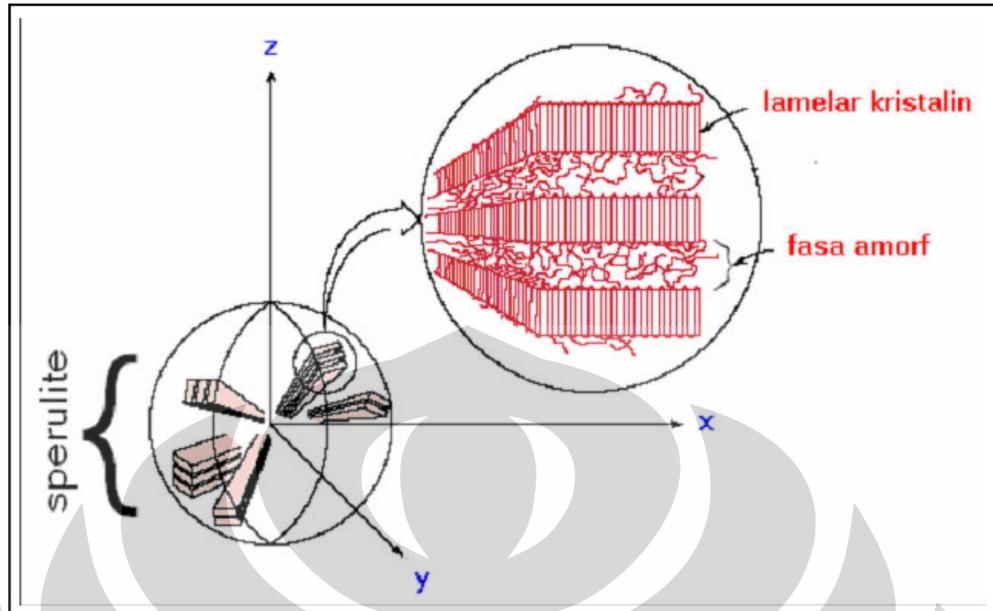
Keunikan dari polimer semi-kristalin adalah sifat termalnya karena memiliki dua temperatur transisi, yaitu temperatur transisi glass (T_g) dan temperatur leleh (T_m). Temperatur transisi glass adalah temperatur di mana terjadi perubahan fasa

dari fasa *glassy* (kaku) menjadi fasa *rubbery* (lentur), sedangkan temperatur leleh adalah temperatur di mana PP mulai meleleh menjadi lelehan kental. Selain itu, PP juga memiliki temperatur kristalisasi (T_{kris}), namun T_{kris} bukanlah temperatur transisi. Temperatur kristalisasi adalah temperatur dimana molekul mulai menyusun diri membentuk suatu kisi (susunan) tertentu secara beraturan [34,35].

Pada saat polimer dilelehkan, molekul-molekul akan terpisah dan saling menjauh serta akan terjadi vibrasi-vibrasi dan rotasi sehingga struktur molekul menjadi tidak teratur. Proses pemanasan ini membuat struktur teratur pada kristalin menjadi acak, sedangkan struktur amorf menjadi lebih mengembang dan lebih tidak teratur.

Sebaliknya proses pendinginan diikuti dengan penurunan volume karena strukturnya menyusut kembali seperti sebelum dipanaskan. Jika proses pemanasan dan pendinginan tidak merata, maka antara pengembangan dan penyusutan tersebut terdapat penyusutan volume. Fenomena ini disebut dengan pengkerutan (*shrinkage*)^[36]. Pada waktu didinginkan gerakan-gerakan molekul akan berhenti dan struktur molekul akan teratur kembali. Efek kecepatan pendinginan sangat berpengaruh pada pemulihan struktur yang terjadi. Pada saat pendinginan inilah terjadi kristalisasi.

Pembentukan inti kristal pada PP terjadi mulai dari temperatur kristalisasi sampai temperatur transisi glass atau sampai kristal yang telah tumbuh saling menyentuh kristal yang lain. Temperatur kristalisasi adalah temperatur di antara temperatur transisi glass dan temperatur leleh, yang mana pada temperatur ini mulai terjadi pertumbuhan inti kristal. Pembentukan inti kristal ini berawal ketika beberapa segmen molekul polimer mengatur diri pada arah yang sama dan membentuk kisi secara beraturan. Pertumbuhan kisi yang beraturan ini berlanjut membentuk struktur berlapis-lapis yang disebut dengan lamela. Lamela akan terus tumbuh dengan arah pertumbuhan yang beragam menjauhi inti kristal sehingga membentuk spherulite berupa bola^[36]. Gambar 2.13 di bawah ini memperlihatkan struktur dari *spherulite* pada fasa kristalin berlapis.



Gambar 2.13. Struktur *spherulite* yang tersusun dari fasa kristalin berlapis (*lamellar*)^[34]

Penambahan *nucleating agent* pada polimer menyebabkan pertumbuhan inti kristal lebih cepat, sehingga inti yang terbentuk lebih banyak. Dengan semakin banyak inti kristal, maka kristal-kristal yang terbentuk akan semakin mudah bersentuhan satu sama lain dan pertumbuhan kristal akan berhenti^[35].

2.4. Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride (PP-g-MA)

Kopolimer merupakan polimer yang tersusun dari dua jenis atau lebih monomer yang berbeda. Sehingga terdapat beberapa kemungkinan terbentuknya struktur rantai polimer. Struktur rantai kopolimer dapat berupa kopolimer acak (*random*), kopolimer berselang-seling (*alternating*), kopolimer blok (*block*), atau kopolimer cangkok (*grafting*). PP-g-MA merupakan polimer yang terbuat dengan proses kopolimerisasi antara PP dengan *Maleic Anhydride*. Sifat-sifat *Maleic Anhydride* adalah sebagai berikut^[37]:

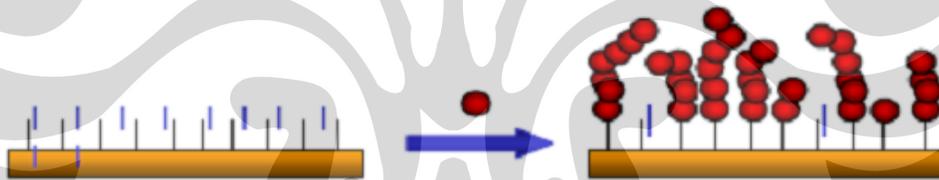
Tabel 2.5. Sifat-sifat *Maleic Anhydride*^[37]

Sifat	Nilai
Berat molekul	98,06 gr/mol
Struktur molekul	C ₄ H ₂ O ₃
Wujud	Serpihan putih

Sifat	Higroskopis
Berat jenis	1.480 Kg/L
Titik leleh	52.8 °C
Titik didih	2020 °C

Compatibilizer PP-g-MA lebih sering digunakan untuk matriks PP dengan *filler clay*. Pada penelitian ini, polipropilen yang non-polar membutuhkan *compatibilizer* guna memungkinkan terjadinya kontak antara PP dengan lapisan karbon. Maka dilakukan penambahan kopolimer PP-g-MA.

Polipropilen akan kompatibel dengan PP dari PP-g-MA, sedangkan gugus MA (polar) yang tercangkok pada polipropilen akan meningkatkan kepolaran PP-g-MA (kepolaran bergantung dengan jumlah anhidrida maleat yang tercangkok), sehingga PP-g-MA akan memiliki polaritas yang sesuai dengan *filler* dan akan menyusup masuk diantara galeri *filler*. Secara skematis proses pencangkokan PP-g-MA dapat dilihat pada gambar 2.14 di bawah ini:



Gambar 2.14. PP-g-MA tercangkok pada galeri *filler*^[7]

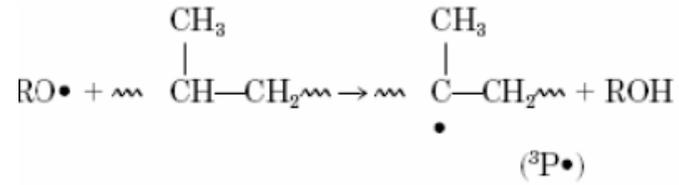
Secara teoritis, PP-g-MA dengan kompatibilitas yang baik terhadap *filler* (memiliki derajat polaritas yang hampir sama dengan *filler*) akan berikatan dengan *filler*, namun ikatan yang terjadi juga dapat didasarkan pada ikatan kovalen, yakni *ester linkage*. Pada sistem komposit PP-*filler*, ikatan kovalen yang terjadi adalah antara gugus OH dari *filler* dengan gugus C=O pada anhidrida maleat dari PP-g-MA.

Mekanisme reaksi proses pencangkokan anhidrida maleat pada polipropilen adalah sebagai berikut^[38]:

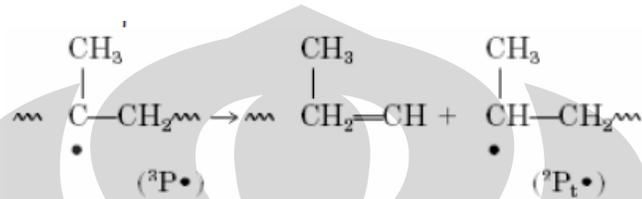
- Dekomposisi dari inisiator



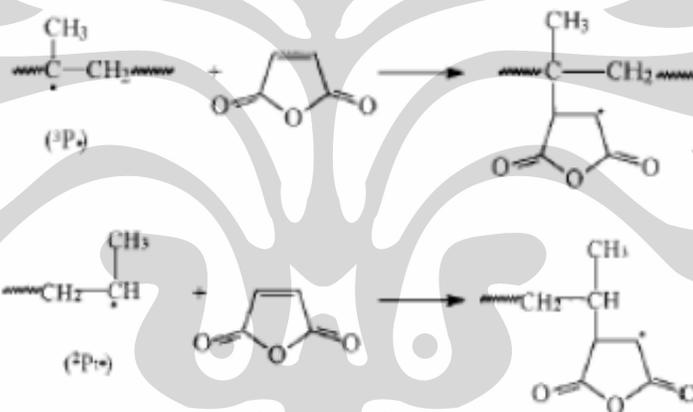
➤ *Abstraction of Hydrogen*



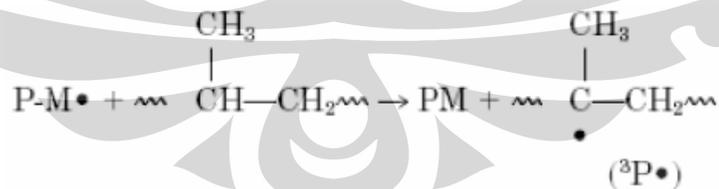
➤ *β Scission*



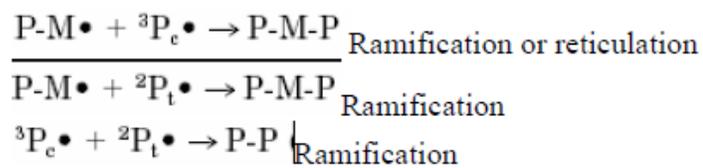
➤ *Grafting of Maleic Anhydride*



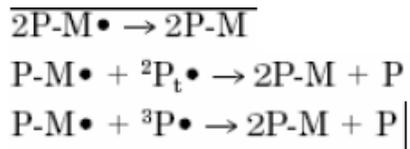
➤ *Chain Transfer*



➤ *Termination by Combination*



➤ *Termination by Disproportioning*



Keterangan:

- $2P_t\bullet$ adalah radikal pada karbon sekunder;
- $3P\bullet$ adalah radikal pada karbon tersier;
- P adalah rantai polipropilen;
- M adalah anhidrida maleat; dan
- P-M adalah succinic radical

Reaksi pencangkokan (*grafting*) anhidrida maleat pada polipropilen dalam proses ini melibatkan reaksi polimer leleh dengan anhidrida maleat yang dipengaruhi adanya peroksida organik.

Peroksida organik tidak stabil secara termal dan mengalami pemutusan ikatan-ikatan oksigen membentuk radikal bebas. Radikal bebas ini akan mengambil atom hidrogen dari rantai polipropilen sehingga membentuk mikroradikal di rantai polimer dimana secara teori ketika anhidrida maleat ditambahkan akan terjadi proses pencangkokan (*grafting*). Untuk mendapatkan kondisi optimum dari proses pencangkokan adalah suatu penelitian yang sulit yang melibatkan banyak variabel diantaranya: jenis dan konsentrasi peroksida, konsentrasi *Anhidrida Maleat*, waktu reaksi, temperatur reaksi, kecepatan rotor, urutan penambahan berbagai reagen, serta ada atau tidaknya *stabilizer*^[38].

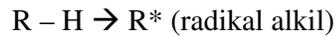
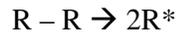
2.5. Anti-oksidan

Seperti polimer pada umumnya, kelemahan utama PP adalah mudah mengalami kerusakan akibat degradasi. Proses degradasi akan menghasilkan radikal bebas yang akan merusak rantai molekul secara berkesinambungan sehingga kualitas polimer akan terus menurun. Degradasi akibat oksidasi seperti ini dapat dikurangi dan dicegah dengan menggunakan aditif antioksidan^[39].

Degradasi adalah pemutusan rantai molekul polimer akibat adanya pengaruh cahaya, panas, atmosfer, dan lingkungan. Material polimer yang telah mengalami degradasi akan mengalami oksidasi dengan sendirinya (auto-oksidasi),

membentuk radikal peroksida, kemudian radikal ini akan merusak rantai polimer lain, sehingga proses perusakannya akan terus-menerus terjadi^[40]. Secara umum reaksi degradasi polimer adalah sebagai berikut^[41]:

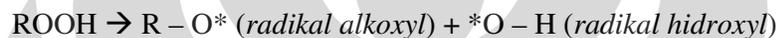
➤ *Chain initiation* (langkah pengaktifan)



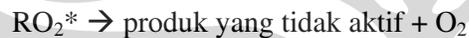
➤ *Chain propagation*



➤ *Chain branching*



➤ *Chain termination*



Degradasi akibat oksidasi seperti ini dapat dikurangi dan dicegah dengan menggunakan aditif antioksidan. Antioksidan adalah suatu zat aditif yang berfungsi untuk mencegah terjadinya reaksi oksidasi oleh udara/oksigen yang dapat menyebabkan polimer terdegradasi^[40].

Antioksidan dibagi dua jenis menurut fungsi mekanisme pencegahan oksidasi yaitu antioksidan primer dan antioksidan sekunder. Antioksidan primer berfungsi dengan mendonasikan hidrogen ke reaksi radikal bebas peroksi untuk mencegah tahap propagasi. Antioksidan sekunder menghambat oksidasi dengan menyiapkan proliferasi alkoksi dan radikal hidroksi dengan mengurangi hidroperoksida menjadi produk yang tidak reaktif. Kombinasi kedua antioksidan menghasilkan perpaduan yang sinergi. Antioksidan primer memiliki tiga tipe yaitu amina, fenolik dan garam metal. Tipe fenolik adalah jenis yang lebih umum digunakan sebagai contoh fenolik sederhana antara lain bisfenolik, polifenolik dan tiobisfenolik. Contoh amina adalah dari jenis arilamina, sedangkan jenis antioksidan sekunder berupa organofosfit, tioester dan metal deaktivator.

2.6. Serat Karbon

Serat karbon disintesis dari rayon, poliakrilonitril (PAN), dan pitch dengan menghilangkan hidrogen dan nitrogen dalam kondisi atmosfer inert. Serat karbon yang diproduksi dari poliakrilonitril (PAN) melalui tiga tahap proses, yaitu; stabilisasi (peregangan dan oksidasi), karbonisasi (pemanasan untuk mengurangi O, H, N), dan grafitisasi (meningkatkan modulus elastisitas).

Tabel 2.6. Perbandingan Sifat Serat Karbon Berdasarkan Bahan Dasarnya^[7]

Sifat-sifat	Pitch	Rayon	PAN
Kekuatan tarik (Gpa)	1.55	2.06-2.75	2.50-3.20
Modulus tarik (Gpa)	370	380-550	210-400
<i>Short beam shear</i> (Mpa)			
- <i>Untreated</i>	41	28	26-68
- <i>Treated</i>	68	56	56-120
Berat spesifik	2.0	1.7	1.8
Elongasi (%)	1	-	1.2-0.6
Diameter serat (μm)	-	6.5	7.5

Berdasarkan pada bahan baku dan kondisi pemrosesan, dihasilkan empat jenis kualitas serat karbon, biasanya dibedakan berdasarkan kekuatannya. Biasanya permukaan serat dioksidisasi sebagian dan diperkecil untuk meningkatkan dispersi dan pembasahan (*wetting*) pada proses lebih lanjut. Potongan serat karbon tersedia dalam ukuran 0,5 - 6 mm. Serat karbon memiliki kekuatan, ketahanan kimia, dan konduktivitas listrik serta konduktivitas panas yang sangat baik. Nilai koefisien muai panas linier dalam arah serat adalah negatif, sehingga efek ini dapat digunakan untuk mencegah penyusutan material komposit. Sistem komposit serat karbon menunjukkan performa yang bagus, sehingga secara luas digunakan dalam berbagai aplikasi^[39].

2.7. Grafit

Grafit digolongkan menjadi dua jenis, yaitu alami dan sintetik. Grafit sintetik lebih murni dibandingkan grafit alami. Grafit sintetik merupakan produk yang

dibuat dari material karbon amorf melalui proses perlakuan temperatur tinggi. Grafit digunakan sebagai bahan pengisi khususnya dalam matriks polimer karena memiliki konduktivitas listrik dan panas yang baik, serta memiliki sifat-sifat pelumasan (lubricant). Karena strukturnya yang berlapis, grafit memberi sifat kekakuan dan dimensi yang stabil terhadap polimer^[39].

Grafit sintetik digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti; pengecoran logam, karbon elektrik, pelat bipolar fuel cell, pelapisan, proses elektrolitik, sebagai bahan pengisi konduktif, campuran karet dan plastik, serta untuk aplikasi pemboran. Partikel grafit sintetik berukuran 2 μm (bubuk) sampai 2 cm (potongan-potongan) dengan kandungan 99% karbon^[42].

Tabel 2.7. Sifat-sifat Umum Grafit^[7]

Sifat-sifat	Keterangan
Komposisi kimia	C (80-99,7%), Fe ₂ O ₃ < 0,2%
Kerapatan	2- 2,25 gr/cm ³
Titik lebur	4027 - 4427 °C
Kapasitas panas	8,517 (25 °C) J.mol ⁻¹ .K ⁻¹
Konduktivitas panas	200 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Kekerasan	1 - 2 Mohs scale
Hambatan volume	800 – 2500 Ωcm
Warna	Hitam keabu-abuan
Struktur kristal	Hexagonal

2.8. Carbon Nano Tube (CNT)

CNT atau dikenal juga dengan *buckytube* adalah alotrop karbon dengan struktur nano silinder. *Nanotube* telah dibuat dengan perbandingan panjang terhadap diameter hingga 132,000,000:1 yang secara signifikan lebih besar dibandingkan material lain^[43]. CNT menunjukkan kekuatan yang luar biasa, sifat elektrik yang unik, dan konduktor termal yang efisien. Oleh karena itu, CNT banyak digunakan untuk teknologi nano, elektronik, optik, bidang ilmu material lain, serta untuk pembuatan *body armor*.

Silinder CNT sering digambarkan sebagai lembaran-lembaran *graphene* (bagian dari struktur grafit) yang digulung^[44]. Silinder yang dibentuk dikarakterisasi berdasarkan diameter dan sudut kiralnya (*chiral angle*), atau oleh nilai indeks (n,m). struktur CNT bernilai indeks (n,0) disebut struktur *zigzag*. Jika nilai indeksnya (n,n), strukturnya *armchair*. Struktur lainnya disebut *intermediate* (antara *zigzag* dan *armchair*).

Jenis-jenis dari CNT meliputi:

➤ *Single walled* (SWCNT)

Sebagian besar *single walled nanotubes* memiliki diameter mendekati 1 nanometer, dengan panjang tabung jutaan kali lebih panjang. Struktur SWNT dapat dikonseptualisasikan dengan membungkus *graphene* dalam sebuah silinder tanpa sambungan.

SWNT merupakan jenis CNT yang penting karena dapat menunjukkan sifat listrik yang tidak dimiliki CNT berjenis MWNT. *Band gap* SWNT bervariasi dari 0 sampai sekitar 2 eV dan konduktivitasnya dapat menunjukkan sifat logam atau semi konduktor, sedangkan MWNT adalah logam dengan *gap* 0.

➤ *Multi walled* (MWCNT)

Multi-walled nanotubes (MWNT) terdiri dari lapisan gulung ganda dari grafit. Ada dua model MWNT, yaitu model *Russian Doll* dan *Parchment*. Pada *Russian Doll*, lembaran grafit tersusun dalam silinder konsentris. Pada *Parchment*, satu lembar grafit tergulung sendiri, menyerupai gulungan kertas. Jarak antar lapisan dalam MWNT mendekati jarak antara *graphene* dalam grafit sekitar 3.4 Å.

Double-walled carbon nanotubes (DWNT) memiliki morfologi dan sifat yang mirip dengan SWNT tetapi ketahanan kimia lebih baik. DWNT diperoleh melalui reduksi larutan oksida dalam metana dan hidrogen.

➤ *Torus*

Nanotorus secara teoritis digambarkan sebagai CNT yang ditekuk menjadi sebuah torus (berbentuk donat). Nanotorus memiliki momen magnet yang besar. Momen magnet dan stabilitas termal bervariasi tergantung pada jari-jari torus dan jari-jari tabung.

➤ *Nanobud*

Carbon nanobuds dibuat dengan menggabungkan CNT dan *fullerene*. Pada material ini, *fullerene* seperti ‘tunas/buds’ berikatan secara kovalen pada dinding samping luar dari CNT sebagai dasarnya. Material *hybrid* ini memiliki sifat keduanya *fullerene* dan CNT. Dalam material komposit, *fullerene* yang merekat dapat berfungsi sebagai jangkar molekul yang dapat mencegah terjadinya slip dari *nanotube*, sehingga meningkatkan sifat mekanis komposit tersebut.

➤ *Cup stacked CNT*

Cup-stacked carbon nanotubes (CSCNTs) berbeda dari struktur karbon quasi-1D lain yang bersifat konduktor. CSCNTs menunjukkan sifat semi konduktor karena struktur mikro tumpukan lapisan *graphene*.

➤ *Extreme CNT*

- ✓ CNT terpanjang sepanjang 18.5 cm (tahun 2009) didapat melalui penumbuhan di substrat Si menggunakan metode CVD yang ditingkatkan. CNT ini merepresentasikan deretan seragam dari SWNT.
- ✓ CNT terpendek merupakan senyawa organik *cycloparaphenylene* (tahun 2009).
- ✓ CNT paling tipis adalah CNT *armchair* dengan diameter 3 Å. Nanotube ini tumbuh di dalam MWNT.
- ✓ SWNT *freestanding* tertipis berdiameter sekitar 4.3 Å dan ditemukan dalam DWNT.

Tabel 2.8. Perbandingan sifat mekanis dari CNT dengan material lain^[45]

Fiber Material	Specific Density	E (TPa)	Strenght (GPa)	Strain at Break (%)
Carbon Nanotube	1.3 - 2	1	10 - 60	10
HS Steel	7.8	0.2	4.1	< 10
Carbon Fiber - PAN	1.7 - 2	0.2 - 0.6	1.7 - 5	0.3 - 2.4
Carbon Fiber - Pitch	2 - 2.2	0.4 - 0.96	2.2 - 3.3	0.27 - 0.6
E/S - glass	2.5	0.07 / 0.08	2.4 / 4.5	4.8
Kevlar* 49	1.4	0.13	3.6 - 4.1	2.8

Tabel 2.9. Perbandingan konduktivitas thermal dan listrik CNT dengan material lain ^[45]

Material	Thermal Conductivity (W/m.k)	Electrical Conductivity
Carbon Nanotubes	> 3000	10 ⁶ - 10 ⁷
Copper	400	6 × 10 ⁷
Carbon Fiber - Pitch	1000	2 - 8.5 × 10 ⁶
Carbon Fiber - PAN	8 - 105	6.5 - 14 × 10 ⁶

Metode sintesis CNT diantaranya adalah:

➤ *Arc-Evaporation Method / Arc Discharge Method*

Metode ini dilakukan dengan memberikan arus listrik sebesar 50 ampere hingga 100 ampere diantara dua elektroda grafit di dalam atmosfer gas helium [LL]. Keadaan ini akan menyebabkan terjadinya penguapan grafit dimana sebagian akan terkondensasi pada dinding bejana dan sebagian lain pada katoda. Teknik *arc discharge* telah diterapkan sejak 1991 untuk memproduksi *fullerenes*. Metode ini memiliki *yield* lebih dari 30% persen berat dan dapat digunakan untuk memproduksi baik *single* maupun *multi-walled* CNT. *Single-walled* CNT didapatkan dengan menambahkan Co dan Ni pada anoda^[46].

➤ *Laser Ablation Method*

Metode ini dilakukan dengan memanfaatkan laser berkekuatan tinggi untuk menguapkan target metal-grafit^[46]. Proses dilakukan dalam suatu atmosfer gas inert pada temperatur tinggi. CNT akan terbentuk pada permukaan yang lebih dingin sebagai produk kondensasi uap metal-grafit. Permukaan yang dingin tersebut didapat dengan mendinginkan menggunakan air^[43].

➤ *Chemical Vapor Deposition (CVD) Method*

Metode CVD ini merupakan metode yang paling banyak digunakan dalam produksi CNT komersial. Untuk aplikasi komersial, partikel-partikel logam dicampur dengan MgO atau Al₂O₃ sebagai katalis alternatif untuk meningkatkan area kontak. Permasalahan yang timbul adalah bahwasanya katalis tersebut hanya dapat dilarutkan dengan asam yang dapat membahayakan struktur CNT. Sehingga perlu dikembangkan katalis alternatif yang larut dalam air^[43].

