



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

ABI GIBRAN  
0706163691

FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
DESEMBER 2010



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

ABI GIBRAN  
0706163691

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 : Abi Gibran

NPM : 0706163691

Tanda Tangan :

Tanggal : 16 Desember 2010

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Abi Gibran  
NPM : 0706163691  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi :

**Studi Pengaruh Penambahan Fraksi Volume Penguat *Carbon Nano Tubes*  
(CNT) Terhadap Sifat Mekanis dan Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar  
Berdasarkan Nano Komposit PP/C-CNT**

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 Syahril,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. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan dukungan material dan moral;
4. 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; dan
5. Sutoni, 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 : Abi Gibran  
NPM : 0706163691  
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 Penambahan Fraksi Volume Penguat *Carbon Nano Tubes* (CNT) Terhadap Sifat Mekanis dan Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar Berbasis Nano Komposit PP/C-CNT**

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,

(Abi Gibran)

## ABSTRAK

Nama : Abi Gibran  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul :

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

Dalam teknologi *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC), pelat bipolar merupakan komponen penting karena berfungsi untuk mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda menuju katoda. Penelitian ini difokuskan dalam pemilihan material komposit berbasis matriks polimer dan penguat karbon untuk memfabrikasi pelat bipolar. Bahasan utama dalam penelitian ini adalah analisis pengaruh penambahan fraksi volume penguat *carbon nano tubes* (CNT) sebesar 0,1 wt%; 0,25 wt%; dan 0,5 wt% terhadap sifat mekanis dan konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT. Karakterisasi dalam penelitian ini meliputi pengujian tarik, pengujian tekuk, pengujian densitas, pengujian porositas, pengujian konduktivitas listrik dan pengamatan morfologi patahan tekuk pelat bipolar dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan fraksi volume penguat CNT akan meningkatkan nilai konduktivitas listrik, kekuatan tarik, modulus elastisitas, elongasi, kekuatan tekuk serta mereduksi densitas dan porositas pelat bipolar.

Kata kunci:

PEMFC, Pelat Bipolar, CNT, Nano Komposit, Konduktivitas Listrik

## ABSTRACT

Name : Abi Gibran

Study Program : Metallurgy and Material Science Engineering

Title :

**Study of Influences of Addition Volume Fraction of Carbon Nano Tubes (CNT) Reinforcement To The Mechanical and Electrical Conductivity Properties of Bipolar Plate Based on Nano Composite PP/C-CNT**

In *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) technology, bipolar plate is the crucial component that collects and transfers electron from the anode to the cathode. This research focuses on material selection of composite based on polymeric matrix and carbon reinforcements to fabricate the bipolar plate. The main discussion in this research is the analysis of addition of volume fraction carbon nano tubes (CNT) reinforcement equal to 0,1 wt%; 0,25 wt%; and 0,5 wt% to the mechanical and electrical conductivity properties of bipolar plate based on nano composite PP/C-CNT. The material characterizations in this research including tensile testing, flexural testing, density testing, porosity testing, electrical conductivity testing and observation of flexural fracture of bipolar plate using Scanning Electron Microscope (SEM). The results of this research show that addition of volume fraction carbon nano tubes (CNT) reinforcement increases the electrical conductivity, ultimate tensile testing, modulus of elastocity, elongation at break, flexural strength and also reduce the density and porosity of bipolar plate.

Key words:

PEMFC, Bipolar Plate, CNT, Nano Composite, 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.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
DAFTAR SINGKATAN.....	xvii
DAFTAR SIMBOL.....	xviii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Permasalahan.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	5
1.4. Hipotesis Penelitian.....	5
1.5. Ruang Lingkup Penelitian.....	6
1.6. Sistematika Penulisan.....	8
<b>BAB 2 LANDASAN TEORI.....</b>	<b>9</b>
2.1. Sel Bahan Bakar ( <i>Fuel Cell</i> ).....	9
2.2. <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i> (PEMFC).....	12
2.2.1. Keunggulan PEMFC.....	13
2.2.2. Keterbatasan PEMFC.....	13
2.2.3. Struktur PEMFC.....	14
2.3. Pelat Bipolar.....	15
2.4. Material Komposit.....	18
2.4.1. Sistem Material Komposit.....	18
2.4.2. Matriks Pada Komposit.....	19
2.4.3. Penguat ( <i>Reinforcement</i> ) Pada Komposit.....	20
2.4.4. Klasifikasi Material Komposit.....	21
2.5. Nano Komposit.....	22
2.6. Komposit Polimer Termoplastik.....	24
2.7. Polipropilena (PP).....	25
2.8. Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride (PP-g-MA).....	28
2.9. Serat Karbon.....	30
2.10. Grafit.....	31
2.11. Anti-oksidan.....	32
2.12. <i>Carbon Nano Tube</i> (CNT).....	34