2.9. Nano Tembaga (Cu Nano)

Nano tembaga (Cu nano) adalah pada dasarnya sama seperti partikel tembaga pada umumnya. Yang membedakan disini adalah ukuran partikel berskala nano yaitu skitar 20 nm. Penampakan nano tembaga biasanya berupa kecoklatan atau merah bata dengan bentuk *spherical*. Nano tembaga ditambahkan kedalam komposit dengan tujuan utama untuk meningkatkan nilai konduktivitas komposit. Disamping itu keistimewaan yang dimiliki nano tembaga adalah rendahnya nilai densitas partikel tersebut. Densitas partikel nano tembaga adalah sekitar 0.15 – 0.35 g/cm³.

Pada komposit pelat bipolar, partikel nano tembaga ditambahkan sebagai penguat untuk meningkatkan sifat mekanis dan konduktivitas listrik pelat bipolar. Bentuk dari serbuk / partikel nano tembaga dapat dilihat pada gambar 2.15 di bawah ini:



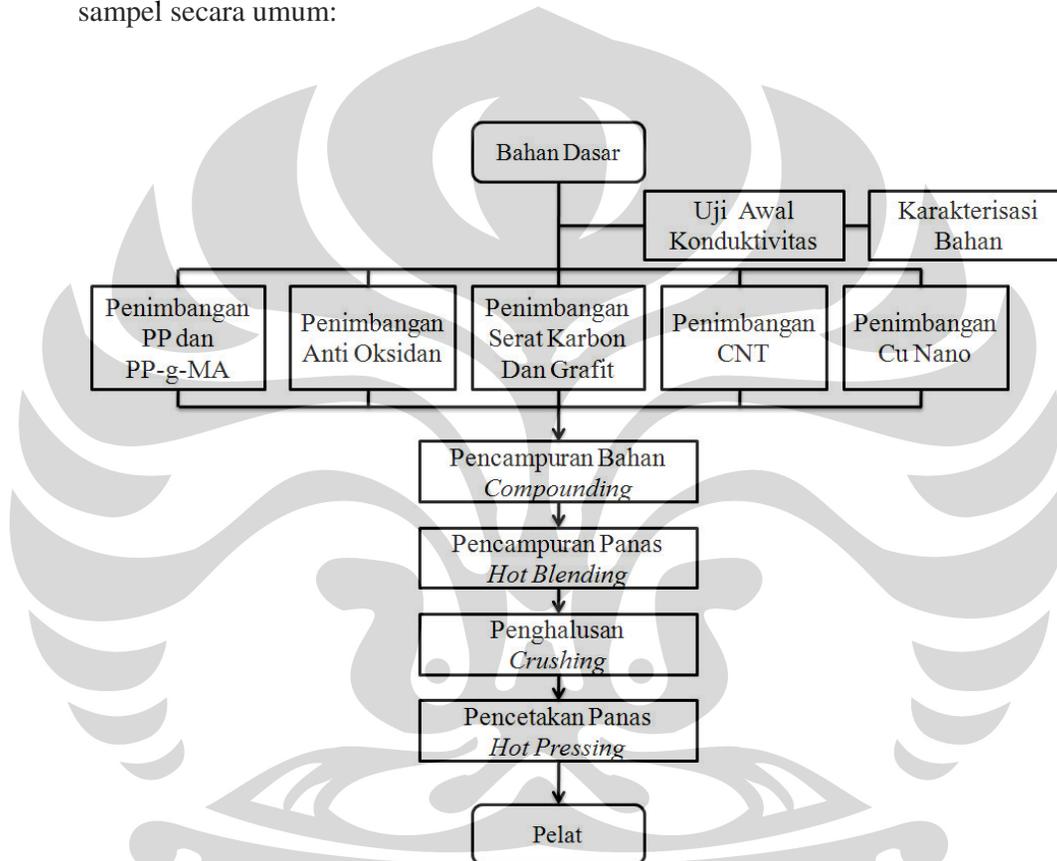
Gambar 2.15. Serbuk nano tembaga

BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

3.1.1. Diagram Alir Preparasi dan Fabrikasi Sampel

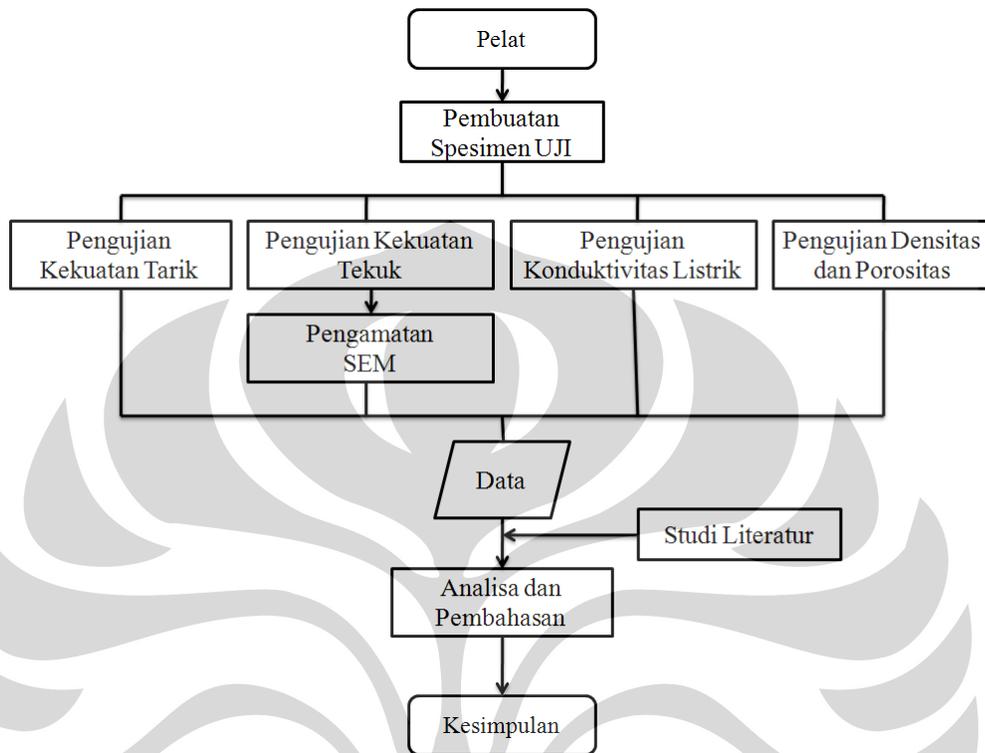
Gambar 3.1 di bawah ini menunjukkan proses preparasi dan fabrikasi sampel secara umum:



Gambar 3.1. Diagram alir preparasi dan fabrikasi sampel

3.1.2. Diagram Alir Pengujian

Gambar 3.2 di bawah ini menunjukkan proses pengujian sampel pelat.



Gambar 3.2. Diagram alir proses pengujian sampel

3.2. Komposisi Bahan

Dalam penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah penambahan material penguat (*reinforcements*) nano tembaga (Cu Nano). Penelitian ini mengkaji pengaruh variabel bebas tersebut terhadap peningkatan sifat mekanis dan konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis komposit termoplastik ini. Variable terikat dari penelitian ini meliputi sifat konduktivitas listrik pelat bipolar, serta sifat fisis dan mekanis dari pelat bipolar. Sedangkan variable control yang digunakan dalam penelitian ini meliputi fraksi volume matriks polipropilena (PP), *Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride* (PP-g-MA), antioksidan CN-CAT A215, penguat serat karbon Fortafil 243, penguat grafit 4012, dan penguat *carbon nanotubes* (CNT).

Tabel 3.1 berikut ini menunjukkan komposisi dan pengkodean seluruh sampel yang diteliti:

Tabel 3.1. Komposisi dan Pengkodean Formulasi Bahan

Jenis Bahan	Satuan	F1	F2	F3
Polipropilena (PP)	%wt	13.25	12.75	11.75
	gram	66.25	63.75	58.75
Serat Karbon Fortafile 243	%wt	50	50	50
	gram	250	250	250
Grafit 4012	%wt	30	30	30
	gram	150	150	150
PP-g-MA	%wt	5	5	5
	gram	25	25	25
Anti Oksidan CN-CAT A215	%wt	1	1	1
	gram	5	5	5
CNT (<i>Carbon Nano Tube</i>)	%wt	0.25	0.25	0.25
	gram	1.25	1.25	1.25
Nano Tembaga (Cu Nano)	%wt	0.5	1	2
	gram	2.5	5	10
Total	%wt	100	100	100
	gram	500	500	500

3.3. Peralatan dan Bahan

3.3.1. Peralatan

3.3.1.1. Peralatan Preparasi Sampel

Tabel 3.2. Peralatan Preparasi Sampel Pengujian

Nama Alat	Spesifikasi	Foto Alat
Neraca Massa Digital	Timbangan Digital Kapasitas 1 kg Ketelitian : 0,01 gram Lab.Metalurgi Proses DTMM FTUI	
XRF (X-Ray Fluorescence)	Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK	-

Nama Alat	Spesifikasi	Foto Alat
Dapur Pemanas	Merek Carbolite RH1600 Kapasitas 1600°C Lab.Metalurgi Mekanik DTMM FTUI	
Jangka Sorong Digital	Merek Mitutoya Range Ukur : 150mm Ketelitian : 0,001mm Lab.Listrik&Kemagnetan BATAN (PUSPIPTEK)	
Mesin <i>Pressing</i> Spesimen Uji Konduktivitas Listrik	Merek Krisbow Unit Preparasi Spesimen Lab.Listrik&Kemagnetan BATAN (PUSPIPTEK)	
Pompa Hidrolik Mesin <i>Pressing</i>	Merek Krisbow Kapasitas 800 Bar Unit Preparasi Spesimen Lab.Listrik&Kemagnetan BATAN (PUSPIPTEK)	
<i>Dies Pelletizing</i> Spesimen Pengujian Konduktivitas Listrik	Diameter 100 mm Bahan : <i>Tool Steel</i> Unit Preparasi Spesimen Lab.Listrik&Kemagnetan BATAN (PUSPIPTEK)	

Nama Alat	Spesifikasi	Foto Alat
Elektroda dan Penjepit Spesimen Pengujian Konduktivitas Listrik	Bahan : Tembaga (Cu) Diameter Pelat : 10 mm Lab.Listrik&Kemagnetan BATAN (PUSPIPTEK)	
Neraca Massa Digital	Merek Kapasitas : Ketelitian : PT.Pertamina Laboratory and Technical Services Pulogadung	
<i>Hot Blender (Internal Mixer)</i>	Rheomix Haake 3000 dan Rheocord 90 Kapasitas : 250 gram PT.Pertamina Laboratory and Technical Services Pulogadung	
<i>Crusher</i>	KPi Crusher Tipe KF-808-B HP-3 Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK Serpong	
<i>Hot Pressing Machine</i>	Collin Hot Press Presse 300P Temperatur : 240°C Tekanan : 200 Bar Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK	

Nama Alat	Spesifikasi	Foto Alat
<i>Milling Machine</i>	Rema 2000 Tipe DS04/175 Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK Serpong	
<i>Conditioning Chamber</i>	Spesifikasi Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK Serpong	
<i>Punch Machine</i>	Toyoseiki Mini Test Pres – 10 Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK Serpong	
<i>Mesin Pressing</i> Spesimen Uji Konduktivitas Listrik	Unit Preparasi Spesimen <i>Lab. Fuel Cell</i> Pusat Penelitian Fisika LIPI Kawasan PUSPIPTEK	
<i>Dies Pelletizing</i> Spesimen Pengujian Konduktivitas Listrik	Unit Preparasi Spesimen <i>Lab. Fuel Cell</i> Pusat Penelitian Fisika LIPI Kawasan PUSPIPTEK	

Nama Alat	Spesifikasi	Foto Alat
<i>Sputter Coater</i>	Polaron SG 7610 Pusat Penelitian Metalurgi (P2M) LIPI PUSPIPTEK, Serpong	

3.3.1.2. Peralatan Karakterisasi Sampel

Tabel 3.3. Peralatan Karakterisasi Sampel

Nama Alat	Spesifikasi	Foto Alat
<i>Electrical Conductivity Tester</i>	LCR Meter ASTM B-193 Frekuensi : 0,1 Hertz – 100 Kilo Hertz Lab.Listrik&Kemagnetan BATAN (PUSPIPTEK)	
<i>Tensile Tester</i>	Shimadzu Universal Testing Machine AGS-100kNG ASTM D638 (Uji Tarik) ASTM D790 (Uji Tekuk)	
<i>Flexural Tester</i>	Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK Serpong	

Nama Alat	Spesifikasi	Foto Alat
<i>Four Point Probe Electrical Conductivity Instrument</i>	Lab. <i>Fuel Cell</i> Pusat Penelitian Fisika LIPI Kawasan PUSPIPTEK Serpong	
<i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	Spesifikasi : JEOL/EO JSM 6390 Pusat Penelitian Metalurgi (P2M) LIPI PUSPIPTEK, Serpong	

3.3.2. Bahan

3.3.2.1. Polipropilena (PP)

Polipropilena (PP) yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Cosmoplene Polypropylene Block Copolymer* dengan *grade* AH561. Produsen yang memproduksi polipropilena (PP) jenis adalah The Polyolefine Company (TPC) yang berbasis di Singapura. Polipropilena yang digunakan dalam penelitian ini berwarna putih dan berbentuk butiran pelet.

Tabel 3.4. Spesifikasi *Cosmoplene Polypropylene Block Copolymer* Grade AH561^[13]

Nama Produk	Kopolimer Blok Polipropilena COSMOPLENE®		
Kode	AH561		
Karakteristik	Sifat aliran sedang-tinggi, ketahanan impak tinggi, kekakuan tinggi		
Aplikasi	Wadah, kursi, baterai, tempat duduk, komoditas		
Sifat	Satuan	Metode Pengujian	
Laju aliran lelehan (<i>Melt Flow Rate/MFR</i>)	3	gram/10 menit	ASTM D1238

Tabel 3.4. Spesifikasi *Cosmoplene Polypropylene Block Copolymer* Grade AH561^[13] (lanjutan)

Kerapatan massa (Densitas)	0,9	gram/cm ³	ASTM D1505
Kekuatan Impak	23°C = 24,5 -20°C = 4,7	kJ/m ²	ASTM D256
Modulus Tekuk	1080	Mpa	ASTM D790
Kekuatan Luruh (<i>Yield Strength</i>)	24,5	Mpa	ASTM D638
Kekuatan Tarik (<i>Ultimate Tensile Strength</i>)	30,4	Mpa	ASTM D638
Elongasi	680	%	ASTM D638
Kekerasan Rockwell	85	Skala Rockwell	ASTM D785
HDT	112	°C	ASTM D648
Penyusutan MD-TD	15/15	1/1000	-

3.3.2.2. *Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride* (PP-g-MA)

Tabel 3.5. Spesifikasi *Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride* (PP-g-MA)^[13]

Komposisi Kimiawi	C ₄ H ₂ O ₃	
Bentuk	Serpihan atau <i>flake</i>	
Warna	Putih	
Sifat	Higroskopis	
Sifat		Satuan
Berat Molekul	98,06	gram/mol
Titik Leleh	52,8	°C
Titik Didih	202	°C

3.3.2.3. Anti-Oksidan CN-CAT B215

Tabel 3.6. Spesifikasi Anti-Oksidan CN-CAT B215^[13]

Bentuk	Bubuk
Warna Serbuk	Putih
Warna Larutan	Bening
Komposisi	A 168 : 61,5% - 71,5% A1010 : Sisanya
TGA (100°C, 2 jam)	Maksimum 0,5%
Transmittance	
425 nm	Minimum 96%
500 nm	Minimum 98%

3.3.2.4. Serat Karbon Fortafil 243

Tabel 3.7. Spesifikasi dari *Chopped Carbon Fiber Fortafil 243*^[13]

Panjang rata-rata	3 mikron
<i>Aspect ratio</i> (perbandingan antara panjang/diameter)	460
Jenis serat	<i>Chopped fiber</i> (serat terpotong atau serat diskontinus)
Bentuk serat	<i>Flake</i> atau serpihan
Kekuatan tarik	>3450 Mpa
Modulus tarik atau modulus Young (<i>tensile modulus</i>)	>207 Gpa
<i>Ultimate elongation</i>	1,7%
Densitas	1,8 gram/cm ³
<i>Cross-sectional area/filament</i>	3,3 x 10 ⁻⁵ mm ²
Diameter filamen	6 mikron
<i>Electrical resistivity</i>	1,67 miliOhm.cm
Panjang <i>fiber</i>	3 mm
Konduktivitas listrik	598 S/cm

3.3.2.5. Grafit 4012

Grafit merupakan salah satu penguat karbon yang paling konduktif. Penggunaan grafit ini juga dapat meningkatkan sifat kemampuprosesan (*processability*) dari komposit termoplastik ini. Hal ini dikarenakan sifat dari grafit yang mampu melubrikasi atau melumasi lelehan pada saat proses fabrikasi sehingga dapat meningkatkan laju aliran lelehan. Selain itu grafit juga mampu meningkatkan sifat mekanis dari komposit termoplastik ini.

3.3.2.6. CNT (*Carbon Nano Tube*)

Tabel 3.8. Spesifikasi *Carbon Nano Tube* (CNT)^[47]

Jenis CNT	<i>Single wall</i>
Berat bersih (netto)	10 gram
Diameter luar (<i>outer diameter</i>)	1 – 2 nano meter
Panjang (<i>length</i>)	~ 30 mikro meter
Kemurnian CNT	> 95 wt%
Kemurnian SWCNT	> 90 wt%
Kandungan <i>Ash</i>	< 1,5 wt%
SSA	> 380 m ² /gram
Konduktivitas listrik (<i>electrical conductivity</i>)	> 100 S/cm

3.3.2.7. Nano Tembaga (Cu Nano)

Tabel 3.9. Spesifikasi Nano Tembaga (Cu Nano)^[48]

Nama Barang	Copper nanoparticle-50, Nano-copper powder
Ukuran partikel	20nm (XRD)
Distribusi ukuran	10-30nm
Kemurnian	99.9+%
Warna	Purple-brown or purplish black powder
Bentuk	spherical

Tabel 3.9. Spesifikasi Nano Tembaga (Cu Nano)^[48] (lanjutan)

specific surface area	10-35m ² /g
apparent density	0.15g/cm ³
TEM transmission Figure Description	Product shape as a spherical, good dispersed, no reunion

3.4. Prosedur Penelitian

3.4.1. Pengujian XRF (*X-Ray Fluorescence*) Bahan Serbuk Nano Tembaga

Pengujian kadar Cu dalam serbuk nano tembaga dengan menggunakan alat XRF (*X-Ray Fluorescence*) bertujuan untuk mengetahui tingkat kemurnian dari bahan nano tembaga. Latar belakang dilakukannya pengujian ini adalah karena terlihat adanya keanehan warna serbuk nano tembaga yang menyerupai kopi. Pengujian dilakukan di Sentra Teknologi Polimer (STP) PUSPIPTEK, Serpong. Sampel serbuk nano tembaga dianalisis secara langsung dengan menggunakan alat XRF dengan kondisi pengujian sebagai berikut:

- Luasan Analisis : 50µm (diameter)
- Voltage : 0 – 20 kV
- Waktu Scanning : 300 detik

3.4.2. Pengujian Awal Konduktivitas Listrik Bahan

3.4.2.1. Kompaksi Spesimen Uji

Proses kompaksi dilakukan pada bahan grafit, serat karbon, karbon hitam dan nano tembaga. Tujuan dilakukan kompaksi adalah untuk membuat bahan tersebut menjadi lebih padat dan lebih *compact* serta memiliki dimensi tertentu sehingga dapat dijadikan sebagai spesimen pengujian nilai konduktivitas listrik. Proses kompaksi ini sering dinamakan sebagai proses *pelletizing* karena produk yang dihasilkan berupa silinder pelet dengan diameter sekitar 1cm.

Peralatan yang digunakan dalam tahapan *pelletizing* ini adalah sebagai berikut:

- 1 unit mesin *pressing* dengan kapasitas 50 ton.
- 1 unit mesin pompa hidrolik.
- 1 unit cetakan pelet (*dies pelletizing*).
- 1 unit spatula.

Tahapan dalam kompaksi bahan untuk membuat spesimen adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan dan memasang komponen *dies pelletizing*.
2. Mengambil sekitar 3 spatula serat karbon fortafil 243 dan masukkan ke dalam *dies pelletizing*..
3. Menutup *dies pelletizing* dengan *dies* penekan dan menyiapkan posisinya pada mesin kompaksi.
4. Memompa tuas mesin pompa hidrolik sehingga tekanan proses kompaksi mencapai 100 bar, kemudian ditahan selama sekitar 10 menit.
5. Membuang tekanan dengan memutar katup hidrolik ke arah kiri sehingga tekanan menjadi 0 bar dan *dies pressing* naik kembali ke atas.
6. Buka bagian penutup bawah *dies pelletizing*, membalik posisi *dies* pada mesin penekan.
7. Memompa tuas mesin *pressing* sehingga tekanan yang ada mampu mendorong *dies* pendorong pada *dies pelletizing* hingga mengeluarkan produk hasil proses kompaksi.
8. Jika *dies* pendorong telah mendorong secara optimal maka tekanan kembali dibuang dengan memutar katup hidrolik ke arah kiri sehingga tekanan menjadi 0 bar dan *dies pressing* naik kembali.
9. Mengambil produk hasil kompaksi.
10. Mengulangi langkah yang sama seperti di atas untuk kompaksi grafit, karbon hitam dan nano tembaga.

3.4.2.2. Pengujian Konduktivitas Bahan dengan LCR Meter

Alat yang digunakan adalah LCR-Meter sesuai dengan standar ASTM B193. Alat ini dapat digunakan untuk mengukur sifat bahan yang meliputi induktansi, kapasistansi, dan konduktansi terhadap fungsi frekuensi^[7]. Frekuensi divariasikan antara 0,01 Hz sampai dengan 100 kHz. Parameter lain yang dapat diukur yaitu sudut fase terhadap fungsi frekuensi^[7].

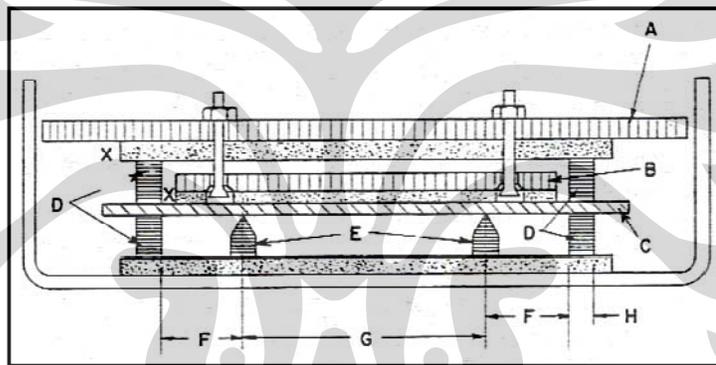
Dari pengujian dengan LCR Meter didapat data berupa besar nilai konduktansi (G) yang kemudian dibagi dengan perbandingan ketebalan dengan luas permukaan bidang (K) sesuai rumus di bawah ini untuk mendapatkan nilai konduktivitas listrik material^[7]:

$$\sigma = \frac{G}{K} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

Pengujian konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis komposit termoplastik menggunakan standar ASTM D991 untuk menghitung konduktivitas dalam bidang (*in-plane*) sampel^[4]. Rumus untuk menghitung nilai konduktivitas adalah sebagai berikut^[4]:

$$EC = \frac{I \times L}{V \times w \times t \times k} \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

Dimana EC adalah konduktivitas listrik (S/m), I adalah arus listrik (Ampere), L adalah jarak antara 2 titik tumpu (26 mm), V adalah tegangan listrik (volt), w adalah lebar sampel (mm), t adalah ketebalan sampel (mm), dan k adalah konstanta (0.001). Secara skematis diagram alat pengujian konduktivitas diperlihatkan dalam gambar 3.3 di bawah ini:



Gambar 3.3. Diagram Alat Uji Konduktivitas Dalam Bidang (*in-plane*) Sampel Berdasarkan Standarisasi ASTM D-991^[7]

Prosedur pengujian yang dilakukan adalah:

1. Menyiapkan sampel uji, kemudian mengukur panjang, lebar, serta ketebalan sampel.
2. Meletakkan sampel diantara dua pemegang cuplikan yang terbuat dengan tembaga, kemudian menjepit sampel dengan kuat. Jepitan tersebut terhubung dengan kabel terminal ke alat LCR meter.
3. Menyalakan alat dengan menekan tombol power
4. Mensetting parameter yang digunakan dalam pengujian antara lain batas *open circuit voltage*, batas voltase konstan, batas arus konstan, dan lain-lain.

5. Melakukan pengujian dalam rentang frekuensi antara 0.01 Hz hingga 100 kHz. Kemudian segera mengembalikan ke frekuensi rendah setelah pengukuran selesai dilakukan.
6. Mematikan alat dan melepaskan sampel dari alat.

3.4.2.3. Pengujian Konduktivitas Listrik Bahan dengan *Four Point Probe*

Prinsip pengujian dengan metode ini adalah dengan memberikan suatu arus listrik dan beda potensial tertentu terhadap spesimen uji sehingga nilai resistansi listrik dari material yang diuji dapat diketahui^[49]. Apabila nilai hambatan jenis dari suatu bahan diketahui maka nilai dari konduktivitas listrik bahan tersebut dapat dihitung.

Spesimen dibentuk sedemikian rupa hingga berbentuk lingkaran dengan diameter sekitar 2 cm ataupun berbentuk persegi empat dengan panjang sisi sekitar 2 cm. Proses pengampelasan terhadap permukaan spesimen uji juga merupakan faktor yang tidak kalah penting karena permukaan spesimen uji yang rata dan datar (*flat*) merupakan parameter yang harus dipenuhi dalam pengujian dengan metode ini^[49].

Prosedur pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut^[49]:

1. Menyiapkan bahan yang akan diuji dan memastikan permukaan spesimen cukup rata dan datar.
2. Mengamplas permukaan spesimen hingga permukaannya benar-benar datar dan rata.
3. Melakukan pengukuran ketebalan spesimen
4. Melakukan pengukuran diameter spesimen jika spesimen berbentuk lingkaran atau panjang sisi spesimen jika spesimen berbentuk persegi panjang.
5. Dengan menggunakan perekat *adhesive* berbasis *epoxy* spesimen uji direkatkan pada permukaan papan mika berbentuk persegi berukuran panjang sisi sekitar 10 cm.
6. Menyalakan perangkat *four point probe*.
7. Modus yang dipilih adalah pengukuran nilai hambatan jenis material.
8. Melakukan kalibrasi awal.

9. Setelah instrumen siap maka papan mika yang telah direkatkan spesimen uji direkatkan pada *chamber* perangkat *four point probe*.
10. Memasukkan nilai diameter atau panjang spesimen uji yang telah diukur.
11. Memasukkan nilai ketebalan dari spesimen uji yang telah diukur.
12. Jika alat sudah siap maka penekan pada bagian atas ditekan sehingga akan mendorong papan mika untuk tertekan ke dalam *chamber* pengujian.
13. Membaca nilai hambatan jenis bahan yang tertera pada *display*. Hambatan jenis bahan yang terbaca berada pada satuan Ωcm .
14. Langkah di atas diulangi sehingga diperoleh 3 hasil pengujian.
15. Untuk mendapatkan nilai konduktivitas bahan maka dapat dilakukan dengan formulasi sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{1}{R} \dots \dots \dots (3.3)$$

Dimana: σ : Konduktivitas listrik bahan (S/cm)
 R : Hambatan jenis bahan (Ωcm)

16. Menentukan nilai rata-rata dari ketiga pengujian yang telah dilakukan maka nilai tersebut adalah nilai konduktivitas bahan yang diuji.

3.4.3. Penimbangan Bahan

Penimbangan bahan dilakukan dengan menggunakan neraca massa digital dengan tingkat akurasi dan ketelitian yang cukup baik. Tahapan kerja penimbangan bahan adalah sebagai berikut^[51]:

1. Menyalakan timbangan digital.
2. Membuka jendela timbangan di sebelah kanan untuk memasukkan wadah tempat menimbang.
3. Meletakkan cawan petri sebagai wadah menimbang pada timbangan digital
4. Melakukan *re-zero*.
5. Membuka jendela timbangan sebelah kiri untuk memasukkan zat ke dalam wadah timbangan. (tangan kiri memegang botol zat, tangan kanan mengambil zat dengan spatula).
6. Menutup jendela timbangan dan lihat angka pada display timbangan. Apabila kelebihan atau kekurangan buka kembali jendela kemudian zat yang

ditimbang ditambahkan atau dikurangi. Jendela timbangan kembali ditutup. Ketika menimbang pastikan tidak ada zat yang jatuh ke dalam timbangan karena sulit dibersihkan. Jangan menimbang dengan berat lebih dari 50 gram

7. Setelah selesai menimbang, timbangan segera dimatikan kembali.

3.4.4. Pencampuran Kering (*Dry Mixing*)

Proses pencampuran kering dilakukan terhadap bahan dengan komposisi cukup besar seperti polipropilena (PP), anti-oksidan, PP-g-MA, serat karbon dan juga grafit. Penguat *carbon nano tube* (CNT) dan nano tembaga (Cu nano) tidak dilibatkan dalam pencampuran kering ini namun langsung ditambahkan pada saat proses *hot blending* atau pencampuran panas bahan, karena jumlah penguat yang digunakan cukup kecil dan kemungkinan akan banyak tertinggal pada wadah. Tahapan pencampuran kering (*dry mixing*) yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan baskom plastik ukuran besar untuk wadah pencampuran kering (*dry mixing*).
2. Memasukkan pellet polipropilena (PP) dan PP-g-MA yang telah ditimbang ke baskom dan aduk rata.
3. Memasukkan bubuk anti-oksidan yang telah ditimbang ke baskom dan aduk rata.
4. Memasukkan grafit yang telah ditimbang ke baskom dan aduk rata.
5. Memasukkan serat karbon yang telah ditimbang ke baskom dan aduk rata.
6. Proses pengadukan dan pencampuran harus dilakukan dengan baik sehingga tidak ada bahan yang tercecer ke luar wadah pencampuran.
7. Setelah selesai hasil proses pencampuran kering (*dry mixing*) ini kemudian dimasukan ke dalam wadah plastik untuk dikondisikan terlebih dahulu sebelum proses pencampuran panas (*hot blending*).
8. Langkah-langkah tersebut diulangi untuk pencampuran kering (*dry mixing*) formula 2 dan formula 3.

3.4.5. Pencampuran Panas (*Hot Blending*)

Pencampuran panas (*hot blending*) bahan dilakukan terhadap seluruh bahan dengan menggunakan alat Rheomix HAAKE 3000 yang dilengkapi dengan instrumen elektronik Rheocord 90. Mesin Rheomix HAAKE 3000 sendiri merupakan suatu *hot mixer* internal yang mampu mencampurkan beberapa jenis zat yang berbeda dengan cara melelehkan dan mencampurkannya^[5]. Mesin ini menggunakan 2 buah *screw* yang berputar secara berlawanan di dalam suatu *chamber* yang memiliki kapasitas penuh 379 gram^[5]. Namun, kapasitas optimal dari mesin Rheomix HAAKE 3000 agar pencampuran dapat berlangsung sempurna adalah sekitar 250 gram ($\pm 70\%$). Kapasitas ini diperhitungkan berdasarkan pemuai zat akibat kenaikan temperatur dan kemungkinan timbulnya gas akibat reaksi^[5]. Mesin Rheomix HAAKE 3000 ini terdiri dari 3 pelat di mana pelat pertama yang stasioner, dan pelat kedua serta pelat ketiga yang dapat dilepas^[5]. Pada mesin ini, *chamber* pencampuran berada pada pelat kedua yang dapat dibersihkan untuk mendapat *master batch* hasil proses *hot blending*^[5]. Adapun kondisi operasi yang digunakan pada proses pencampuran panas (*hot blending*) ini adalah :

- Temperatur : 180°C
- Deviasi : 0
- Waktu Pencampuran : Minimal 15 menit per satu kali *hot blending*

Tahapan pencampuran panas (*hot blending*) yang dilakukan dalam penelitian ini adalah^[52]:

1. Memastikan kesiapan dan kondisi alat dalam keadaan baik, serta parameter:
 - Perangkat yang akan digunakan apakah *mixer* atau *extruder*.
 - Kabel-kabel *heater* telah terhubung dengan baik.
 - Kabel-kabel *thermocouple* telah terhubung dengan baik.
 - Saluran udara pendingin silinder telah terhubung dengan baik.
2. Penggunaan *mixer*:
 - Membuka *valve* aliran udara pendingin pada saluran utama yang terletak pada dinding bawah *exhaust fan*.

- Membuka *valve* udara pendingin pada alatnya, yaitu pada perangkat *gear box* dengan memutar berlawanan arah jarum jam hingga udara keluar dari *nozzle* yang akan terdengar suara berdesis.
3. "ON" kan stop kontak *power* pada dinding di bagian bawah dan sekaligus "ON" kan juga stop kontak cabang yang berada di lantai sebanyak 2 buah stop kontak.
 4. "ON" kan *power software* Rheocord 90 dengan menggunakan kuncinya yang diputar searah jarum jam sambil ditarik sedikit ke depan sampai lampu indikator menyala. Tunggu beberapa saat sampai layar monitor menampilkan menu.
 5. Setelah menu tampil pada layar monitor, *cursor* akan berada pada posisi *set up*, maka harus:
 - Memindahkan posisi *cursor* ke posisi *calibration* kemudian *enter* dan tekan *yes*.
 - Tampilan menu *calibration* untuk *pressure* yang keseluruhannya menunjukkan angka nol, kemudian tekanlah *enter* satu per satu sampai angka terakhir.
 - Muncul tulisan "*red zero point*" secara berkedip-kedip, tunggu beberapa saat karena ini sedang berlangsung proses kalibrasi sampai kemudian muncul tulisan "*closed contact*" sesaat kemudian akan hilang dan proses kalibrasi telah selesai.
 6. Memindahkan posisi *cursor* ke posisi *set up* kemudian *enter* lalu muncul menu "identification" dan tekan *enter*. Ketiklah identifikasi material yang akan diproses, jenis material, jenis aditif yang ditambahkan, persentase aditif, tanggal pelaksanaan *blending*, nomor NP dan nomor PK pada inisiasi pelaksana secara ringkas dan jelas. Jika telah selesai maka tekan *enter*.
 7. Memindahkan posisi *cursor* ke posisi "*max time*" dan kemudian tekan *enter*.
 - Menginput waktu yang dibutuhkan untuk *blending*, yaitu 15 menit dan kemudian tekan *enter*.
 - Menginput *maximum torque*, yaitu level tertinggi pada grafik yang akan tampil dan kemudian tekan *enter*.

- Menginput *total torque*, yaitu batasan maksimum untuk *safety* di mana jika *torque* telah mencapai angka tersebut maka *rotor* secara otomatis akan berhenti berputar dan kemudian tekan *enter*.
 - Menginput batasan maksimum untuk temperatur, yaitu sebesar 180°C. Hal ini diperlukan untuk menjaga agar proses pemanasan tidak melampaui temperatur proses yang telah ditentukan.
8. Memindahkan *cursor* ke posisi "*Temperature*", kemudian tekan *enter* maka akan muncul tampilan menu yang akan menjelaskan pilihan alat yang akan digunakan, yaitu:
- Mixer, atau
 - Extruder
 - Menekan tombol M karena yang akan kita gunakan adalah *mixer*. Tekan *enter* maka akan muncul kotak dialog "*temperature zone*".
 - Menekan pada posisi *zone 1* dan tulis suhu operasi yang kita atur, yaitu sebesar 180°C dan kemudian tekan *enter*.
 - Menekan pada posisi *zone 2* dan tulis suhu operasi yang kita atur, yaitu sebesar 180°C dan kemudian tekan *enter*.
 - Menekan pada posisi *zone 3* dan tulis suhu operasi yang kita atur, yaitu sebesar 180°C dan kemudian tekan *enter*.
 - Menekan *escape* untuk kembali ke menu utama.
9. Memindahkan *cursor* ke posisi "*Rotor*" dan tekan *enter* maka akan muncul menu bertuliskan "*Main Aux*".
- Apabila menghendaki putaran rotor berputar dan berhenti sesuai dengan waktu *blending* secara otomatis maka tekan *enter* pada posisi "*Main*".
 - Apabila menghendaki putaran rotor ketika proses *blending* secara manual maka tekan *enter* pada posisi "*Aux*".
 - Mengetik pada menu "*Rotor Speed*" kecepatan putaran rotor yang kita kehendaki dalam satuan rpm dan kemudian tekan *enter*. Tekan *escape* untuk kembali ke menu utama.
10. Memindahkan *cursor* ke posisi "*Run*" dan tekan *enter*. Kemudian "ON" kan saklar *power* pada perangkat alat *gear box* maka lampu *heater* yang berwarna

merah dan putih/kuning akan menyala. Hal ini menandakan proses *heating* sedang berjalan selama kurang lebih 30 menit.

11. Setelah suhu yang diinginkan telah tercapai dengan ditandai oleh suara udara pendingin yang keluar dari *nozzle* pada bagian bawah silinder serta pada kotak menu di layar monitor, yaitu angka yang tertera pada lajur "*Deviation*" sudah mencapai nol maka berarti alat telah siap untuk dioperasikan.
12. "ON" kan saklar monitor pada perangkat *gear box*.. Kemudian pada layar monitor pindahkan *cursor* ke posisi "*Motor*" dan tekan *enter*. Motor akan mulai berputar dengan kecepatan putar yang telah kita tentukan sebelumnya secara otomatis.
13. Mempersiapkan alat "*Loading Clute*" dan "*Loading Tray*" sebagai wadah atau tempat untuk memasukan material yang akan diproses ke dalam *chamber*.
 - Menempatkan *loading clute* pada *chamber* kemudian dikunci agar posisinya stabil dengan memutar tuas penguncinya searah putaran jarum jam.
 - Menempatkan material yang akan diproses ke dalam *loading tray* sebagai perantara agar material dapat masuk ke dalam *chamber* dengan baik melalui *loading clute*.
14. Memasukan material hasil proses pencampuran kering (*dry mixing*) yang berada pada *loading tray* ke dalam *chamber* melalui *loading clute* secara perlahan sehingga tidak ada material yang tumpah ataupun tercecer. Jangan lupa untuk memasukan *carbon nanotube* (CNT) yang telah ditimbang secara presisi sebelumnya ke dalam *chamber* untuk proses pencampuran panas (*hot blending*).
15. Setelah material habis dan tidak ada yang tersisa pada *loading tray* maka tutup dan turunkan *floating chamber* ke arah bawah secara perlahan-lahan sampai terkunci.
16. Mengangkat *loading clute* dari *chamber* dan proses *blending* akan berjalan sesuai dengan waktu dan parameter proses yang telah kita atur.

17. Untuk menampilkan grafik antara temperatur dan *torque* pindahkan *cursor* ke posisi "Grafik" dan tekan *enter* maka pada layar monitor akan terlihat grafik yang menyatakan hubungan antara temperatur dengan *torque*.
18. Setelah waktu *blending* telah selesai sesuai dengan yang kita atur sebelumnya maka rotor akan berhenti berputar secara otomatis dan material hasil proses *blending* siap untuk dikeluarkan.
19. Menaikkan "*Floating Chamber*" sampai pada posisi di mana *pin* akan mengunci. Kemudian "OFF" kan *power heater* pada *gear box*.
20. Membuka tuas pengunci *plate* pada bagian depan (*plate zone 3*), keluarkan dari *holding stud*, bersihkan dan letakkan di atas *standing plate*. Kemudian setelah bersih gantungkan pada kaitan di *standing plate*.
21. Membuka *center section (plate zone 2)* ditarik ke depan sampai keluar seluruh material hasil proses *blending* dari *holding stud*, letakkan pada *standing plate*, bersihkan, keluarkan seluruh material yang melekat pada *chamber* dan letakkan pada wadah *stainless steel* kotak yang berada di bawahnya.
22. Membersihkan rotor, keluarkan seluruh material hasil proses *blending* yang melekat pada rotor, taruh seluruh material dari rotor tersebut pada wadah *stainless steel* di bawahnya.
23. Setelah material hasil proses *blending* telah didapatkan seluruhnya dan rotor beserta *chamber* telah bersih maka kita pasang kembali *plate zone 2* dan *plate zone 3* serta kencangkan juga tuas penguncinya. Kemudian "ON"kan kembali *power heater* agar suhu *setting* dapat dicapai kembali.
24. Untuk melaksanakan *blending* dengan formulasi berikutnya maka dapat dilakukan dengan mengikuti petunjuk mulai dari langkah ke-12.
25. Apabila proses pelaksanaan *blending* telah selesai maka tempatkan *cursor* ke posisi "*Exit*" dan tekan *yes* maka seluruh program akan "OFF" dan kunci panel diputar ke kiri berlawanan arah jarum jam sambil ditarik ke depan.

3.4.6. Penghalusan (*Crushing*)

Proses *crushing* ini dilakukan di Sentra Teknologi Polimer (STP), Serpong, dengan menggunakan mesin *Crusher* Kpi tipe KF-808-B. Tujuan utama

dari proses *crushing* ini adalah untuk mereduksi ukuran partikel yang berbentuk bongkahan hasil proses pencampuran panas (*hot blending*). Selain itu proses *crushing* juga bertujuan untuk membuat campuran komposisi bahan dalam komposit menjadi lebih homogen dan partikel-partikel karbon yang terdapat dalam komposit dapat terdispersi secara lebih merata ke seluruh matriks polimer sehingga memudahkan proses pencetakan panas (*hot pressing*)^[5]. Produk hasil proses *crushing* ini berbentuk granula dengan berbagai variasi ukuran. Adapun tahapan kerja proses *crushing* bahan ini adalah sebagai berikut^[5]:

1. Menyalakan mesin *crusher*.
2. Memasukkan gumpalan hasil proses pencampuran panas (*hot blending*) ke dalam mesin *crusher*.
3. Setelah proses penghancuran selesai maka mesin dimatikan lalu dibuka dan dibersihkan dari sisa hasil *crushing*.

3.4.7. Pencetakan Panas (*Hot Pressing*) dengan *Compression Moulding*

Setelah proses *crushing* selesai dilakukan untuk ketiga formulasi penelitian maka selanjutnya dilakukan proses pencetakan panas (*hot pressing*) dengan metode *compression moulding* untuk mencetak sampel pelat bipolar yang selanjutnya akan dilakukan pengujian tarik dan pengujian tekuk. Proses pencetakan panas (*hot pressing*) ini dilakukan di Sentra Teknologi Polimer (STP) dengan menggunakan mesin COLLIN P300P *Hydraulic Hot Pressing*. Proses pencetakan panas (*hot pressing*) dilakukan dengan memasukkan granula komposit hasil proses *crushing* ke dalam cetakan logam (*mold*) yang berbentuk lingkaran sehingga menghasilkan pelat lingkaran. Masing-masing formula akan dicetak menjadi dua tipe pelat lingkaran. Pelat tipe I akan diperuntukkan untuk preparasi spesimen pengujian tarik (*tensile test*) dengan diameter pelat 20 cm dan ketebalan ± 2 mm. Sedangkan pelat tipe II diperuntukkan untuk preparasi spesimen pengujian tekuk (*flexural test*) dengan diameter pelat 14 cm dan ketebalan ± 4 mm.

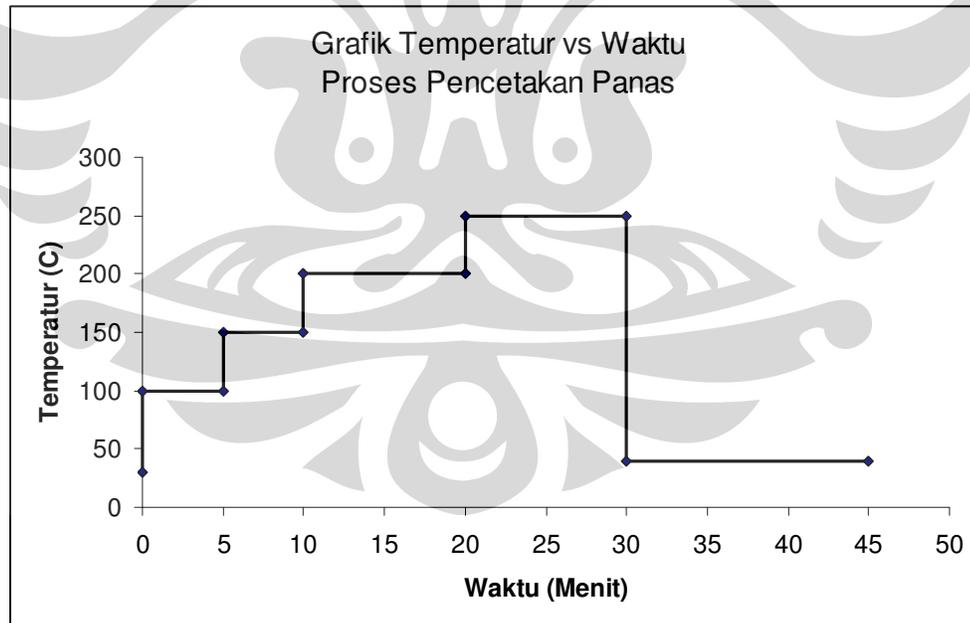
Proses pencetakan panas (*hot pressing*) ini dilakukan melalui 5 fase dengan parameter temperatur proses, tekanan proses dan waktu proses yang berbeda untuk setiap fasenya. Parameter proses pencetakan panas (*hot pressing*)

untuk formulasi F1, F2 dan F3 adalah sama. Parameter proses pencetakan panas (*hot pressing*) untuk setiap fase dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3.10. Parameter proses pencetakan panas (*hot pressing*)

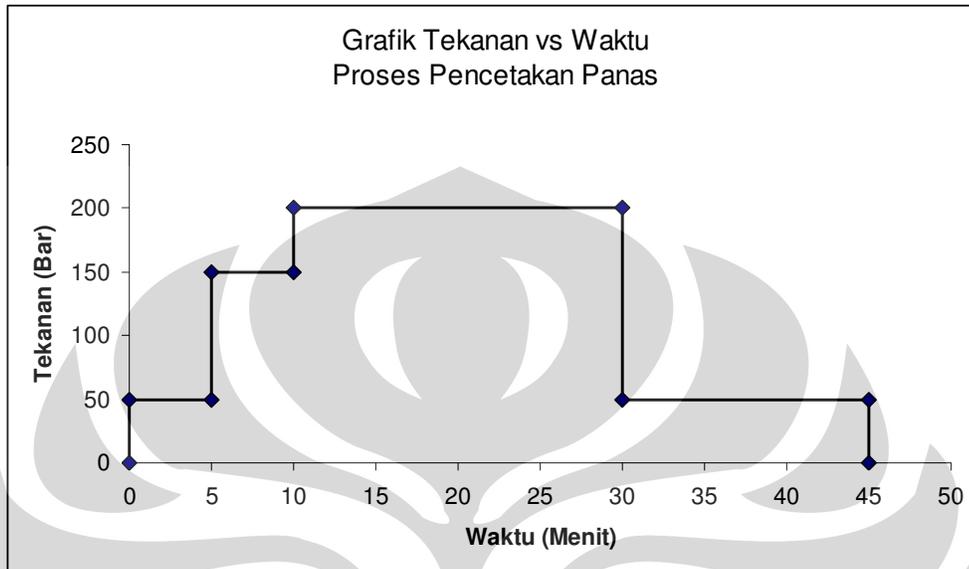
Fase	Parameter Proses		
	Temperatur (°C)	Tekanan (Bar)	Waktu (Menit)
I	100	50	5
II	150	150	5
III	200	200	10
IV	250	200	10
V	40	50	15

Grafik yang menyatakan hubungan antara temperatur proses dan waktu pemrosesan untuk pencetakan pelat bipolar dengan metode pencetakan panas (*hot pressing*) ini dapat dilihat pada gambar 3.4 di bawah ini:



Gambar 3.4. Grafik Temperatur vs Waktu Proses Pencetakan Panas

Sementara grafik yang menyatakan hubungan antara tekanan proses dan waktu pemrosesan untuk pencetakan pelat bipolar dengan metode pencetakan panas (*hot pressing*) ini dapat dilihat pada gambar 3.5 di bawah ini:



Gambar 3.5. Grafik Tekanan vs Waktu Proses Pencetakan Panas

Adapun tahapan dan prosedur proses pencetakan panas (*hot pressing*) adalah sebagai berikut:

1. Membersihkan cetakan (*dies*) mesin *hot pressing*.
2. Melapis cetakan (*dies*) mesin *hot pressing* dengan menggunakan pelumas.
3. Menyalakan mesin *hot pressing*.
4. Menjalankan program kalibrasi mesin *hot pressing*.
5. Memasukkan parameter proses pada mesin *hot pressing*.
6. Menimbang granula hasil proses *crushing* sebesar 90 gram untuk setiap formula. Massa *pellet* tersebut disesuaikan dengan ketebalan pelat yang diinginkan untuk preparasi spesimen pengujian tarik (*tensile testing*), yaitu sebesar 2 mm dan diameter cetakan (*dies*) sebesar 20 cm.
7. Menimbang granula hasil proses *crushing* sebesar 89 gram untuk setiap formula. Massa *pellet* tersebut disesuaikan dengan ketebalan pelat yang diinginkan untuk preparasi spesimen pengujian tekuk (*flexural testing*), yaitu sebesar 4 mm dan diameter cetakan (*dies*) sebesar 14 cm.

8. Meletakkan granula yang telah ditimbang tersebut ke dalam cetakan (*dies*) mesin *hot pressing* secara merata agar terjadi distribusi ketebalan yang merata pada pelat yang dihasilkan.
9. Cetakan (*dies*) selanjutnya diletakkan ke dalam mesin *hot pressing*.
10. Selanjutnya proses dilakukan secara otomatis oleh mesin *hot pressing*.
11. Proses penekanan panas dimulai dengan pemanasan cetakan hingga mencapai batas toleransi temperatur proses awal.
12. Setelah cetakan mencapai temperatur proses awal, maka cetakan akan naik ke *platform* bagian atas dan mengalami penekanan dengan tekanan proses yang telah diatur sebelumnya.
13. Setelah 45 menit, maka cetakan akan kembali turun dari *platform* bagian atas dan proses selesai.
14. Selanjutnya cetakan diambil dan dibongkar untuk mendapatkan pelat hasil proses penekanan panas (*hot pressing*).
15. Pelat tersebut telah siap untuk selanjutnya dibentuk menjadi specimen pengujian yang diperlukan.

3.4.8. Pengujian Tarik dan Tekuk

3.4.8.1. Preparasi Spesimen Uji Tarik

Proses preparasi spesimen pengujian tarik (*tensile testing*) ini dilakukan dengan menggunakan standarisasi ASTM D3039. Spesimen pengujian tarik yang dipreparasi dengan standarisasi ASTM D3039 ini tidak berbentuk *dog bone* seperti spesimen preparasi dengan standarisasi ASTM D638 Tipe IV, melainkan berbentuk persegi panjang (*rectangular*).

Proses preparasi spesimen pengujian tarik ini dilakukan melalui proses pemotongan secara manual sehingga diperoleh dimensi spesimen pengujian tarik yang sesuai dengan standarisasi ASTM D3039. Setelah proses pemotongan maka dilanjutkan dengan proses *milling* atau penggerindaan secara halus terhadap spesimen pengujian tarik.

3.4.8.2. Preparasi Spesimen Uji Tekuk

Proses preparasi spesimen pengujian tekuk (*flexural testing*) dilakukan dengan menggunakan standarisasi ASTM D790 untuk preparasi spesimen pengujian tekuk berbasis material plastik.

3.4.8.3. *Conditioning* Spesimen Uji Tarik dan Spesimen Uji Tekuk

Setelah proses preparasi spesimen pengujian tarik dengan standarisasi ASTM D3039 dan preparasi spesimen pengujian tekuk dengan standarisasi ASTM D790 maka spesimen-spesimen tersebut selanjutnya harus dikondisikan (*conditioning*) terlebih dahulu sebelum dilakukan pengujian tarik dan pengujian tekuk. Tahapan pengkondisian (*conditioning*) ini perlu dilakukan agar molekul polipropilena mengalami relaksasi tegangan karena adanya kristalisasi sekunder setelah pemanasan baik pada saat tahapan pencampuran panas (*hot blending*) maupun pada tahapan pencetakan panas (*hot pressing*)^[10]. Proses pengkondisian spesimen pengujian tarik dan spesimen pengujian tekuk ini dilakukan dalam suatu lemari pengkondisian (*conditioning chamber*) dengan parameter proses sebagai berikut:

Tabel 3.11. Parameter proses pengkondisian spesimen uji tarik dan uji tekuk

Parameter Proses	Nilai	Satuan
Temperatur	23	°C
Tingkat Kelembaban	50	%
Waktu	40	jam

3.4.8.4. Pengujian Tarik (*Tensile Test*)

Data yang diperoleh dari pengujian tarik ini terdiri dari modulus elastisitas material, kekuatan tarik, beban maksimum yang dapat diterima material serta besar elongasi saat terjadi perpatahan yang langsung didapatkan pada komputer yang tersambung dengan mesin pengujian. Pengujian tarik terhadap sampel pelat bipolar ini dilakukan di Sentra Teknologi Polimer (STP) dengan menggunakan *universal testing machine*.

Adapun parameter proses yang digunakan dalam pengujian tarik pelat bipolar ini dapat dilihat pada tabel 3.12 di bawah ini:

Tabel 3.12. Parameter Proses Pengujian Tarik

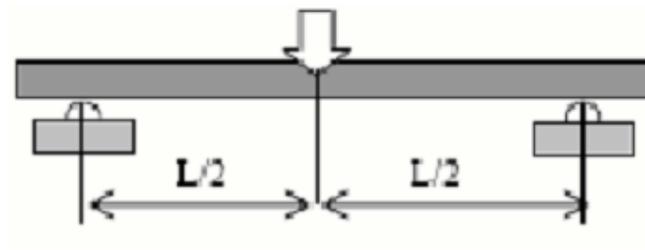
Parameter	Nilai
Temperatur Pengujian	22,1°C
Kelembaban Udara	61%
Pretention	0,1 N
Gripped Length	65 mm
Kecepatan Pengujian	5 mm/menit

Adapun prosedur atau tahapan proses pengujian tarik (*tensile testing*) yang dilakukan pada spesimen pelat bipolar ini adalah sebagai berikut:

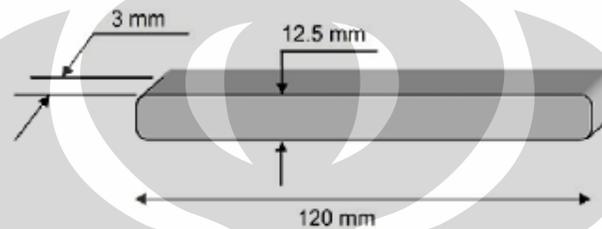
1. Melakukan preparasi spesimen pengujian tarik yang meliputi pemotongan spesimen uji dan pengkondisian spesimen uji.
2. Mengukur lebar leher spesimen uji tarik secara akurat.
3. Mengatur parameter pengujian seperti kecepatan penarikan spesimen, besarnya pembebanan, temperatur ruang dan kelembaban udara.
4. Meletakkan spesimen uji pada *grip* pengujian.
5. Memulai penarikan atau pembebanan terhadap spesimen uji.
6. Spesimen uji tarik patah.
7. Grafik hasil pengujian tarik diamati pada komputer.
8. Mendapatkan hasil pengujian tarik.
9. Ulangi langkah 2 - 6 di atas untuk pengujian tarik tiap spesimen.

3.4.8.5. Pengujian Tekuk (*Flexural Test*)

Pengujian tekuk mengacu pada standar ASTM D 790: “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”. Tujuan dilakukannya pengujian tekuk adalah untuk mengetahui kekuatan tekuk dari pelat bipolar. Gambar 3.6 menunjukkan skematis pengujian tekuk yang dilakukan, sementara penampang sampel pengujian tekuk diperlihatkan pada gambar 3.7 di bawah ini:



Gambar 3.6. Skematis Pengujian *Flexural*



Gambar 3.7. Sampel Pengujian *Flexural*

Pengujian tekuk ini menggunakan *universal testing machine* Shimadzu AGS 10kNG yang sama dengan pengujian tarik. Namun, dilakukan penggantian terhadap *head* pengujian untuk pengujian kelenturan dengan metode *three-point bending*. Pengujian ini menggunakan parameter yang diatur oleh standarisasi ASTM D790 yang mengatur mengenai standar pengujian kelenturan untuk material plastik.

Adapun prosedur atau tahapan pengujian tekuk yang dilakukan pada pelat bipolar ini adalah sebagai berikut^[51]:

1. Preparasi spesimen pengujian tekuk yang meliputi pemotongan spesimen uji dan pengkondisian spesimen uji.
2. Mengukur lebar dan ketebalan spesimen uji.
3. Selanjutnya dilakukan penghitungan terhadap *support span* dan juga kecepatan pembebanan.
4. Mengatur parameter pengujian seperti kecepatan pembebanan, beban, temperatur ruang dan kelembaban ruang.
5. Meletakkan spesimen pada *grip* pengujian.
6. Memulai pembebanan.
7. Sampel mengalami kegagalan, grafik diamati.
8. Mendapatkan hasil pengujian.

3.4.9. Pengujian Densitas dan Porositas

Pengujian densitas atau kerapatan massa dan pengujian porositas yang dilakukan terhadap sampel pelat bipolar merupakan salah satu parameter penting dalam menganalisis sifat mekanis dari pelat bipolar tersebut. Pengujian densitas atau kerapatan massa dapat dilakukan dengan menggunakan prinsip perbandingan massa material di udara dengan massa material di dalam air. Massa material di dalam air akan berbeda dengan massanya di udara akibat adanya gaya ke atas atau gaya Archimedes. Pengujian densitas dan porositas terhadap pelat bipolar ini dilakukan di Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan (P3TKEBT) Kementerian Energi dan Sumber Daya mineral (ESDM).

Adapun prosedur atau tahapan kerja pengujian densitas dan porositas yang dilakukan terhadap pelat bipolar adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan sampel pelat bipolar yang akan diuji nilai densitasnya.
2. Menyiapkan timbangan digital, *beaker glass* ukuran 1000 ml, kawat dan aquades.
3. Menimbang dan mencatat massa sampel di udara (M_u).
4. Menimbang berat air yang sudah terisi di dalam *beaker glass* 1000 ml untuk mencari nilai kerapatan massa air yang nantinya akan digunakan untuk pengujian kerapatan massa dan porositas (ρ air).
5. Menimbang massa kawat di dalam air.
6. Menimbang massa sampel di dalam air dengan cara memasukkan sampel yang telah dililitkan dengan kawat ke dalam *beaker glass* yang terisi air hingga seluruh permukaan sampel tercelup oleh air dan berada dalam keadaan setimbang dan angka tidak berubah-ubah.
7. Ulangi langkah diatas untuk formula yang lain.

Dari hasil penimbangan tersebut maka massa sampel di air (M_a) adalah massa sampel di air dikurangi dengan massa kawat di air. Sedangkan nilai kerapatan massa sampel bisa diperoleh dari persamaan berikut:

$$\text{densitas sampel} = \frac{M_u}{M_a} \rho_{air} \quad \dots \dots \dots (3.4)$$

Sementara untuk menghitung nilai porositas hasil percobaan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\% \text{ porositas} = \frac{\rho_{\text{teoritis}} - \rho_{\text{percobaan}}}{\rho_{\text{teoritis}}} \times 100\% \dots \dots \dots (3.5)$$

dimana:

ρ_{teoritis} = densitas teoritis (gr/cm^3)

$\rho_{\text{percobaan}}$ = densitas percobaan (gr/cm^3)

Nilai densitas teoritis dari sampel pelat bipolar ini dapat dihitung dengan menggunakan rumus hukum campuran komposit sebagai berikut:

$$\rho_{\text{teoritis komposit}} = (Vf_{\text{matriks}} \cdot \rho_{\text{matriks}}) + (Vf_{\text{penguat}} \cdot \rho_{\text{penguat}}) \dots \dots (3.6)$$

3.4.10. Pengujian Konduktivitas Listrik Sampel dengan *Four Point Probe*

Prinsip pengujian dengan metode ini adalah dengan memberikan suatu arus listrik dan beda potensial tertentu terhadap spesimen uji sehingga nilai resistansi listrik dari material yang diuji dapat diketahui^[49]. Apabila nilai hambatan jenis dari suatu bahan diketahui maka nilai dari konduktivitas listrik bahan tersebut dapat dihitung.

Spesimen dibentuk sedemikian rupa hingga berbentuk lingkaran dengan diameter sekitar 2 cm ataupun berbentuk persegi empat dengan panjang sisi sekitar 2 cm. Proses pengampelasan terhadap permukaan spesimen uji juga merupakan faktor yang tidak kalah penting karena permukaan spesimen uji yang rata dan datar (*flat*) merupakan parameter yang harus dipenuhi dalam pengujian dengan metode ini^[49].

Prosedur pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut^[50]:

1. Menyiapkan bahan yang akan diuji dan memastikan permukaan spesimen cukup rata dan datar.
2. Mengamplas permukaan spesimen hingga permukaannya benar-benar datar dan rata.
3. Melakukan pengukuran ketebalan spesimen.
4. Meletakkan spesimen pada alat
5. Menyalakan perangkat *four point probe*.
6. Modus yang dipilih adalah pengukuran nilai hambatan jenis material.

7. Melakukan kalibrasi awal.
8. Setelah instrumen siap maka papan mika yang telah direkatkan spesimen uji direkatkan pada *chamber* perangkat *four point probe*.
9. Memasukkan nilai ketebalan dari spesimen uji yang telah diukur.
10. Jika alat sudah siap maka penekan pada bagian atas ditekan sehingga akan mendorong papan mika untuk tertekan ke dalam *chamber* pengujian.
11. Membaca nilai hambatan jenis bahan yang tertera pada *display*. Hambatan jenis bahan yang terbaca berada pada satuan Ωcm .
12. Langkah di atas diulangi sehingga diperoleh 3 hasil pengujian.
13. Untuk mendapatkan nilai konduktivitas bahan maka dapat dilakukan dengan formulasi sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{1}{R} \dots \dots \dots (3.7)$$

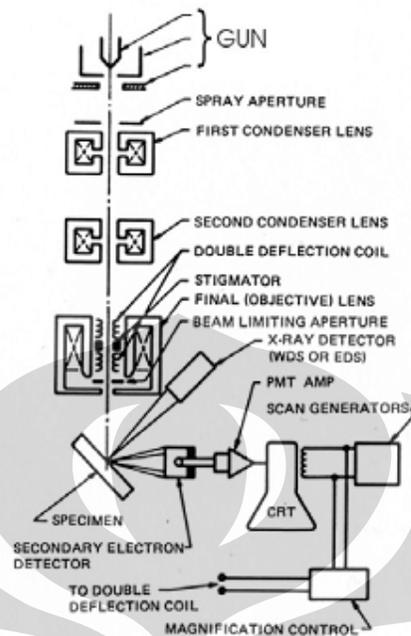
Dimana σ → Konduktivitas listrik bahan (S/cm)

R → Hambatan jenis bahan (Ωcm)

14. Menentukan nilai rata-rata dari ketiga pengujian yang telah dilakukan maka nilai tersebut adalah nilai konduktivitas bahan yang diuji.

3.4.11. Karakterisasi Morfologi Patahan Tekuk dengan SEM dan EDS

Pengamatan morfologi pada permukaan sampel dilakukan dengan menggunakan SEM. Sampel terlebih dahulu dilapisi dengan emas (Au) agar bersifat konduktif sehingga dapat menghantarkan elektron. Detektor yang digunakan pada SEM adalah detektor elektron sekunder. Tujuan pengamatan adalah untuk mengetahui dispersi bahan pengisi pada matriks dan daya pembasahan matriks terhadap serat karbon. Bagian sampel yang diamati adalah pada permukaan perpatahan uji tekuk. Gambar 3.8 di bawah ini menunjukkan diagram skematik dari SEM.



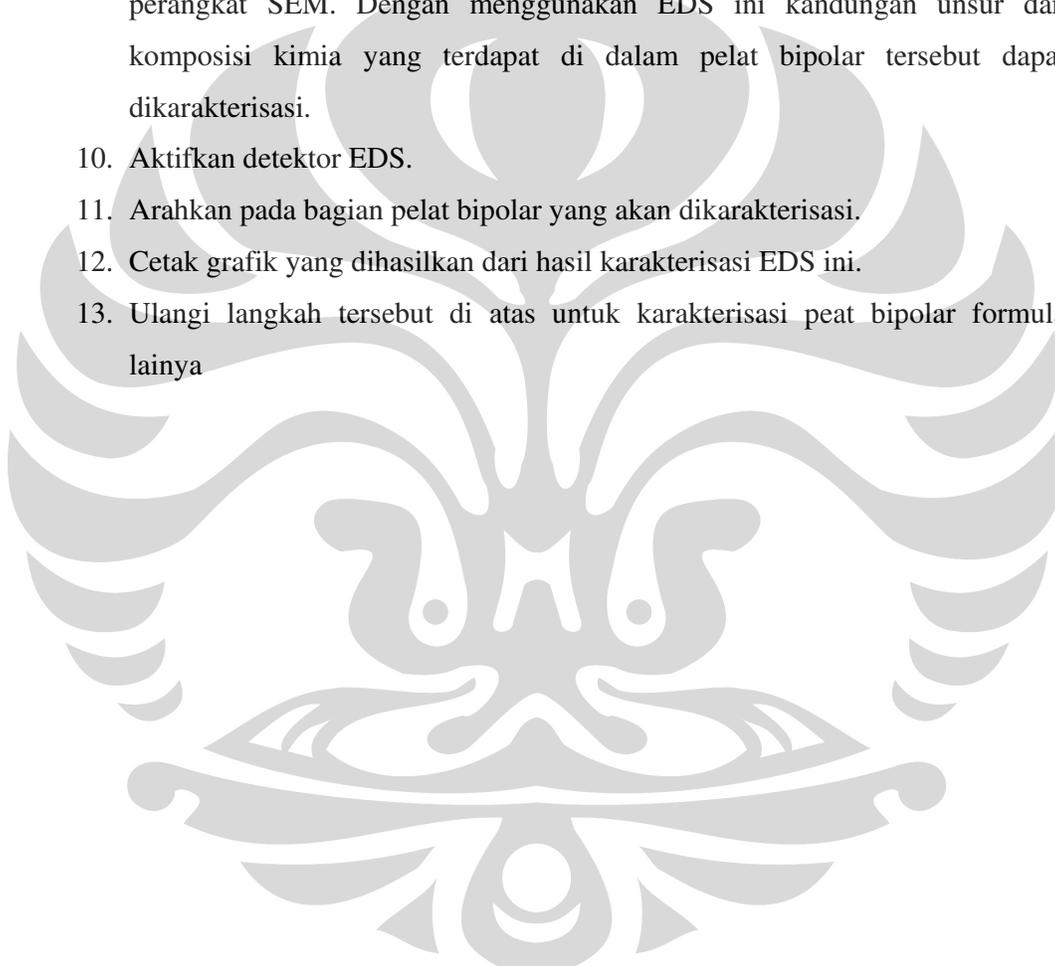
Gambar 3.8. Diagram alat *Scanning Electron Microscope (SEM)*^[13]

Tujuan karakterisasi pelat bipolar dengan menggunakan metode SEM bertujuan untuk mengetahui distribusi bahan pengisi (*filler agent*) pada matriks komposit, daya pembasahan (*wetability*) matriks PP terhadap serat karbon, grafit dan *Carbon Nano Tubes (CNT)* serta morfologi permukaan hasil perpatahan pengujian tekuk spesimen pelat bipolar. Bagian pelat bipolar yang dikarakterisasi dengan menggunakan SEM adalah patahan hasil pengujian tekuk.

Sementara tahapan kerja karakterisasi morfologi patahan pengujian tekuk pelat bipolar dengan metode SEM adalah sebagai berikut:

1. Lakukan preparasi sampel pelat bipolar yang akan dikarakterisasi dengan cara pemotongan sampel sehingga spesimen dapat dimasukkan ke dalam *speciment chamber* SEM.
2. Spesimen uji yang telah dipotong tersebut kemudian dilapisi dengan emas dalam suatu alat *sputtering*.
3. Setelah proses pelapisan selesai dilakukan maka spesimen uji dikeluarkan.
4. Letakan spesimen uji di dalam dalam *speciment chamber* SEM.
5. Kemudian *speciment chamber* SEM dikondisikan dalam keadaan vakum.
6. *Electron beam* SEM diaktifkan.

7. Dengan menggunakan kontrol komputer arahkan spesimen sehingga diperoleh pencitraan morfologi permukaan patahan pelat bipolar.
8. Pengambilan gambar dilakukan pada beberapa titik untuk melihat kondisi morfologi permukaan pelat bipolar secara keseluruhan.
9. Selain itu spesimen pelat bipolar juga diuji kandungan unsur-unsur yang terdapat di dalam pelat bipolar tersebut dengan menggunakan detektor *Energy Dispersed Spectroscopy* (EDS). Detektor EDS tersebut sudah terpasang pada perangkat SEM. Dengan menggunakan EDS ini kandungan unsur dan komposisi kimia yang terdapat di dalam pelat bipolar tersebut dapat dikarakterisasi.
10. Aktifkan detektor EDS.
11. Arahkan pada bagian pelat bipolar yang akan dikarakterisasi.
12. Cetak grafik yang dihasilkan dari hasil karakterisasi EDS ini.
13. Ulangi langkah tersebut di atas untuk karakterisasi peat bipolar formula lainnya



BAB 4 HASIL PENELITIAN

4.1. Hasil Pengujian XRF Serbuk Nano Tembaga

Tabel 4.1. Hasil Pengujian XRF Serbuk Nanotembaga

No	Nama Unsur	Lambang Unsur	Kandungan Unsur (%)
1	Tembaga	Cu	99,9479
2	Kromium	Cr	0,0521

Pengujian tersebut memperlihatkan bahwa kadar nano tembaga yang digunakan dalam penelitian ini sangat tinggi yaitu mencapai angka 99.95%. Namun keterbatasannya adalah tidak dilakukannya pengujian senyawa dalam sampel bahan tersebut sehingga tidak diketahui lebih lanjut apakah Cu yang dipakai adalah unsur murni atau berupa molekul yang berikatan dengan senyawa lain.

4.2. Hasil Pengujian Awal Nilai Konduktivitas Listrik Bahan

Pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan terhadap bahan serat karbon, grafit, karbon hitam, dan nano tembaga. Pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan-bahan tersebut dilakukan di dua tempat dengan metode pengujian yang berbeda. Proses pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan ini dilakukan di Laboratorium Listrik dan Kemagnetan, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dan di Laboratorium *Fuel Cell*, Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2F-LIPI).

Pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan di Laboratorium Listrik dan Kemagnetan, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dilakukan terhadap 3 jenis bahan, yaitu serat karbon, grafit, karbon hitam, dan nano tembaga. Proses pengujian ini diawali dengan preparasi spesimen pengujian di mana bahan yang semuanya berbentuk serbuk akan dilakukan proses penekanan (*pressing*) dalam suatu cetakan (*dies*) khusus sehingga menghasilkan suatu spesimen uji yang

berbentuk pellet. Proses penekanan dilakukan dengan tekanan hingga 50 bar sehingga dihasilkan pellet berbentuk silinder yang *compact* dan cukup padat. Selanjutnya spesimen tersebut diukur diameter dan ketebalannya dengan menggunakan jangka sorong digital. Kemudian proses pengukuran nilai konduktivitas listrik bahan dilakukan dengan menggunakan alat LCR Meter di mana frekuensi pengujian yang digunakan berkisar dari 0,1 Hertz sampai dengan 10 kilo Hertz.

Tabel 4.2. Hasil Uji Konduktivitas Listrik Bahan dengan LCR Meter

Jenis Sampel	Konduktivitas	Satuan
Grafit	0.8029	S/cm
Karbon Hitam	2.661E-06	S/cm
Serat Karbon	3.567	S/cm
Nano Tembaga	1 E-03	S/cm

Sementara pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan yang dilakukan di Laboratorium *Fuel Cell*, Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2F-LIPI) dilakukan hanya terhadap sampel grafit dan nano tembaga saja. Hal ini dikarenakan pada saat preparasi spesimen serat karbon dan juga karbon hitam terdapat permasalahan teknis pada cetakan (*dies*) kompaksi dan juga tidak terdapatnya *binding agent* untuk mengikat serat karbon dan karbon hitam agar cukup *compact* saat dilakukan proses kompaksi. Proses preparasi sampel hanya dapat dilakukan untuk bahan grafit saja karena grafit cukup *compact* saat dilakukan proses kompaksi. Proses preparasi sampel grafit ini dilakukan dengan metode kompaksi dengan tekanan sebesar 60 bar dan waktu tahan kompaksi sebesar 30 detik. Proses pengujian nilai konduktivitas listrik bahan dilakukan dengan metode *four point probe*.

Tabel 4.3. Hasil Uji Konduktivitas Listrik Grafit dengan *Four Point Probe*

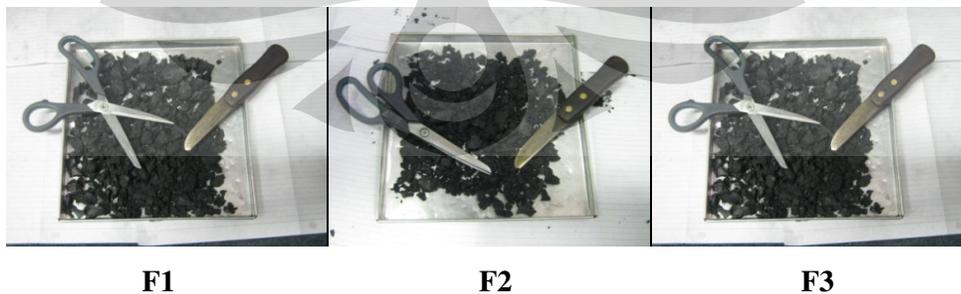
Percobaan	Resistansi	Satuan	Konduktivitas	Satuan
1	0.0365	$\Omega.cm$	27.397	S/cm
2	0.0370	$\Omega.cm$	27.027	S/cm
3	0.0369	$\Omega.cm$	27.100	S/cm
Rataan			27.175	S/cm

Tabel 4.4. Hasil Uji Konduktivitas Listrik Nano Tembaga dengan *Four Point Probe*

Percobaan	Resistansi	Satuan	Konduktivitas	Satuan
1	0.4500	$\Omega.cm$	2.222	S/cm
2	0.4470	$\Omega.cm$	2.237	S/cm
3	0.4440	$\Omega.cm$	2.252	S/cm
Rataan			2.237	S/cm

4.3. Hasil Proses Pencampuran Panas (*Hot Blending*)

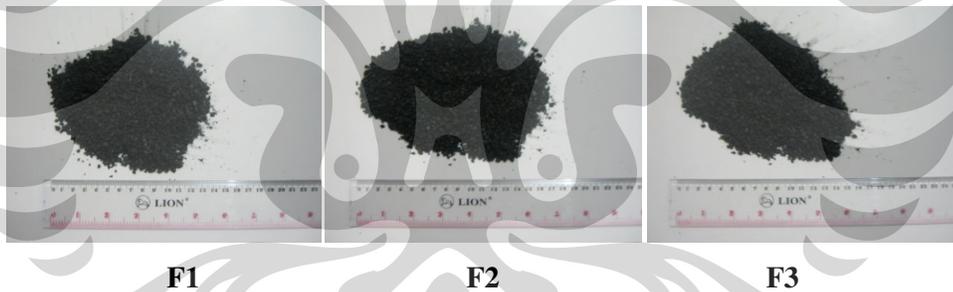
Proses pencampuran panas (*hot blending/compounding*) dilakukan dengan menggunakan peralatan Rheomix Haake 3000. Produk hasil proses pencampuran panas (*hot blending*) bahan ini dinamakan *master batch*. Adapun *master batch* yang dihasilkan dari proses pencampuran panas (*hot blending*) ini dapat dilihat pada gambar 4.1 di bawah ini:

**Gambar 4.1.** Hasil Proses Pencampuran Panas (*Hot Blending*)

Dilihat dengan pengamatan visual terlihat hasil yang hampir sama diantara ketiga formula yang telah dilakukan pencampuran panas. Secara visual dapat dilihat bentuk serpihan yang warnanya cenderung menyerupai warna serat karbon yang merupakan bahan dengan komposisi terbanyak dalam setiap formulasi. Permasalahan umum yang sering terjadi pada proses pencampuran panas ini adalah adanya hasil pencampuran yang menempel pada *screw* mesin rheomix dan menyebabkan permasalahan dalam proses pembersihan *chamber* mesin Rheomix.

4.4. Hasil Proses Penghalusan (*Crushing*)

Proses *crushing* ini penting dilakukan untuk mereduksi ukuran dari *master batch* yang berbentuk gumpalan cukup besar ini sehingga dapat mempermudah dalam proses pencetakan panas (*hot pressing*). Produk hasil proses *crushing* terhadap *master batch* ini berbentuk granula atau pellet dengan ukuran sekitar 1 mm sampai dengan 4 mm. Granula atau pellet yang dihasilkan dari proses *crushing master batch* ini dapat dilihat pada gambar 4.2 di bawah ini:

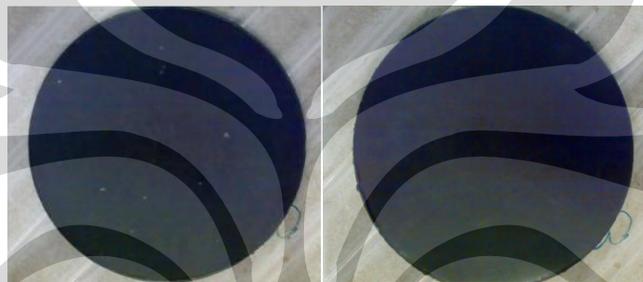


Gambar 4.2. Pellet atau Granula Hasil Proses *Crushing*

Dari hasil pengamatan langsung secara visual, hasil proses penghalusan berbentuk serpihan atau granula dengan morfologi permukaan cukup kasar dan memiliki ukuran yang berbeda-beda. Dari ketiga formula yang digunakan pellet atau granula komposit yang dihasilkan memiliki bentuk dan warna yang hampir sama. Ukuran granula dari ketiga formula juga terlihat seragam dan memiliki distribusi yang merata. Proses penghalusan ini diperlukan agar proses pencetakan panas yang dilakukan selanjutnya dapat menghasilkan pelat dengan kerapatan yang optimal.

4.5. Hasil Proses Pencetakan Panas (*Hot Pressing*) Pelat Bipolar

Proses pencetakan panas (*hot pressing*) dilakukan dengan memasukkan granula komposit hasil proses *crushing* ke dalam cetakan logam (*mold*) yang berbentuk lingkaran sehingga menghasilkan pelat lingkaran. Masing-masing formula akan dicetak menjadi dua tipe pelat lingkaran. Pelat tipe I akan diperuntukkan untuk preparasi spesimen pengujian tarik (*tensile test*) dengan diameter pelat 20 cm dan ketebalan ± 2 mm. Sedangkan pelat tipe II diperuntukkan untuk preparasi spesimen pengujian tekuk (*flexural test*) dengan diameter pelat 14 cm dan ketebalan ± 4 mm. Pelat hasil proses pencetakan panas (*hot pressing*) untuk kedua macam tipe pelat tersebut dapat dilihat pada gambar 4.3 di bawah ini:



Tipe 1

Tipe 2

Gambar 4.3. Pelat Hasil Proses *Hot Pressing*

Secara umum proses pencetakan panas (*hot pressing*) untuk pelat bipolar ini dapat dikatakan cukup berhasil sehingga menghasilkan pelat bipolar dengan cukup baik. Dari pengamatan secara visual terlihat bahwa pelat hasil proses penekanan panas (*hot pressing*) ini memiliki morfologi permukaan yang cukup baik dan *compact*. Cacat-cacat permukaan yang umumnya ditemui pada proses penekanan panas seperti cacat retak (*cracks*) tidak dijumpai secara signifikan.

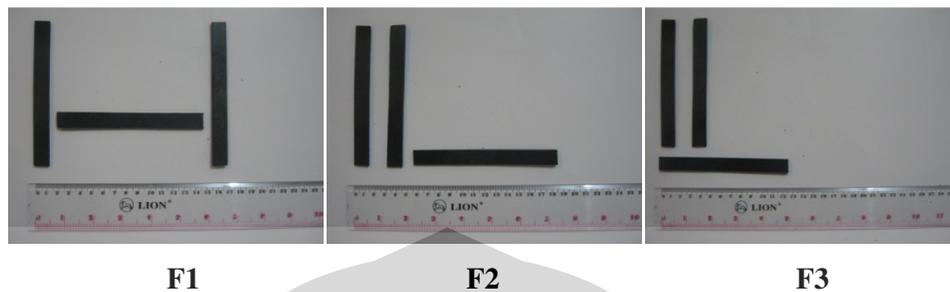
4.6. Hasil Pengujian Tarik dan Pengujian Tekuk

4.6.1. Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Tarik

Proses dilakukan melalui proses pemotongan secara manual sehingga diperoleh dimensi spesimen pengujian tarik yang sesuai dengan standarisasi ASTM D3039. Setelah proses pemotongan maka dilanjutkan dengan proses *milling* atau penggerindaan secara halus terhadap spesimen pengujian tarik.

Universitas Indonesia

Spesimen pengujian tarik untuk pelat bipolar yang telah dipreparasi tersebut dapat dilihat pada gambar 4.4 di bawah ini:



Gambar 4.4. Spesimen Pengujian Tarik Pelat Bipolar ASTM D3039

Pemotongan spesimen sesuai dengan standarisasi ASTM D3039 maka selanjutnya spesimen pengujian tarik tersebut dikondisikan dalam lemari pengkondisian (*conditioning chamber*) dengan temperatur sebesar 23°C dan kelembaban relatif 50% selama lebih dari 40 jam sebelum dilakukan proses pengujian tarik (*tensile testing*). Pengujian tarik terhadap pelat bipolar ini dilakukan dengan kecepatan penarikan spesimen sebesar 2 mm/menit. Pengujian tarik ini dilakukan dalam ruangan dengan kondisi temperatur 23,3°C dan kelembaban relatif sebesar 58,5%. Dari pengujian tarik ini diperoleh dua parameter penting yang berhubungan dengan sifat mekanis pelat bipolar, yaitu *Ultimate Tensile Strength (UTS)* dan elongasi saat perputahan (*Elongation at Break*).

4.6.2. Hasil Pengujian Tarik Pelat Bipolar

Pengujian tarik yang dilakukan terhadap sampel *hybrid* nano komposit PP/C-CNT-Cu nano ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kekuatan komposit dapat menerima beban minimal hingga mengalami deformasi plastis. Sampel dipreparasi dengan menggunakan *compression molding* dan pemotongan sehingga diperoleh spesimen sesuai dengan ASTM D3039. Spesimen dikondisikan pada temperature 23 °C dan kelembaban relative 50% selama lebih dari 40 jam sebelum dilakukan pengujian. Pengujian dilakukan dengan kecepatan penarikan sebesar 2 mm/menit. Pengujian dilakukan dalam ruangan dengan temperature 23.3 °C dan kelembaban relatif 58.5%.

Tabel 4.5. Hasil Pengujian Tarik Pelat Bipolar

Formula	Kekuatan Tarik / UTS (MPa)	Toleransi	Elongasi (%)	Toleransi
F1	20.30	±2.34	0.41	±0.07
F2	11.18	±3.58	0.25	±0.07
F3	10.71	±4.74	0.24	±0.05

4.6.3. Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Tekuk

Proses preparasi dilakukan dengan menggunakan standarisasi ASTM D790 untuk preparasi spesimen pengujian tekuk berbasis material plastik. Spesimen pengujian tekuk (*flexural testing*) untuk pelat bipolar yang telah dipreparasi tersebut dapat dilihat pada gambar 4.5 di bawah ini:



Gambar 4.5. Spesimen Pengujian Tekuk Pelat Bipolar ASTM D790

4.6.4. Hasil Pengujian Tekuk Pelat Bipolar

Pengujian tarik dilakukan terhadap sampel *hybrid nano* komposit PP/CNT-Cu nano. Sampel pelat bipolar dipreparasi dengan menggunakan mesin *compression moulding*. Selanjutnya sampel akan dipotong dengan bentuk dan dimensi tertentu sehingga diperoleh spesimen pengujian tekuk yang sesuai dengan standarisasi ASTM D790. Sebelum dilakukan pengujian tekuk maka spesimen terlebih dahulu akan dikondisikan dalam suatu lemari pengkondisian (*conditioning chamber*) pada temperatur 23°C dan kelembaban relatif sebesar 50% selama lebih dari 40 jam. Pengujian tekuk (*flexural testing*) spesimen pelat bipolar dilakukan dengan kecepatan penekanan sebesar 0,427 dikalikan dengan

ketebalan spesimen dengan satuan mm/menit. Pengujian tekuk (*flexural testing*) ini dilakukan dalam suatu ruangan dengan kondisi temperatur aktual sebesar 23,0°C dan kelembaban relatif sebesar 55,5%.

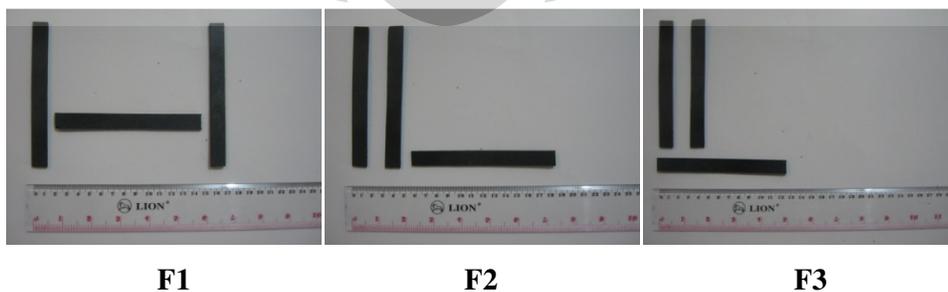
Tabel 4.6. Hasil Pengujian Tekuk Pelat Bipolar

Formula	Kekuatan Tekuk (MPa)	Toleransi	Modulus Elastisitas (GPa)	Toleransi
F1	33.13	±1.49	10.58	±0.23
F2	29.41	±1.80	8.79	±0.69
F3	20.64	±4.22	6.30	±0.85

4.7. Hasil Pengujian Densitas dan Porositas

4.7.1. Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Densitas dan Porositas

Pengujian densitas atau kerapatan massa dapat dilakukan dengan menggunakan prinsip perbandingan massa material di udara dengan massa material di dalam air. Massa material di dalam air akan berbeda dengan massanya di udara akibat adanya gaya ke atas atau gaya Archimedes. Pengujian densitas dan porositas terhadap pelat bipolar ini dilakukan di Laboratorium Kimia Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan (P3TKEBT) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Spesimen tersebut kemudian dipreparasi hingga diperoleh spesimen berbentuk balok dengan dimensi panjang sekitar 13 cm, lebar sekitar 1 cm dan ketebalan sekitar 0,5 cm. Hasil preparasi spesimen pengujian densitas dan porositas pelat bipolar dapat dilihat pada gambar 4.6 di bawah ini:



Gambar 4.6. Spesimen Pengujian Densitas dan Porositas Pelat Bipolar

Universitas Indonesia

4.7.2. Hasil Pengujian Densitas Pelat Bipolar

Hasil pengujian densitas terhadap pelat bipolar berbasis *hybrid* nano komposit PP/C-CNT-Cu nano untuk ketiga formula penelitian adalah:

Tabel 4.7. Hasil Pengujian Densitas Pelat Bipolar

Formula	Densitas	Satuan
F1	1.43182	gram/cm ³
F2	1.42600	gram/cm ³
F3	1.38435	gram/cm ³

4.7.3. Hasil Pengujian Porositas Pelat Bipolar

Dalam pengujian porositas terhadap suatu material maka dilakukan perbandingan antara nilai densitas teoritis dan nilai densitas hasil pengujian terhadap material tersebut. Hasil pengujian pelat bipolar berbasis *hybrid* nano komposit PP/C-CNT-Cu nano untuk ketiga formula penelitian adalah:

Tabel 4.8. Hasil Pengujian Porositas Pelat Bipolar

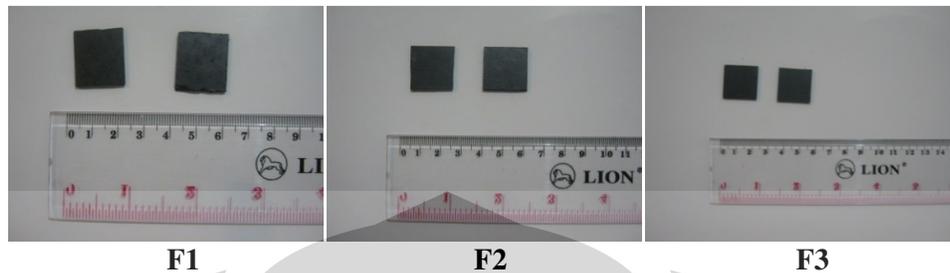
Formulasi	ρ teoritis	Satuan	Porositas	Satuan
F1	1.4592	gram/cm ³	1.88	%
F2	1.4409	gram/cm ³	1.03	%
F3	1.4055	gram/cm ³	1.49	%

4.8. Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar

Pengujian nilai konduktivitas listrik bahan dilakukan terhadap 3 sampel dengan formulasi yang berbeda, yaitu F1, F2, dan F3. Pengujian dilakukan di laboratorium *fuel cell* Fisika LIPI PUSPIPTEK. Kemudian proses pengukuran nilai konduktivitas listrik bahan dilakukan dengan menggunakan metode *four point probe*.

Spesimen pengujian konduktivitas listrik untuk pelat bipolar dibentuk sedemikian rupa hingga berbentuk lingkaran dengan diameter sekitar 2 cm ataupun berbentuk persegi empat dengan panjang sisi sekitar 2 cm. Spesimen

pengujian konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis *hybrid* nano komposit PP/CNT-Cu nano adalah:



Gambar 4.7. Spesimen Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar

Pengujian ini pada dasarnya berdasarkan prinsip resistivitas atau hambatan jenis bahan yang diukur dengan metode *four point probe*. Hasil pengukuran dari pelat bipolar untuk ketiga formulasi penelitian adalah sebagai berikut:

Tabel 4.9. Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar metode *Four Point Probe*

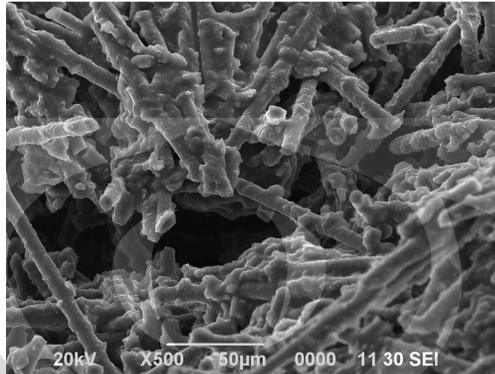
Formulasi	Konduktivitas Listrik	Satuan
F1	4.630	S/cm
F2	4.739	S/cm
F3	0.678	S/cm

4.9. Hasil Pengamatan Morfologi Patahan Pelat Bipolar Dengan SEM Dan Pengujian EDS

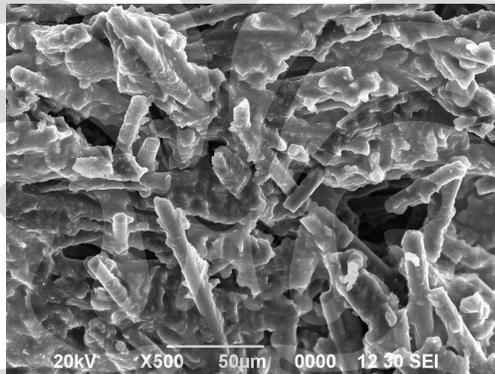
4.9.1. Hasil Pengamatan Morfologi Patahan Dengan SEM

Pengamatan morfologi patahan hasil pengujian tekuk pelat bipolar dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pengujian ini dilakukan di Pusat Penelitian Metalurgi (P2M) Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). Pengamatan morfologi patahan hasil pengujian tekuk pelat bipolar hanya dilakukan terhadap 2 formula penelitian dari 3 formula penelitian. Pada setiap formula, pengamatan morfologi patahan tekuk pelat bipolar dilakukan pada 3 titik yang berbeda. Pada setiap titik pengamatan, perbesaran yang diambil

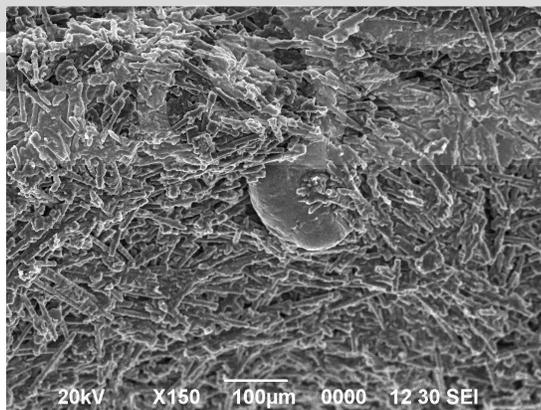
mulai dari 100x, 250x dan 500x. Pada setiap formula juga dilakukan pengamatan terhadap nano tembaga (Cu nano) dengan perbesaran cukup tinggi, yaitu sekitar 20000x. Hasil pengamatan patahan tekuk dengan SEM adalah sebagai berikut:



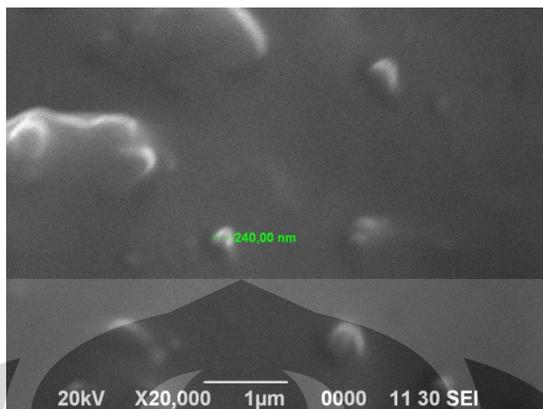
Gambar 4.8. Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 1 Perbesaran 500x



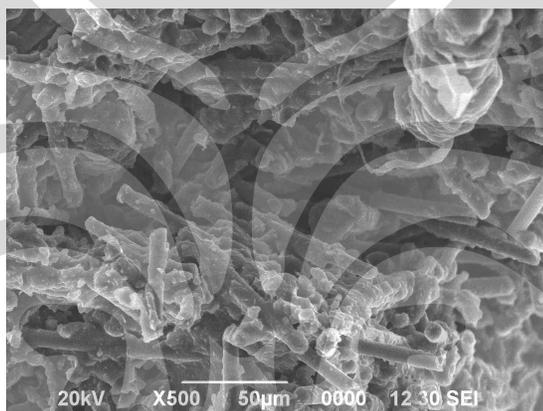
Gambar 4.9. Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 2 Perbesaran 500x



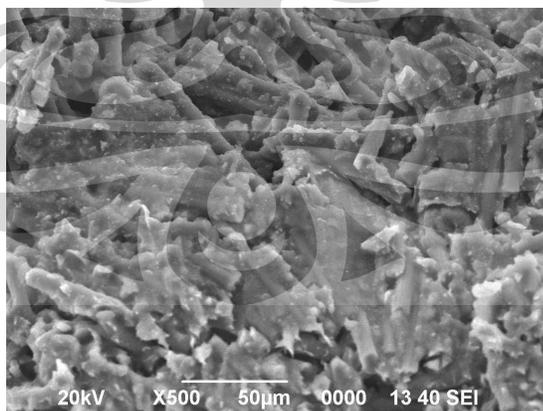
Gambar 4.10. Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 3 Perbesaran 150x



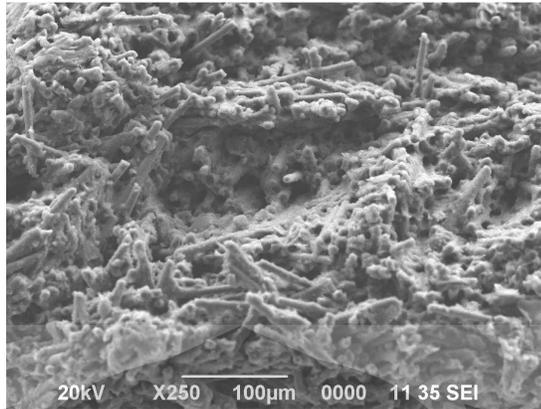
Gambar 4.11. Pengamatan Cu Nano Pada F2 Perbesaran 20000x



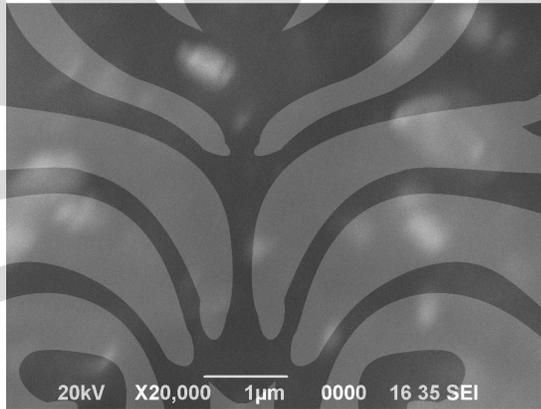
Gambar 4.12. Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 1 Perbesaran 500x



Gambar 4.13. Morfologi Patahan Tekuk F3 Titik 2 Perbesaran 500x



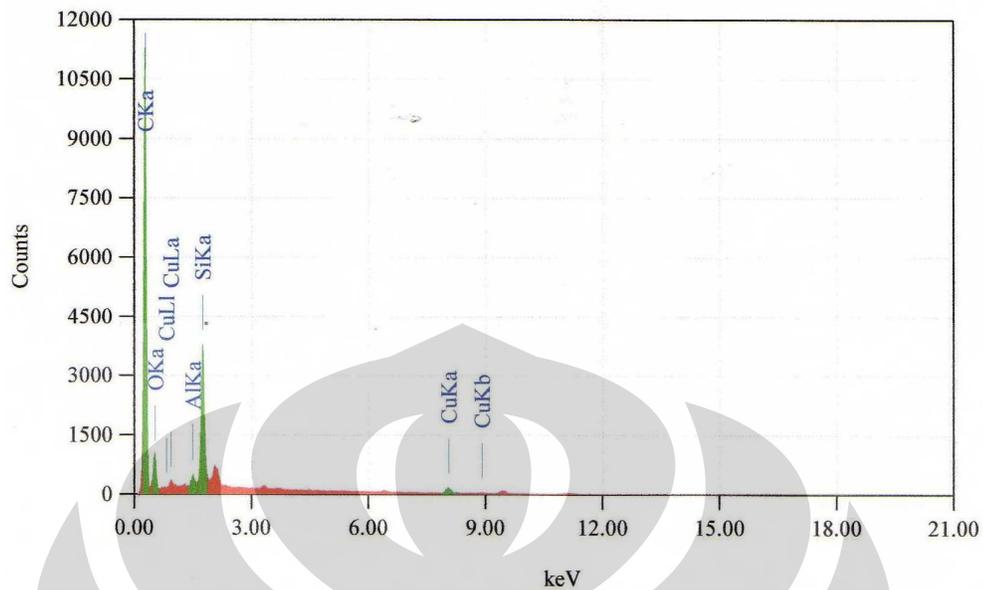
Gambar 4.14. Morfologi Patahan Tekuk F3 Titik 3 Perbesaran 250x



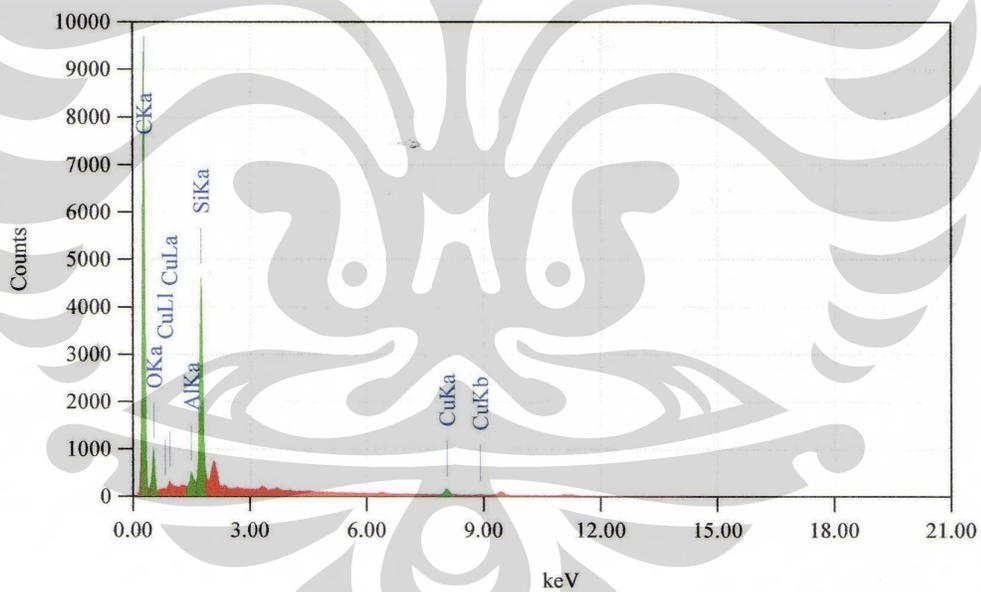
Gambar 4.15. Pengamatan Cu Nano Pada F3 Perbesaran 20000x

4.9.2. Hasil Pengujian EDS Pelat Bipolar

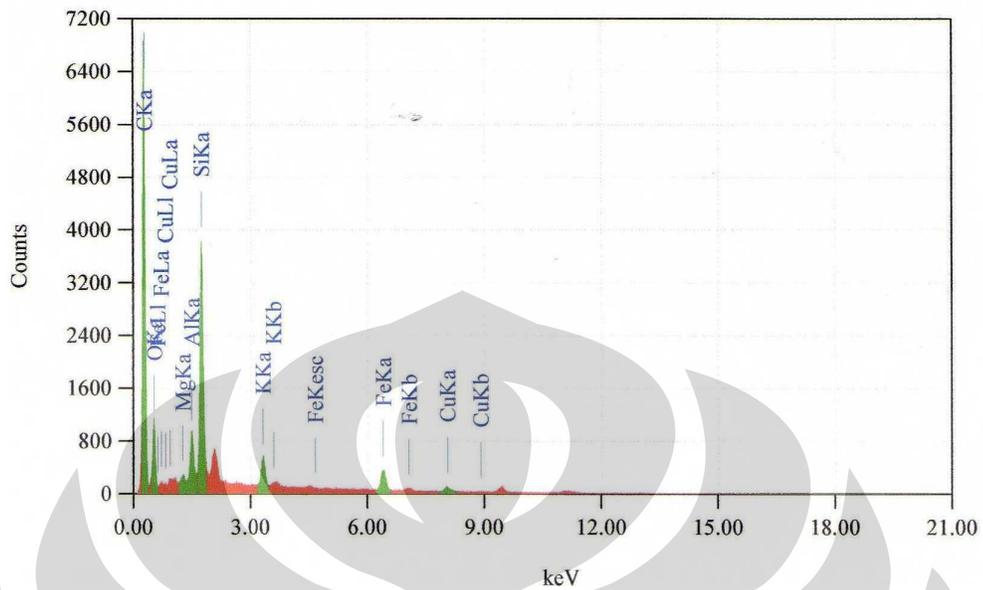
Pengujian *Energy Dispersed Spectroscopy* (EDS) terhadap pelat bipolar dilakukan bersamaan dengan pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hal ini dapat dilakukan karena instrumen SEM yang dimiliki oleh Pusat Penelitian Metalurgi (P2M) Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) juga dilengkapi dengan detektor EDS yang dapat mengkarakterisasi komposisi kimia yang terkandung di dalam pelat bipolar. Hasil pengujian EDS terhadap pelat bipolar ditampilkan dalam bentuk grafik hasil pengujian EDS. Grafik hasil pengujian EDS untuk formula F1 dan F2 dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



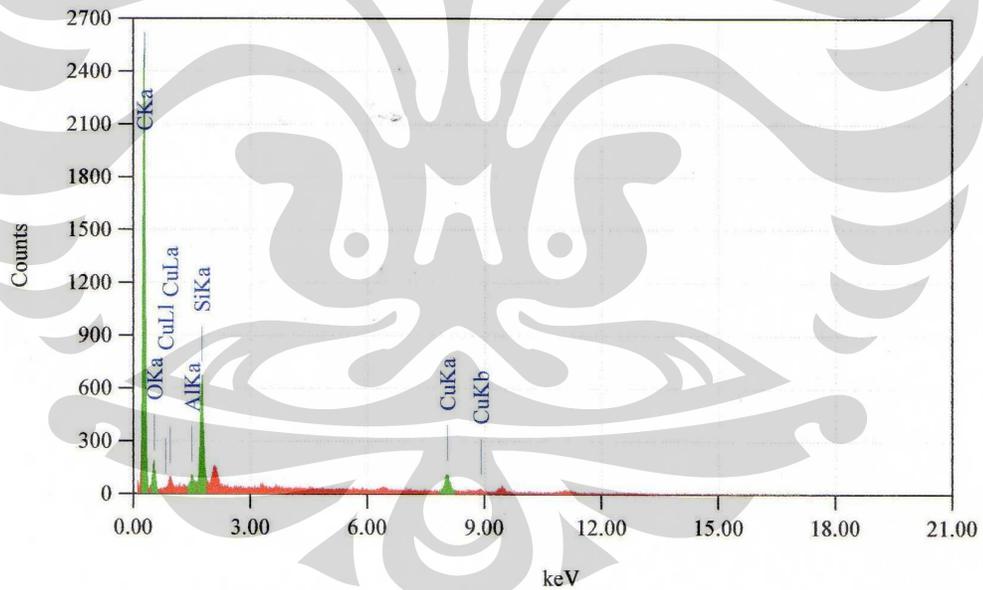
Gambar 4.16. Grafik EDS F2 Titik 1



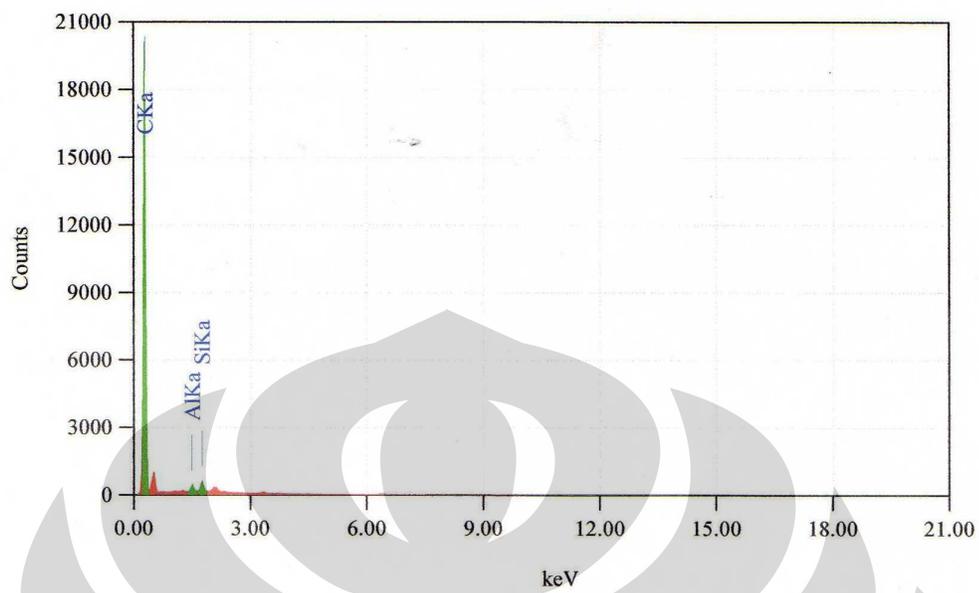
Gambar 4.17. Grafik EDS F2 Titik 2



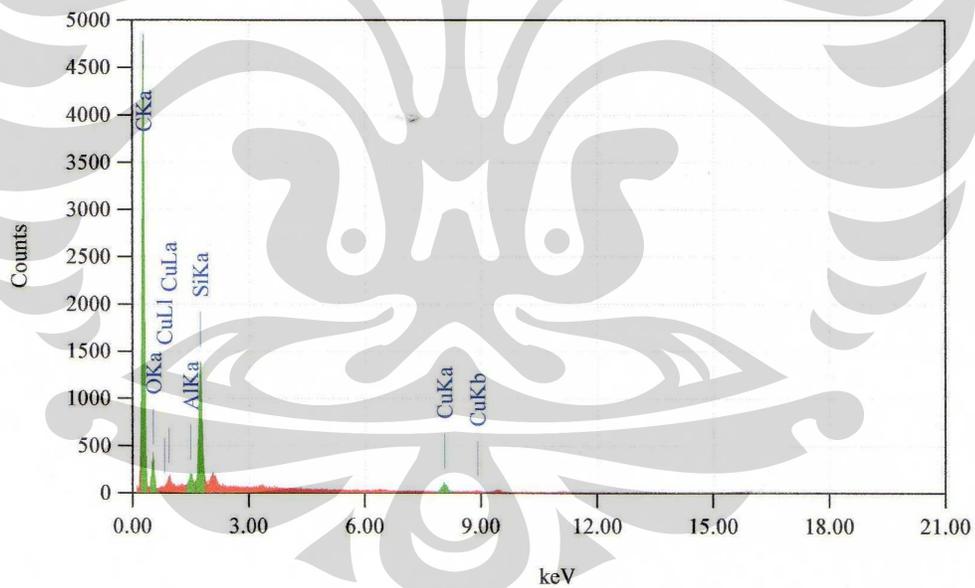
Gambar 4.18. Grafik EDS F2 Titik 3



Gambar 4.19. Grafik EDS F3 Titik 1



Gambar 4.20. Grafik EDS F3 Titik 2

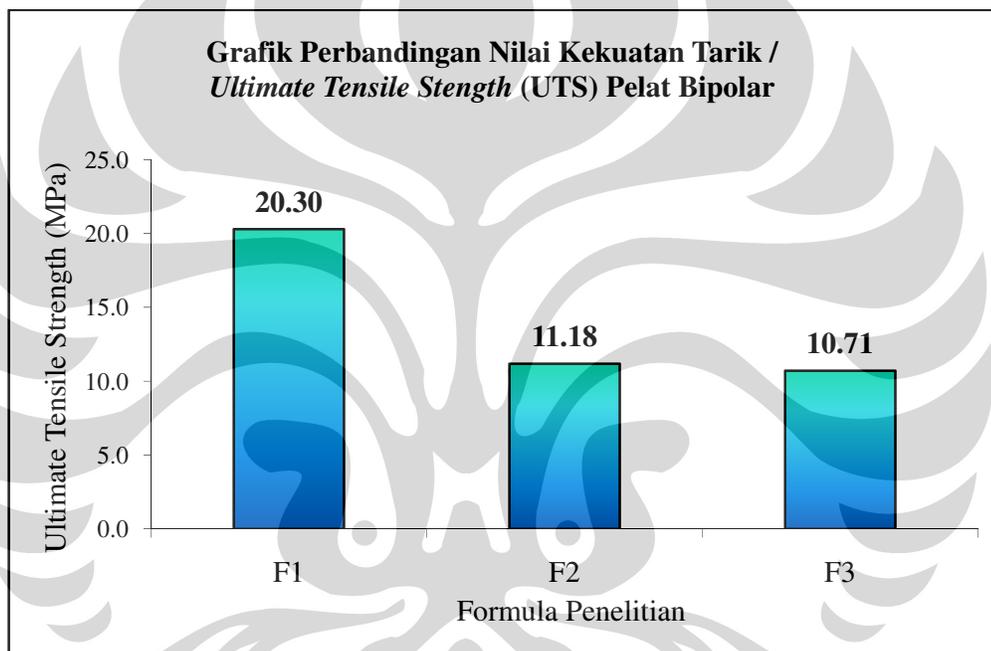


Gambar 4.21. Grafik EDS F3 Titik 3

BAB 5 PEMBAHASAN

5.1. Analisis Pengaruh Penambahan Nano Tembaga Terhadap Hasil Pengujian Tarik Pelat Bipolar

Grafik yang menunjukkan perbandingan nilai kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*) dari spesimen pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian adalah sebagai berikut:

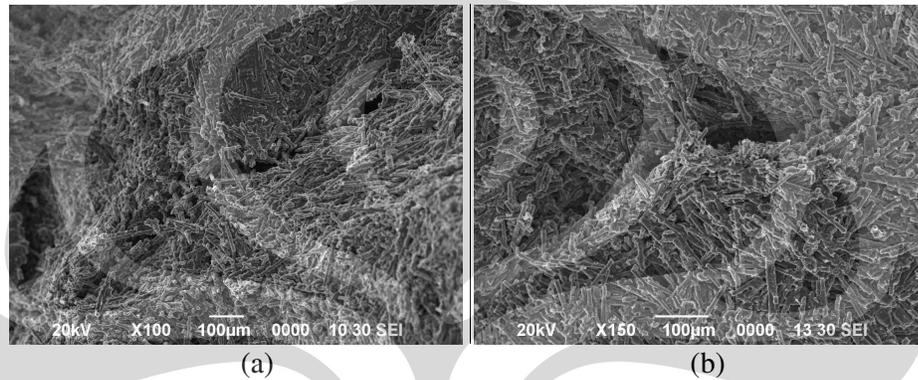


Gambar 5.1. Perbandingan Nilai Kekuatan Tarik Pelat Bipolar

Grafik di atas memperlihatkan perbandingan nilai kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*) pelat bipolar untuk ketiga formulasi penelitian. Secara umum dapat dikatakan bahwa berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penambahan nano tembaga (Cu) cenderung menurunkan kekuatan tarik dari komposit pelat bipolar. Dalam penelitian ini penambahan jumlah nano tembaga (Cu) semakin meningkat dari F1, F2, hingga F3 yaitu sebesar 0.5%wt, 1.0%wt, dan 2.0%wt. Nilai kekuatan tarik tertinggi terdapat pada F1 yaitu sebesar 20.30 MPa, sedangkan kekuatan tarik terendah dimiliki oleh F3 sebesar 10.71 MPa seperti

yang ditunjukkan dalam grafik diatas. Ketiga formulasi tersebut menunjukkan hasil pengujian tarik yang belum memenuhi standar DOE.

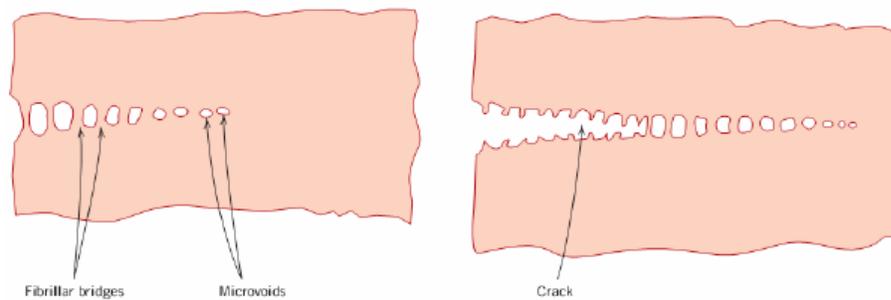
Komposit dengan kode formulasi F2 dan F3 memiliki kekuatan tarik yang jauh lebih rendah dibandingkan komposit formulasi F1. Hal ini bisa disebabkan oleh adanya rongga-rongga mikro pada komposit tersebut, seperti dapat dilihat dalam gambar di bawah ini:



Gambar 5.2. SEM Micrograph (a) F2 perbesaran 100x (b) F3 perbesaran 150x

Gambar tersebut adalah foto SEM untuk pelat bipolar dengan kode formulasi F5 dan F6 yang memperlihatkan adanya rongga-rongga. Rongga-rongga mikro seperti yang diperlihatkan pada gambar SEM akan menyebabkan rendahnya energi perpatahan, dan menurunkan kekuatan mekanik. Rongga-rongga yang terbentuk memicu konsentrasi tegangan saat diberikan beban mekanik terhadap komposit. Selain itu ikatan antarmuka antara matrik dan pengisi juga dapat menjadi salah satu faktor penyebab besar kecilnya nilai kekuatan tarik dari komposit. Semakin banyaknya campuran antara matriks PP dengan pengisi karbon yang tidak sempurna akan menyebabkan jarak antara satu gumpalan dengan gumpalan lainnya tidak beraturan.

Suatu fenomena yang mendahului perpatahan pada beberapa polimer termoplastik adalah terbentuknya *craze*. Kegagalan pada polimer terjadi melalui tahap *crazing*. Pada tahap ini terjadi pengembangan rongga-rongga mikro dan terhubung menjadi satu. Rongga-rongga mikro yang bergabung mulai membentuk retak yang akhirnya menyebabkan perpatahan. Gambar berikut ini menunjukkan gambaran skematik dari fenomena *craze*.

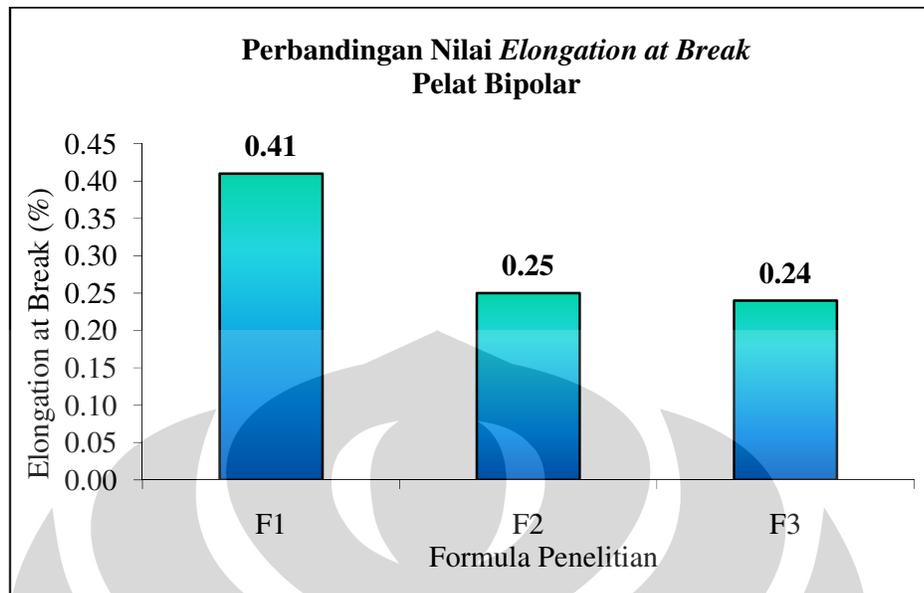


Gambar 5.3. Gambaran Skematik dari Fenomena *Craze*

Serbuk nano tembaga yang ditambahkan kedalam komposit dengan tujuan untuk meningkatkan sifat mekanis dari komposit tersebut. Penyebab peningkatan nilai kekuatan tarik komposit adalah karena serbuk tembaga memiliki nilai kekuatan tarik yang paling besar dibandingkan dengan bahan-bahan lainnya yaitu sebesar 220 MPa^[13]. Berdasarkan hukum campuran, kekuatan komposit akan meningkat jika ditambahkan penguat yang memiliki kekuatan lebih tinggi dibanding matriksnya. Kondisi seperti hukum campuran tersebut berlaku apabila campuran yang terbentuk dalam komposit benar-benar merata. Pencampuran yang merata salah satunya dapat dilakukan dengan metode infiltrasi likuidus seperti yang dilakukan dalam penelitian oleh Younghwan Jang. Tembaga (Cu) adalah material yang banyak dipilih sebagai penguat pada nanokomposit, terutama untuk tujuan meningkatkan konduktivitas listrik komposit^[54]. Metode yang digunakan dalam penelitian Younghwan Jang tersebut adalah dengan fabrikasi melalui proses infiltrasi likuidus, dengan tujuan mendapatkan pencampuran yang merata^[54]. Dari penelitian Younghwan Jang tersebut, diperoleh data bahwa penambahan tembaga dapat meningkatkan kekuatan tarik dari komposit pelat bipolar^[54]. Sedangkan pada penelitian ini digunakan metode pencampuran panas (*hot blending*) konvensional. Penelitian ini memperlihatkan bahwa penambahan nano tembaga kedalam komposit justru menurunkan kekuatan tarik pelat bipolar. Menurunnya kekuatan tarik akibat proses fabrikasi, yaitu pencampuran panas, yang kurang sempurna.

Sementara grafik yang menunjukkan perbandingan nilai elongasi saat perpatahan atau *Elongation at Break* dari sampel pelat bipolar untuk ketiga formulasi penelitian adalah sebagai berikut:

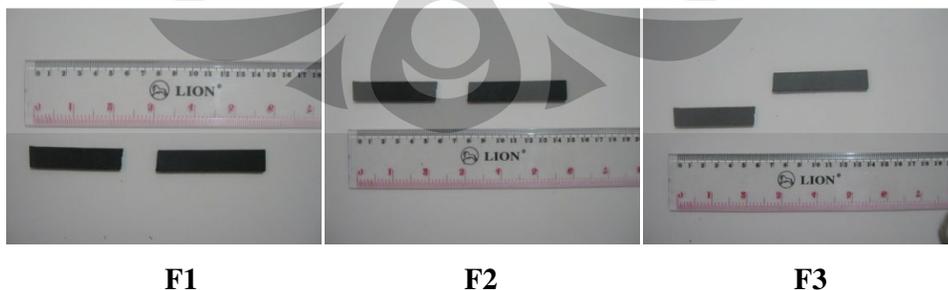
Universitas Indonesia



Gambar 5.4. Grafik Perbandingan Nilai *Elongation at Break* Pelat Bipolar

Berdasarkan grafik tersebut di atas terlihat bahwa elongasi yang dialami pelat bipolar masih cukup rendah, yakni masih berkisar antara 0,24% untuk F3 hingga 0,41% untuk F1. Rendahnya nilai elongasi ini menunjukkan bahwa pelat bipolar cenderung bersifat getas dan memiliki nilai keuletan yang sangat terbatas. Hal ini dapat terjadi karena pelat bipolar berbasis komposit PP-karbon ini masih didominasi oleh fraksi volume penguat karbon yang cenderung bersifat getas. Sementara dari grafik yang diperlihatkan di atas, pengaruh penambahan nano tembaga (Cu) cenderung menurunkan elongasi pelat bipolar, sebanding dengan penurunan kekuatannya.

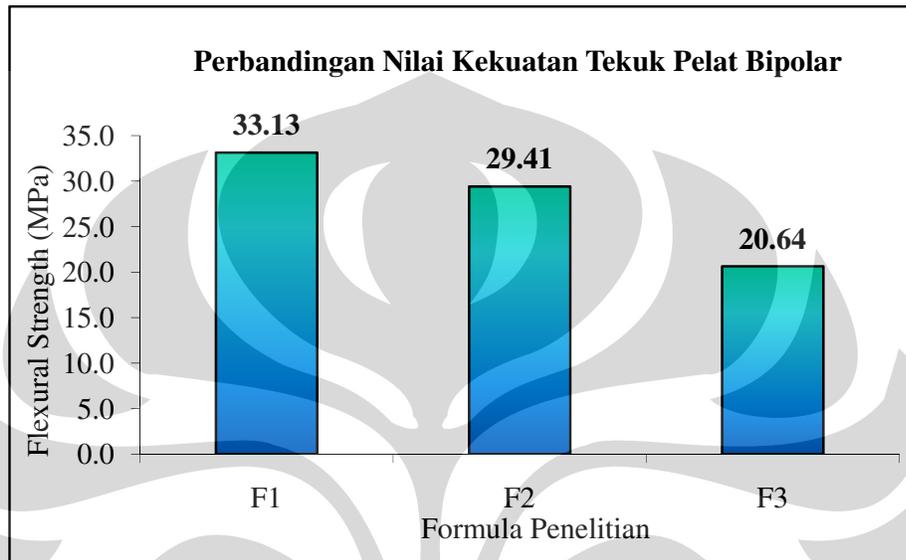
Patahan pelat bipolar hasil pengujian tarik adalah sebagai berikut:



Gambar 5.5. Patahan Pelat Bipolar Hasil Pengujian Tarik

5.2. Analisis Pengaruh Penambahan Nano Tembaga Terhadap Hasil Pengujian Tekuk Pelat Bipolar

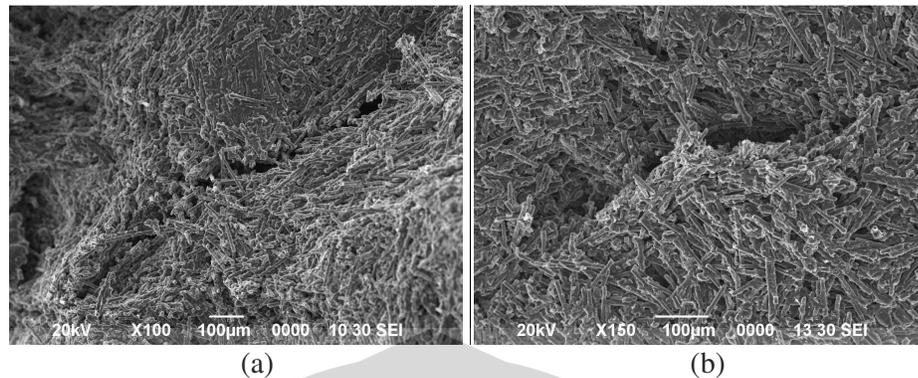
Grafik yang menunjukkan perbandingan nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) dari spesimen pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian adalah sebagai berikut:



Gambar 5.6. Grafik Perbandingan Nilai Kekuatan Tekuk Pelat Bipolar

Grafik di atas memperlihatkan perbandingan nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) pelat bipolar untuk ketiga formulasi penelitian. Secara umum dapat dikatakan bahwa berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penambahan nano tembaga (Cu) cenderung menurunkan kekuatan tekuk dari komposit pelat bipolar. Dalam penelitian ini penambahan jumlah nano tembaga (Cu) semakin meningkat dari F1, F2, hingga F3 yaitu sebesar 0.5%wt, 1.0%wt, dan 2.0%wt. Nilai kekuatan tekuk tertinggi terdapat pada F1 yaitu sebesar 33.13 MPa, sedangkan kekuatan tekuk terendah dimiliki oleh F3 sebesar 20.64 MPa seperti yang ditunjukkan dalam grafik diatas. Formulasi F1 dan F2 sudah memenuhi standar dari DOE, sedangkan F3 belum memenuhi standar yang diterapkan DOE.

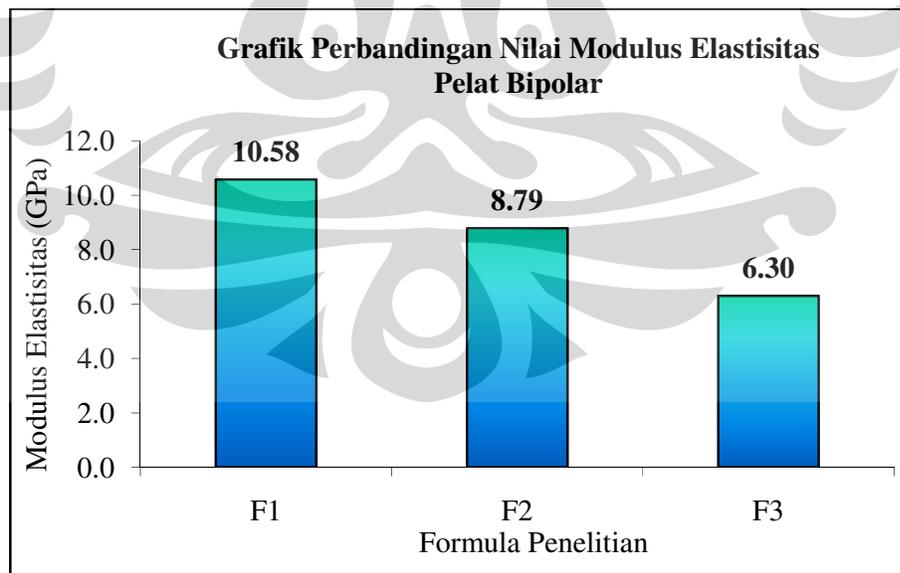
Karakteristik morfologi patahan tekuk pelat bipolar yang direpresentasikan dalam SEM *micrograph* dapat dijadikan sebagai alat bantu (*tools*) untuk menjelaskan fluktuasi nilai kekuatan tekuk untuk setiap formula penelitian.



Gambar 5.7. SEM Micrograph (a) F2 perbesaran 100x (b) F3 perbesaran 150x

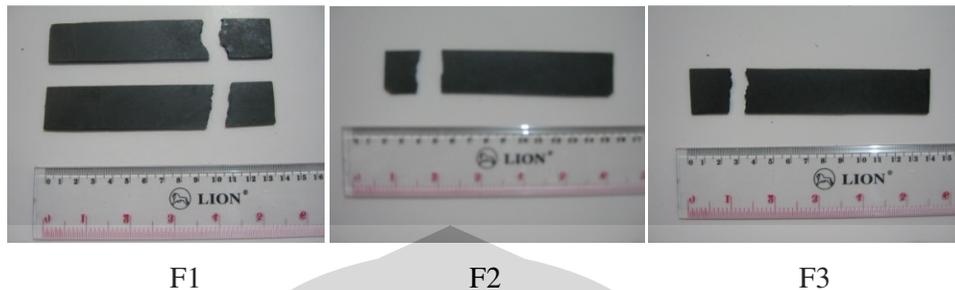
Dari gambar SEM tersebut terlihat bahwa untuk patahan tekuk F3 terlihat adanya rongga yang lebih lebar dan panjang jika dibandingkan dengan rongga yang terdapat pada F2. Patahan sampel F2 dan F3 memiliki banyak *microvoid* yang dapat mempercepat mekanisme perambatan retak ketika komposit mengalami pembebanan mekanis.

Selain nilai kekuatan tekuk pada pengujian tekuk juga akan didapatkan nilai modulus elastisitas dari sampel komposit tersebut. Sementara grafik yang menunjukkan perbandingan nilai modulus elastisitas (*modulus of elasticity*) dari spesimen pelat bipolar adalah:



Gambar 5.8. Grafik Perbandingan Nilai Modulus Elastisitas Pelat Bipolar

Bentuk patahan tekuk dari ketiga formulasi penelitian pelat bipolar ini ditunjukkan dalam gambar di bawah ini:

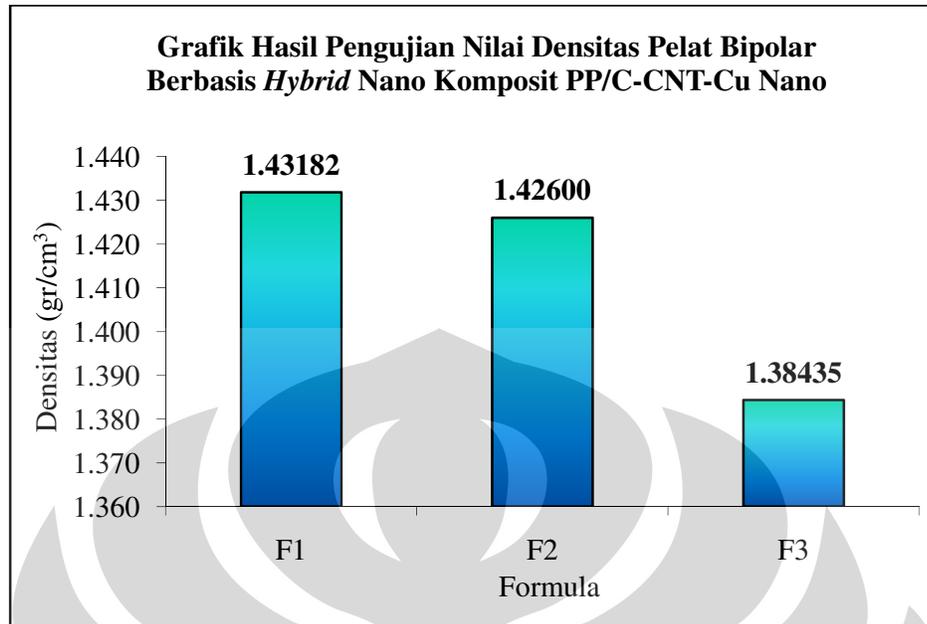


Gambar 5.9. Patahan Pelat Bipolar Hasil Pengujian Tekuk

Penyebab rendahnya nilai kekuatan tekuk dari sampel F2 dan F3 adalah dengan adanya rongga-rongga, seperti ditunjukkan dalam foto SEM pada gambar 5.7. Rongga-rongga tersebut menjadi tempat awalnya terjadinya retakan sebelum komposit patah. Terbentuknya rongga tersebut bisa disebabkan oleh distribusi matriks dan penguat yang tidak merata.

5.3. Analisis Pengaruh Penambahan Nano Tembaga Terhadap Nilai Densitas Pelat Bipolar

Nilai densitas dari pelat bipolar merupakan aspek penting yang perlu diperhatikan dalam fabrikasi pelat bipolar. Nilai densitas yang rendah sangat diharapkan dalam fabrikasi pelat bipolar. Semakin rendah nilai densitas pelat bipolar, maka berat total pelat bipolar juga semakin rendah. Densitas pelat bipolar komposit harus lebih kecil dari densitas pelat bipolar grafit murni. Reduksi berat dari pelat bipolar mutlak diperlukan agar dapat dihasilkan pelat bipolar dengan berat yang cukup ringan sehingga *fuel cell* dapat disusun (*stacking*) dengan jumlah yang optimal sehingga menghasilkan efisiensi *output* energi listrik yang cukup besar. Bobot yang ringan adalah kunci penting dalam aplikasi *fuel cell* dalam bidang transportasi.



Gambar 5.10. Grafik Perbandingan Nilai Densitas Aktual Pelat Bipolar

Reduksi berat dari pelat bipolar merupakan salah satu utama parameter keberhasilan penelitian ini. Perbedaan nilai kerapatan massa bergantung pada tipe *filler* dan komposisinya dalam komposit pelat bipolar. Untuk setiap formulasi dalam penelitian ini, kadar penambahan nano tembaga (Cu) adalah:

- Formula 1 (F1) ditambahkan nano tembaga sebanyak 0.5%wt.
- Formula 2 (F2) ditambahkan nano tembaga sebanyak 1.0%wt.
- Formula 2 (F3) ditambahkan nano tembaga sebanyak 2.0%wt.

Kerapatan massa tertinggi dimiliki oleh komposit F1 yaitu sebesar 1.43 g/cm³. Sedangkan kerapatan massa terendah pada komposit F3 sebesar 1.38 g/cm³. Dari grafik tersebut dapat dilihat pengaruh penambahan kadar nano tembaga di dalam komposit. Semakin banyak penambahan nano tembaga kedalam komposit, maka kerapatan massa komposit semakin berkurang. Nilai kerapatan massa yang diperoleh secara umum bisa dikatakan sudah memenuhi target karena nilainya jauh di bawah kerapatan massa pelat grafit murni sebesar 1.88 g/cm³.

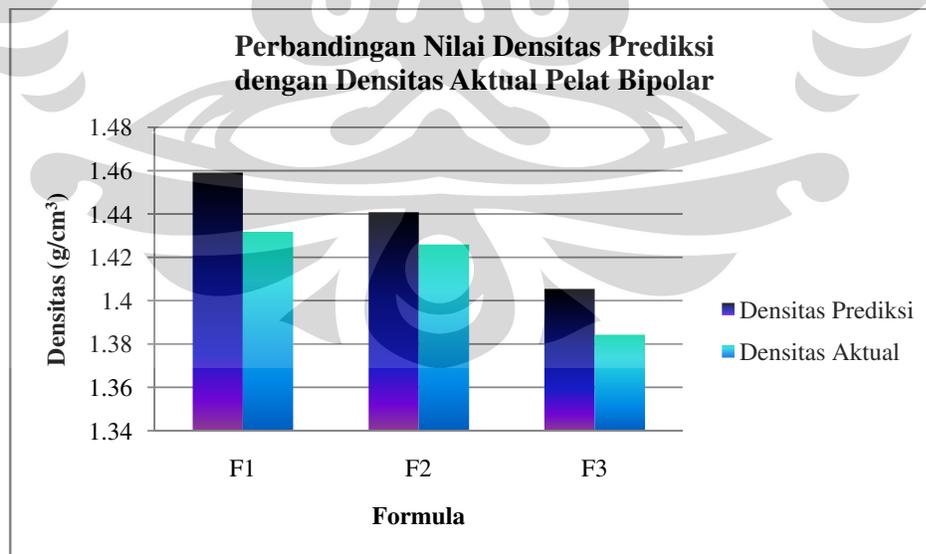
Sebelum dilakukan penelitian, sebelumnya telah dihitung prediksi nilai kerapatan massa pelat bipolar berdasarkan data literatur. Berdasarkan perhitungan awal memang sudah diprediksikan bahwa kerapatan massa pelat bipolar akan menurun seiring dengan penambahan kadar nano tembaga. Hal ini dikarenakan

sifat dasar nano tembaga yang mempunyai densitas sangat rendah maksimal 0.35 g/cm^3 . Nilai kerapatan massa ini sangat jauh dibandingkan nilai kerapatan massa material penyusun komposit lainnya. Prediksi perhitungan kerapatan massa pelat bipolar dapat dilihat dalam table di bawah ini:

Tabel 5.1. Nilai Densitas Prediksi Pelat Bipolar

Bahan	Densitas (g/cm^3)	F1	F2	F3
Polipropilena	0.90	0.1933	0.1837	0.1651
Serat Karbon Fortafile 243	1.80	0.7296	0.7204	0.7028
Grafit 4012	1.69	0.4378	0.4323	0.4217
PP-g-MA	0.91	0.0730	0.0720	0.0703
Anti Oksidan CN-CAT A215	0.85	0.0146	0.0144	0.0141
CNT (Single Wall)	1.40	0.0036	0.0036	0.0035
Cu Nano	0.35	0.0073	0.0144	0.0281
	TOTAL	1.4592	1.4409	1.4055

Perbandingan nilai densitas prediksi dengan densitas aktual untuk masing-masing formulasi penelitian dapat dilihat dalam gambar dibawah ini:



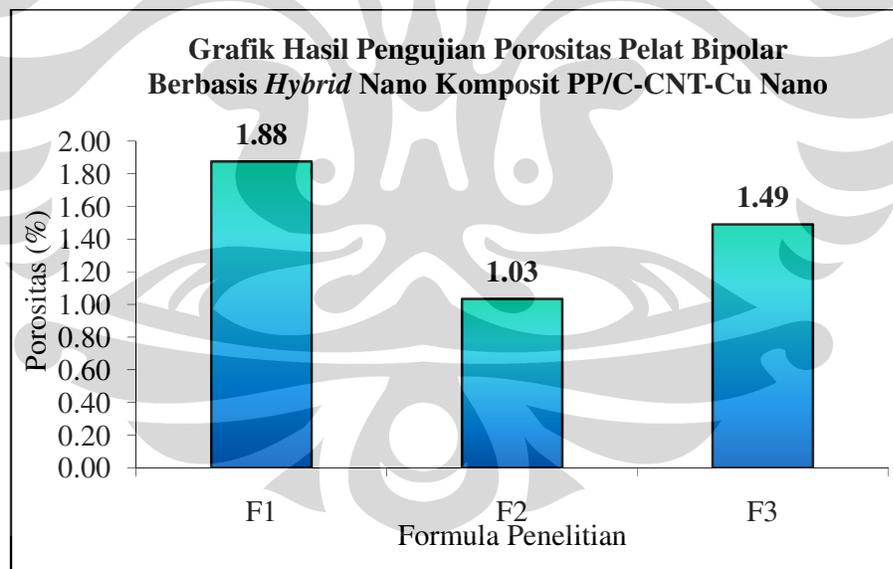
Gambar 5.11. Perbandingan Densitas Prediksi dengan Densitas Aktual Pelat Bipolar

5.4. Analisis Pengaruh Penambahan Nano Tembaga Terhadap Nilai Porositas Pelat Bipolar

Porositas adalah adanya ruang kosong (void) yang terdapat di dalam sampel komposit. Semakin kecil nilai porositas menunjukkan semakin sedikit juga rongga-rongga mikro (*micro void*) di dalam komposit tersebut, sedangkan semakin banyak porositas berarti semakin banyak pula rongga-rongga pada komposit tersebut.

Untuk aplikasi PEMFC, pelat bipolar harus memiliki nilai porositas yang rendah. Dengan semakin rendahnya nilai porositas pada pelat bipolar berarti bahwa jumlah rongga ataupun *micro void* dalam struktur pelat bipolar juga cukup rendah. Hal ini akan berdampak pada meningkatnya sifat mekanis dan konduktivitas listrik dari pelat bipolar tersebut yang merupakan salah satu parameter keberhasilan dalam penelitian ini.

Grafik yang menunjukkan perbandingan nilai porositas pelat bipolar berbasis *hybrid* nano komposit PP/C-CNT-Cu nano untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 5.12. Grafik Perbandingan Nilai Porositas Pelat Bipolar

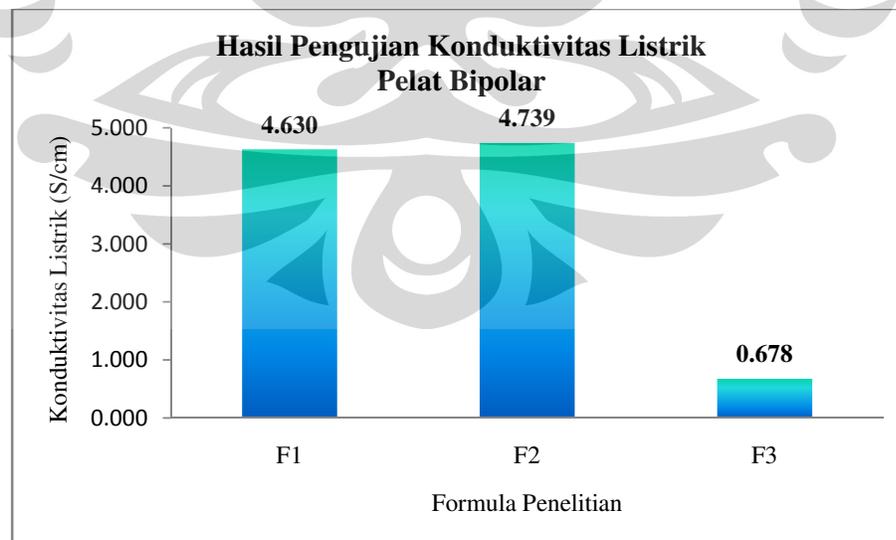
Grafik di atas memperlihatkan bahwa peningkatan penambahan fraksi volume penguat nano tembaga secara umum menurunkan nilai porositas pelat bipolar secara signifikan. Pelat bipolar dengan formulasi F2 memiliki nilai

porositas terendah sebesar 1.03% , dengan adanya penambahan fraksi volume penguat nano tembaga sebesar 1.0 wt%. Peningkatan fraksi penguat nano tembaga dari 0.5 wt% pada F1 menjadi 1.0 wt% pada F2 menurunkan porositas pelat bipolar secara signifikan. Tetapi kasusnya berbeda pada pelat bipolar formulasi F3. Penambahan fraksi penguat nano tembaga sebanyak 2.0 wt% justru menunjukkan porositas sebesar 1.49%. Nilai ini berada di bawah nilai porositas F1 tetapi jauh di atas nilai porositas F3. Nilai porositas untuk ketiga formulasi pelat bipolar tersebut sudah memenuhi target dari DOE of America yaitu sebesar 2%.

Secara umum porositas dipengaruhi oleh proses pencampuran dan penekanan panas. Semakin baik kedua proses tersebut dilakukan, maka nilai porositas akan semakin berkurang. Dalam penelitian ini dilakukan pencampuran panas dengan waktu rata-rata 15 menit untuk setiap tahap pencampuran, sedangkan proses penekanan panas juga dilakukan secara bersiklus. Hal ini dilakukan untuk meminimalisasi terjadinya porositas pelat bipolar.

5.5. Analisis Pengaruh Penambahan Nano Tembaga Terhadap Nilai Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar

Grafik perbandingan nilai konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis *hybrid* nano komposit PP/C-CNT-Cu nano untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 5.13. Grafik Perbandingan Nilai Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar Metode *Four Point Probe*

Pengukuran nilai konduktivitas pelat bipolar dilakukan dengan metode *four point probe*. Pengukuran dilakukan untuk ketiga formulasi penelitian. Sampel yang akan diukur terlebih dahulu diampelas untuk menghilangkan lapisan PP yang terbentuk pada permukaan sampel.

Berdasarkan grafik diatas diperlihatkan bahwa konduktivitas listrik tertinggi terdapat pada sampel F2 yaitu sebesar 4.739 S/cm, sedangkan konduktivitas terendah pada F3 sebesar 0.678 S/cm. Penambahan nano tembaga (Cu) adalah semakin meningkat dari F1 sebesar 0.5 wt%, F2 sebesar 1.0 wt%, dan F3 sebesar 2.0 wt%. Jika kita mengasumsikan konduktivitas listrik nano tembaga sesuai dengan literatur, maka seiring dengan penambahan kadar nano tembaga maka komduktivitas listrik akan semakin meningkat. Akan tetapi dalam penelitian ini menunjukkan hasil yang berbeda. Penambahan nano tembaga (Cu) secara umum justru menurunkan konduktivitas listrik pelat bipolar berdasarkan pengujian yang dilakukan.

Fenomena ini dapat dijelaskan berdasarkan hasil pengujian konduktivitas secara aktual yang dilakukan terhadap bahan nano tembaga (Cu). Perbandingan nilai konduktivitas listrik serbuk nano tembaga (Cu) menurut literature dan berdasarkan pengujian aktual adalah sebagai berikut:

Table 5.2. Konduktivitas Listrik Nano Tembaga

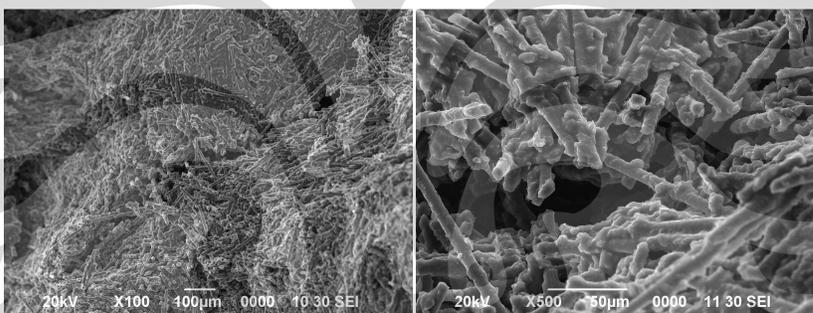
Sumber Acuan	Konduktivitas Listrik	Satuan
Literatur	596000	S/cm
Pengujian LCR Meter	1 E-03	S/cm
Pengujian <i>Four Point Probe</i>	2.237	S/cm

Dari hasil pengujian aktual terhadap nilai konduktivitas listrik pelat bipolar dengan metode LCR meter dan *Four Point Probe* terlihat bahwa nilai konduktivitas serbuk nano tembaga yang didapat sangat jauh dengan yang ada dalam literatur. Hal ini tepat menggambarkan fenomena yang terjadi pada hasil pengukuran konduktivitas pelat bipolar untuk ketiga formula. Konduktivitas listrik pelat bipolar semakin menurun seiring dengan bertambahnya kandungan

nano tembaga. Nilai konduktivitas listrik nano tembaga yang kecil menyebabkan menurunnya nilai konduktivitas pada komposit sesuai dengan hukum campuran.

5.6. Analisis Karakteristik Morfologi Patahan Tekuk Pelat Bipolar Dengan SEM

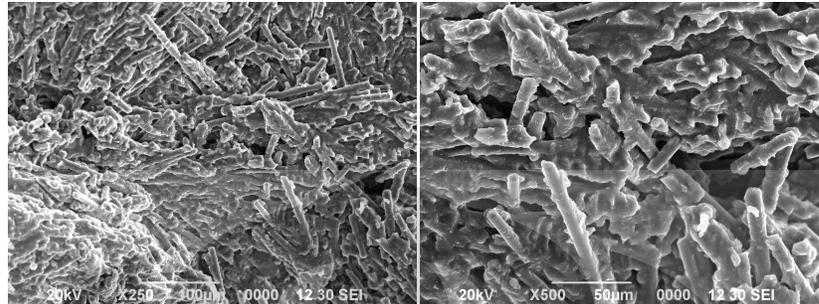
Patahan hasil pengujian tekuk selanjutnya dilakukan pengamatan morfologi dengan bantuan *Scanning Electron Microscope* (SEM), sehingga didapat sebuah foto SEM micrograph. Karakterisasi sampel patahan tekuk dilakukan hanya terhadap sampel pelat formulasi F2 dan F3 saja. Pemilihan sampel tersebut didasarkan pada hasil pengujian sifat mekanis pelat bipolar. Tujuan utama dari pengamatan SEM ini adalah untuk membandingkan sifat mekanis berdasarkan morfologi patahan tekuk. Sampel F2 secara umum memiliki sifat mekanis yang lebih baik dibanding sampel F3.



Gambar 5.14. SEM *Micrograph* F2 titik 1

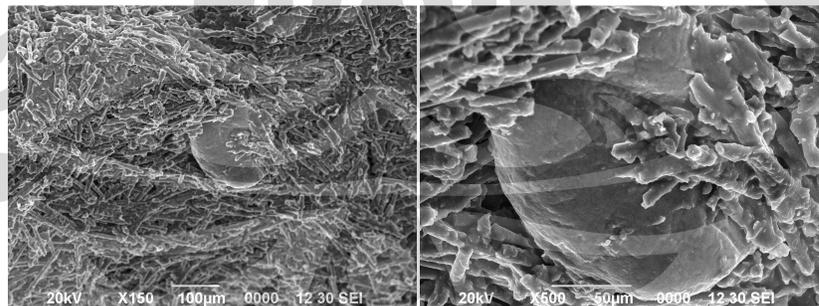
Dari gambar tersebut terlihat adanya rongga-rongga yang memanjang pada sampel F2. Dalam perbesaran 100 kali terlihat alur rongga yang terbentuk. Penampang rongga-rongga terlihat lebih jelas dengan perbesaran hingga 500 kali. Terlihat jelas pada gambar diatas bahwa rongga yang terbentuk cukup lebar, yaitu mencapai 50 mikrometer. Gambar tersebut juga memperlihatkan bahwa pembasahan PP terhadap serat karbon sudah cukup baik. Hal ini menandakan bahwa fungsi *coupling agent* yang diberikan oleh PP-g-MA sudah cukup baik. Jika dilihat dengan hasil pengujian tekuk, maka kekuatan tekuk dari sampel F2 sudah memenuhi standar karena nilainya sudah lebih dari 25 MPa. Rongga-rongga tersebut bisa juga menjadi penyebab kekuatan mekanis sampel F2 tidak sebagus

F1. Tetapi disini tidak bisa ditarik kesimpulan demikian karena tidak dilakukan pengamatan SEM terhadap sampel F1.



Gambar 5.15. SEM Micrograph F2 titik 2

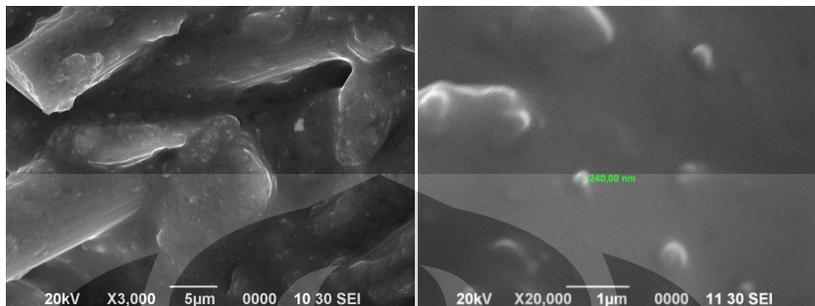
Pengamatan sampel F1 pada titik 2 menunjukkan hasil yang hampir sama seperti halnya pada titik 1. Namun pada pengamatan titik 2 ini terlihat adanya rongga yang lebih kecil jika dibanding rongga (*void*) yang terlihat pada titik 1. Rongga yang teramatai pada titik 2 hanya sekitar 30 mikrometer. Dari hasil pengamatan terhadap titik 1 dan titik 2 pada F2, sudah dapat dilihat bahwa pada sampel F2 terdapat rongga yang tersebar pada beberapa bagian permukaan patahan.



Gambar 5.16. SEM Micrograph F2 titik 3

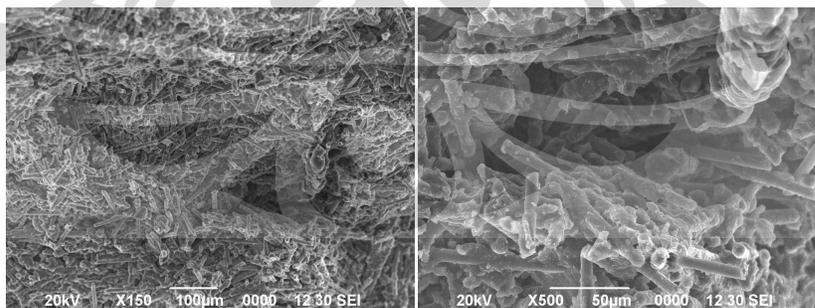
Pada pengamatan permukaan patahan sampel F2 titik 3, terlihat adanya gumpalan polipropilena (PP) disekitar serat karbon yang terlihat. Pada gambar diatas diperlihatkan bahwa gumpalan yang terbentuk cukup besar yaitu hingga 150 mikrometer. Penyebab terjadinya gumpalan tersebut dapat disebabkan oleh proses pencampuran yang kurang sehingga masih terdapat sekumpulan PP yang

belum terdistribusi merata. Selain dari proses pencampuran panas yang kurang maksimal, terjadinya gumpalan pada sampel F2 tersebut juga bisa disebabkan akibat terlalu kuatnya ikatan antar rantai polimer pada PP.



Gambar 5.17. SEM *Micrograph* Cu Nano pada F2 titik 1

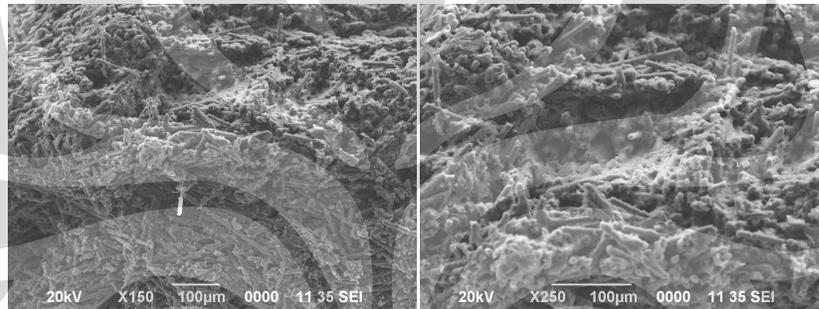
Pengamatan terhadap partikel nano tembaga (Cu) di dalam sampel F2 terlihat jelas seperti gambar di atas. Sampel F2 mengandung nano tembaga sebesar 1.0 wt% atau 0.041 %vol. Dengan kandungan nano tembaga yang sangat sedikit tersebut, pengamatan terhadap partikel nano tembaga tersebut sangat susah dilakukan. Pada hasil pengamatan di atas dapat dilihat bahwa serbuk nano tembaga yang terdeteksi berukuran sekitar 240 nm. Letak partikel nano tembaga sesuai dengan gambar di atas adalah berada di tengah-tengah PP. Distribusi dan penyebaran serta pemerataan partikel nano tembaga di dalam komposit tidak dapat diamati lebih lanjut karena fraksi volume yang terlalu kecil. Dengan kecilnya fraksi volume nano tembaga dalam komposit, maka penyebaran partikel nano tembaga dapat dipastikan sangat berjauhan.



Gambar 5.18. SEM *Micrograph* F3 titik 1

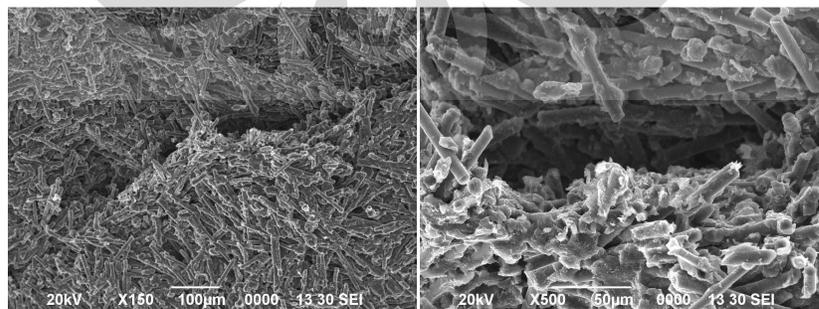
Dari gambar tersebut terlihat adanya rongga-rongga yang memanjang pada sampel F3. Dalam perbesaran 150 kali terlihat alur rongga yang terbentuk.

Penampang rongga-rongga terlihat lebih jelas dengan perbesaran hingga 500 kali. Terlihat jelas pada gambar diatas bahwa rongga yang terbentuk cukup lebar, yaitu mencapai 100 mikrometer. Gambar tersebut juga memperlihatkan bahwa pembasahan PP terhadap serat karbon sudah cukup baik. Rongga-rongga yang terbentuk pada sampel F3 jauh lebih besar dibanding dengan rongga pada F2. Hal ini yang menyebabkan sifat mekanis F3 lebih rendah dibanding sifat mekanis sampel F2. Pada gambar di atas juga terlihat adanya serat karbon yang tercabut atau terlepas dari matriks PP. Hal ini memperlihatkan bahwa kekuatan ikat permukaan antara matriks PP dengan penguat serat karbon tidak terlalu kuat sehingga serat karbon mudah terlepas dari matriks PP.



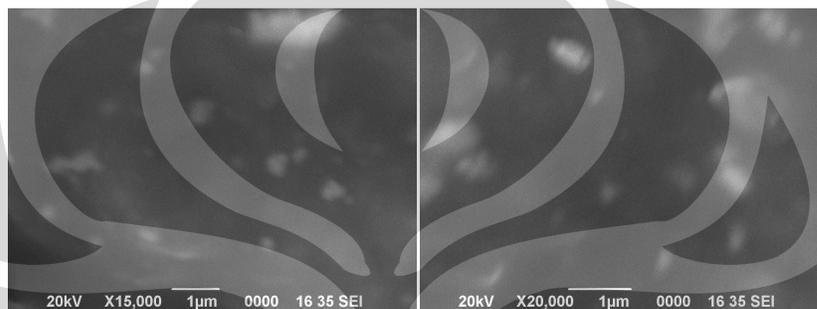
Gambar 5.19. SEM *Micrograph* F3 titik 2

Pengamatan morfologi patahan tekuk F3 pada titik 2 dengan perbesaran 150x terlihat adanya gumpalan dari matriks PP serta banyaknya rongga-rongga mikro (*microvoids*). Pada perbesaran 250x terlihat lebih jelas bahwa pembasahan matriks PP terhadap serat karbon sangat buruk dan banyak terdapat rongga pada antarmuka (*interface*) antara matriks PP dan serat karbon. Terlihat pada gambar tidak terbentuk ikatan antara sesama serat karbon.



Gambar 5.20. SEM *Micrograph* F3 titik 3

Pada pengamatan morfologi sampel F3 pada titik 3 terlihat adanya rongga-rongga yang memanjang dan diameter sangat lebar. Pada perbesaran 150 kali terlihat alur dan pola dari rongga yang terbentuk. Demikian pula dengan penambahan perbesaran hingga 500 kali terlihat rongga yang terbentuk sangat lebar hingga mencapai 200 mikrometer. Rongga-rongga yang sangat besar tersebut menjadi salah satu penyebab kekuatan mekanis pelat sampel F3 lebih kecil dibanding sampel yang lainnya. Terlihat pula dalam gambar di atas bahwa susunan dari serat karbon sangat acak.



Gambar 5.21. SEM *Micrograph* Cu Nano pada F3 titik 1

Pengamatan partikel nano tembaga pada sampel F3 dilakukan pada perbesaran hingga 20.000 kali. Pada kondisi perbesaran ini tidak terlihat dengan jelas morfologi struktur dari Cu nano. Gambar partikel Cu nano yang berhasil diamati masih terlalu kabur dan susah diidentifikasi lebih lanjut.

Secara umum pengamatan terhadap sampel F2 dan F3 menghasilkan data yang cukup *representative* untuk menggambarkan perbedaan sifat mekanis antara sampel pelat F2 dengan F3. Baik sampel F2 maupun sampel F3 keduanya memiliki rongga-rongga yang terdapat pada permukaan patahan tekuk. Namun sampel F3 menunjukkan ukuran rongga yang lebih besar sehingga hal ini dapat menjelaskan mengapa sifat mekanis sampel F3 lebih rendah dibanding F2. Sedangkan dalam pengamatan partikel nano tembaga, hanya dapat terlihat pada sampel F2 saja, sementara pada sampel F3 tidak bisa menunjukkan hasil yang jelas. Berdasarkan data-data dan analisa ini dapat dijelaskan bahwa sampel F2 lebih baik dari sampel F3 dalam hal sifat mekanis, berdasarkan morfologi patahan tekuk yang terbentuk.

BAB 6

KESIMPULAN

Dari hasil eksperimen yang dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sampel F1 memiliki sifat mekanis, meliputi kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan modulus elastisitas yang paling tinggi.
2. Nilai kekuatan tarik dari ketiga sampel belum memenuhi standar DOE.
3. Nilai kekuatan tekuk sampel F1 dan F2 sudah memenuhi standar DOE untuk digunakan sebagai pelat bipolar.
4. Nilai densitas ketiga sampel sudah memenuhi standar untuk digunakan sebagai pelat bipolar. Nilai kerapatan masa (densitas) terendah dimiliki oleh sampel F3, sedangkan nilai porositas terendah dimiliki oleh sampel F2.
5. Konduktivitas listrik ketiga sampel masih jauh di bawah standar DOE. Nilai konduktivitas listrik tertinggi dimiliki sampel F2 yaitu sebesar 4.739 S/cm.
6. Pengaruh fraksi volume nano tembaga (Cu nano) adalah menurunkan sifat mekanis dan konduktivitas listrik sampel. Di sisi lain fraksi volume penguat nano tembaga menurunkan densitas dan porositas sampel.
7. Hasil pengamatan morfologi patahan tekuk dengan SEM menunjukkan adanya pembasahan yang kurang sempurna dari polipropilena (PP) terhadap serat karbon. Hal ini terlihat dengan adanya rongga-rongga dan gumpalan PP.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. BBM Habis 2014. Kompas Online, Berita Sains. 22 November 2010.
<http://sains.kompas.com/read/2009/03/15/21163274/bbm.habis.2014>
- [2]. Menteri ESDM, *Ketersediaan Energi di Indonesia Masih Banyak*. Pikiran Rakyat Online, Beranda. 22 November 2010.
<http://www.pikiran-rakyat.com/node/112455>
- [3]. Sasawat Mahabunphachai, Ömer Necati Coraa, and Muammer Koc . *Effect of Manufacturing Processes On Formability And Surface Topography On Proton Exchange Membrane Fuel Cell Metallic Bipolar Plates*. Journal of Power Sources 195 (2010) 5269–5277.
- [4]. EG & G Services Parsons Inc, *Fuel Cell Handbook 5th Edition* (West Virginia: U.S. Departement of Energy, October 2000)
- [5]. Nur Himawan Abdillah. *Pembuatan Komposit Pelat Bipolar Dengan Matriks Polipropilena (PP) Dengan Penguat Karbon Dan Aditif Polivinylidene Flouride (PVDF)*". Skripsi. Fakultas Teknik, Departemen Metalurgi Dan Material. Universitas Indonesia. 2008.
- [6]. Y. Wang. *Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. Thesis Master of Applied Science, Chemical Engineering University of Waterloo, Ontario Canada, 2006.
- [7]. Yoghi Suharjanto. *Komposit Konduktif Polipropilena (PP)/Maleated-Anhydride-Grafted-Polypropylene (PP-g-MA)/Karbon Untuk Aplikasi Pelat Bipolar Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells*. Skripsi. Fakultas Teknik, Departemen Metalurgi Dan Material. Universitas Indonesia. 2009

- [8]. B.K. Kakati, D. Sathiyamoorthy , and A. Verma. *Electrochemical And Mechanical Behavior Of Carbon Composite Bipolar Plate For Fuel Cell*. International journal of hydrogen energy 35 (2010) 4185–4194
- [9]. Min-Chien Hsiao, Shu-Hang Liao, Ming-Yu Yen, Chen-Chi M. Ma, Shuo-Jen Lee, Yung-Hung Chen, Chih-Hung Hung, Yu-Feng Lin, and Xiao-Feng Xie. *Electrical And Thermal Conductivities Of Novel Metal Mesh Hybrid Polymer Composite Bipolar Plates For Proton Exchange Membrane Fuel Cells*. Journal of Power Sources 195 (2010) 509–515
- [10]. Shu-Hang Liao, Chuan-Yu Yen, Cheng-ChihWeng, Yu-Feng Lin, Chen-Chi M. Ma, Ching-Hung Yang, Ming-Chi Tsai, Ming-Yu Yen, Min-Chien Hsiao, Shuo-Jen Lee, Xiao-Feng Xie, and Yi-Hsiu Hsiao. *Preparation And Properties Of Carbon Nanotube/Polypropylene Nanocomposite Bipolar Plates For Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells*. Journal of Power Sources 185 (2008) 1225–1232
- [11]. Shu-Hang Liao, Cheng-ChihWeng, Chuan-Yu Yen, Min-Chien Hsiao, Chen-Chi M. Ma, Ming-Chi Tsai, Ay Su, Ming-Yu Yen, Yu-Feng Lin, and Po-Lan Liu. *Preparation And Properties Of Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes/Polypropylene Nanocomposite Bipolar Plates For Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells*. Journal of Power Sources 195 (2010) 263–270
- [12]. R Chris and S Scott, “*Introduction to Fuel Cell Technology*” (Notre Dame : U.S.A Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame, may 2003)
- [13]. Taufik Arya Bimanyu. *Pengaruh Penambahan Tembaga Terhadap Sifat Mekanik Dan Konduktivitas Pelat Bipolar Komposit PP/C-Cu*. Skripsi. Fakultas Teknik, Departemen Metalurgi Dan Material. Universitas Indonesia. 2009

- [14]. EG & G Services Parsons Inc, *Fuel Cell Handbook* 7th Edition (West Virginia: U.S. Department of Energy, October 2000)
- [15]. J. M. King dan M. J. O'Day, *Applying fuel cell experience to sustainable power products*, *Jurnal of Power Sources* (2000), 86, 16 – 22. Abstrak: <http://www.sciencedirect.com>
- [16]. D. P. Davies, et al., *Bipolar plate materials for solid polymer fuel cells*, *Jurnal of Applied Electrochemistry* (2000), 30, hlm. 101 – 105 <http://www.springerlink.com/content/j38103237826366h/fulltext.pdf>
- [17]. J. Larminie dan A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained* (West Sussex: John Wiley & Sons, 2000)
- [18]. M. J. Ajersch dan M. W. Fowler, *Fuel Cell Science, Engineering and Technology* (2003).
- [19]. V. Mehta dan J. S. Cooper, *Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing*, *Jurnal of Power Sources*, 2003
- [20]. A. Hermann, T. Chaudhuri, dan P. Spagnol, *International Journal of Hydrogen Energy* (2005)
- [21]. <http://www.eppo.go.th/encon/energyresearch/PDF/somruthai.pdf>
- [22]. D. Busick. *New Materials for Battery and Fuel Cells*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Pennsylvania, 2000
- [23]. A. Kumar dan R.G. Reddy, *Fundamentals of Advanced Materials for Energy Conversion*, Eds. D. Chandra and R.G. Bautista (Warrendale: TMS, 2002)

- [24]. Bor Z. Jang, *Advanced Polymer Composites* (USA: ASM International, 1994)
- [25]. F. L. Matthew dan R. D. Rawlings, *Composite Materials: Engineering and Science* (London: Chapman and Hall, 1994)
- [26]. Edward E. Muccio, *Plastics Processing Technology* (USA: ASM International, 1994)
- [27]. Anatole A. Klyosov, *Wood Plastic Composites* (New York: John Willey & Sons, 2007)
- [28]. R. J. Crawford, *Plastics Engineering, Third Edition* (Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998)
- [29]. A. Heinzl, et al., *Injection molded low cost bipolar plates for PEM fuel cells*. <http://www.zbt-duisburg.de/downloads/Grove2003-ZBT-Bipolar.pdf>
- [30]. Diktat Kuliah Material Polimer. Dra. Sari Katili, M.S. dan Ir. Soemadi Agustinus. Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2008.
- [31]. D. Tripathi, *Practical Guide to Polypropylene* (Shawbury: Rapra Technology Ltd, 2002).
- [32]. Joel Fried R, *Polymer Science and Technology* (Prentice-Hall Inc., 1995)
- [33]. Diktat Kuliah Teknologi Polimer. Dr. Ir. A. Herman Yuwono, M. Phil. Eng dan Ir. Sumadi Agustinus, Metalurgi dan Material FTUI.
- [34]. <http://physics.nist.gov/MajResFac/NIF/pemFuelCells.html>

- [35]. <http://www.sentrategipolimer.com>
- [36]. J. Brandrup et al, *Polymer Handbook* 4eds, (New York Park: Wiley, 1998)
- [37]. Kirk Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4th edition Vol 6 (New York: John Wiley 1995)
- [38]. D. Hull dan T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials* 2nd Edition (Cambridge: Cambridge University Press, 1996)
- [39]. H. Zweifel (Editor), *Plastics Additives Handbook* 5th Edition (Munich: Hanser Publishers, 2001)
- [40]. <http://www.specialchem4polymers.com/tc/Antioxidants/>
- [41]. Diktat Kuliah Material Aditif. Mochamad Chalid, S.Si., M.Sc.Eng., Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2010.
- [42]. <http://www.asbury.com/Synthetic-Graphite.html>
- [43]. Carbon Nanotube. Wikipedia Free Encyclopedia.
http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube
- [44]. Anggraeni Kusuma. *Perangkat Memori Berbasis Carbon Nanotube* (CNT).
- [45]. <http://www.nanocyl.com/en/CNT-Expertise-Centre/Carbon-Nanotubes>
- [46]. A Carbon Nanotube Page, Peter Harris's NEW nanotube book.
- [47]. Spesifikasi CNT. <http://www.timesnano.com/product/single-wall-carbon-nano-tube/specification.html>. diakses pada 24/08/10.

- [48]. <http://canfuo.com/nanocopper50.html>
- [49]. http://www.df.uba.ar/users/sgil/labo5_uba/guias/four_point_resi_ajp2k3.pdf
- [50]. Buku Petunjuk Penggunaan Instrumen Four Point Probe. Laboratorium Fuel Cells. Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). Serpong. 2008.
- [51]. Standar Operasional dan Prosedur (SOP) Penimbangan Zat. Laboratorium Metalurgi Kimia. Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI. Depok. 2007.
- [52]. Standar Operasional dan Prosedur (SOP) Penggunaan Rheomix Haake 3000 dan Rheocord 90. Laboratorium Pemrosesan Polimer. PT. Pertamina Laboratory and Technical Services. Pulogadung. 2008.
- [53]. Hatta Adam. *Analisis Sifat Mekanik dan Konduktivitas Komposit Polipropilena/Etilena-Propilena-Diena Terpolimer/Karbon (PP/EPDM/C) Untuk Aplikasi Pelat Bipolar Pada Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cell*. Skripsi. Fakultas Teknik, Departemen Metalurgi Dan Material. Universitas Indonesia. 2008.
- [54]. Younghwan Jang, Sangshik Kim, Yunchul Jung dan Sangkwan Lee. *Tensile behavior of carbon nano-fiber-reinforced Cu composite using the liquid infiltration process*. Journal of chemistry and materials science, metallurgical and materials transactions A. 2005. <http://www.springerlink.com/content/a073n7651n085036/>

Lampiran 1
Formulasi Penelitian

Jenis Bahan	Satuan	F1	F2	F3
Polipropilena (PP)	<i>%wt</i>	13.25	12.75	11.75
	gram	66.25	63.75	58.75
Serat Karbon Fortafile 243	<i>%wt</i>	50	50	50
	gram	250	250	250
Grafit 4012	<i>%wt</i>	30	30	30
	gram	150	150	150
PP-g-MA	<i>%wt</i>	5	5	5
	gram	25	25	25
Anti Oksidan CN-CAT A215	<i>%wt</i>	1	1	1
	gram	5	5	5
CNT (<i>Carbon Nano Tube</i>)	<i>%wt</i>	0.25	0.25	0.25
	gram	1.25	1.25	1.25
Nano Tembaga (Cu Nano)	<i>%wt</i>	0.5	1	2
	gram	2.5	5	10
Total	<i>%wt</i>	100	100	100
	gram	500	500	500

Lampiran 2
Hasil Pengujian XRF Cu Nano



No. Lap.: R110451

Hal: 1/1

Laporan Pengujian

No.Lap. : R110451 No. Order : J1100326 Tanggal: 25-08-2010

Pelanggan : **Kementerian ESDM**
P3 Teknologi Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan
Jl. Ciledug Raya kav. 109 Cipulir, Kebayoran, Jakarta

Kontak person : Ibu Dr. Ir. Verina J. W, MT

Nama Sampel : Serbuk Nano Tembaga

Penerimaan sampel : 23 Agustus 2010

Tanggal Pengujian : 24 Agustus 2010

Tipe Pengujian : Analisa Unsur Menggunakan Metoda XRF

KONDISI PENGUJIAN

Sampel serbuk dianalisa langsung menggunakan alat XRF dengan kondisi sebagai berikut :

Luasan Analisa : 50 μ m (diameter)
Voltage : 0 - 20 kV
Waktu scanning : 300 sec

HASIL PENGUJIAN

Hasil analisa kandungan unsur dengan XRF untuk sampel Serbuk Nano Tembaga dapat dilihat tabel di bawah ini.

No.	Nama Unsur	Kandungan Unsur (%)
1	Tembaga (Cu)	99,9479
2	Krom (Cr)	0,0521

Manajer Pengujian,

 **STP**
SENTRA TEKNOLOGI POLIMER

Dody Andi Winarto

ORIGINAL

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sampel yang diuji di STP; segala pengaduan sehubungan dengan pelayanan dapat disampaikan ke Manajer Mutu STP; dilarang menggandakan laporan ini tanpa persetujuan tertulis dari STP.

Kawasan PUSPIPTEK - Gedung 460 , Serpong-Tangerang 15314 - Indonesia
Tel : 62-21-758.720.32, 756.0562 ext. 3418. Fax : 62-21-756.0057; e-mail : stpoffice@sentrapolimer.com

F-015;Ed:A;Rev:1

Universitas Indonesia

Lampiran 3

Hasil Pengujian Tarik dan Tekuk



HASIL PENGUJIAN

Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 1 dan 2 di bawah ini:

Tabel 1. Hasil pengujian sampel Komposit PP/C – CNT

No.	Jenis Pengujian	Satuan	Komposit PP/C – CNT		
			F1	F2	F3
1.	<i>Tensile Properties</i>				
	a. <i>Tensile Strength</i>	MPa	14,54 ± 3,54	14,21 ± 2,26	15,14 ± 3,72
	b. <i>Elongation at Break</i>	%	0,34 ± 0,06	0,32 ± 0,03	0,35 ± 0,05
2.	<i>Flexural Properties</i>				
	a. <i>Flexural Strength</i>	MPa	35,06 ± 2,31	26,66 ± 2,96	30,40 ± 2,39
	b. <i>Modulus of Elasticity</i>	GPa	9,76 ± 1,55	8,26 ± 1,41	8,27 ± 1,07

Tabel 2. Hasil pengujian sampel Komposit PP/C – CNT – Cu Nano

No.	Jenis Pengujian	Satuan	Komposit PP/C – CNT – Cu Nano		
			F4	F5	F6
1.	<i>Tensile Properties</i>				
	a. <i>Tensile Strength</i>	MPa	20,30 ± 2,34	11,18 ± 3,58	10,71 ± 4,74
	b. <i>Elongation at Break</i>	%	0,41 ± 0,07	0,25 ± 0,07	0,24 ± 0,05
2.	<i>Flexural Properties</i>				
	a. <i>Flexural Strength</i>	MPa	33,13 ± 1,49	29,41 ± 1,80	20,64 ± 4,22
	b. <i>Modulus of Elasticity</i>	GPa	10,58 ± 0,23	8,79 ± 0,69	6,30 ± 0,85

Manajer Pengujian

 **STP**
SENTRA TEKNOLOGI POLIMER
Dody Andri Winanto

ORIGINAL

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sampel yang diuji di STP; segala pengaduan sehubungan dengan pelayanan dapat disampaikan ke Manajer Mutu STP; dilarang menggandakan laporan ini tanpa persetujuan tertulis dari STP. Kawasan PUSPIITEK – Gedung 460, Serpong-Tangerang 15314 – Indonesia
Tel : 62-21-758.720.32, 756.0562 ext. 3418. Fax : 62-21-756.0057; e-mail : stpoffice@sentrapolimer.com
F-015;Ed:A;Rev:1

Lampiran 4

Hasil Perhitungan Nilai Densitas

Perhitungan Densitas Air

Volume air (V_{air}) = 1000 ml = 1000 cm³

Massa beaker glass (M_{glass}) = 330.45 gram

Massa air + beaker (M_{tot}) = 1316.03 gram

Massa air (M_{air}) = 985.58 gram

Densitas air (ρ_{air}) = 0.98558 gram/cm³

Massa sampel di udara = M_u

Massa sampel di air = M_a

Densitas sampel (ρ_{sampel}) dapat dihitung dengan persamaan:

$$\rho_{\text{sampel}} = \frac{M_u}{M_a} \rho_{\text{air}}$$

Formula	Parameter	M_u	M_a	ρ_{sampel}	Rataan
	Satuan	gram	gram	gram/cm ³	
F1	SF1A	9.50	6.73	1.39123	1.43182
	SF1B	9.39	6.32	1.46433	
	SF1C	9.54	6.53	1.43988	
F2	SF2A	9.37	6.57	1.40561	1.42600
	SF2B	9.07	6.22	1.43717	
	SF2C	9.48	6.51	1.43522	
F3	SF3A	8.91	6.52	1.34686	1.38435
	SF3B	8.84	6.32	1.37856	
	SF3C	8.72	6.02	1.42762	

Lampiran 5
Hasil Perhitungan Nilai Porositas

Nilai ρ_{teoritis}

Formulasi	ρ_{teoritis}	Satuan
F1	1.4592	gram/cm³
F2	1.4409	gram/cm³
F3	1.4055	gram/cm³

Nilai $\rho_{\text{percobaan}}$

Formulasi	$\rho_{\text{percobaan}}$	Satuan
F1	1.43182	gram/cm³
F2	1.42600	gram/cm³
F3	1.38455	gram/cm³

% Porositas dapat dihitung dengan persamaan:

$$\% \text{ Porositas} = \frac{\rho_{\text{teoritis}} - \rho_{\text{percobaan}}}{\rho_{\text{teoritis}}} \times 100\%$$

Formulasi	Porositas	Satuan
F1	1.88	%
F2	1.03	%
F3	1.49	%

Lampiran 6
Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar
dengan Metode *Four Point Probe*



Unit Pengujian Konduktivitas Listrik Material
 Laboratorium Pengujian Fuel Cell
 Pusat Penelitian Fisika - Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
 Kawasan PUSPIPTK Serpong

LIPI

Laporan Hasil Pengujian Material

Metode Pengujian	: Four Point Probe	Operator	: Subhan
Jenis Sampel	: Komposit Pelat PP/C-CNT-Cu Nano (F1,F2,F3)	Pemohon	: Dr.Ir.Verina J.W.,M.T.
Jumlah Sampel	: 6 Unit	Instansi	: P3TKEBT - ESDM
		Preparasi Sampel	: -
		Keterangan	: Penelitian

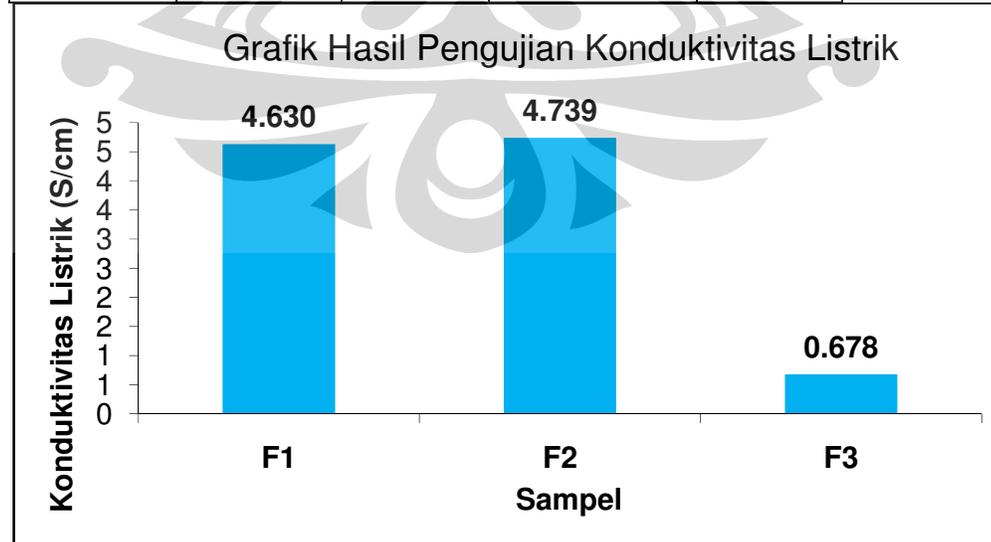
Pengukuran Dimensi Spesimen:

Parameter	Ketebalan	
	Nilai	Satuan
Sampel		
F1	2.20	mm
F2	2.20	mm
F3	2.00	mm

Pengukuran Nilai Resistansi dan Konduktivitas Spesimen:

Percobaan	Resistansi	Satuan	Konduktivitas	Satuan
F1	0.2160	Ω .cm	4.630	S/cm
F2	0.2110	Ω .cm	4.739	S/cm
F3	1.4760	Ω .cm	0.678	S/cm

Grafik Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik



Universitas Indonesia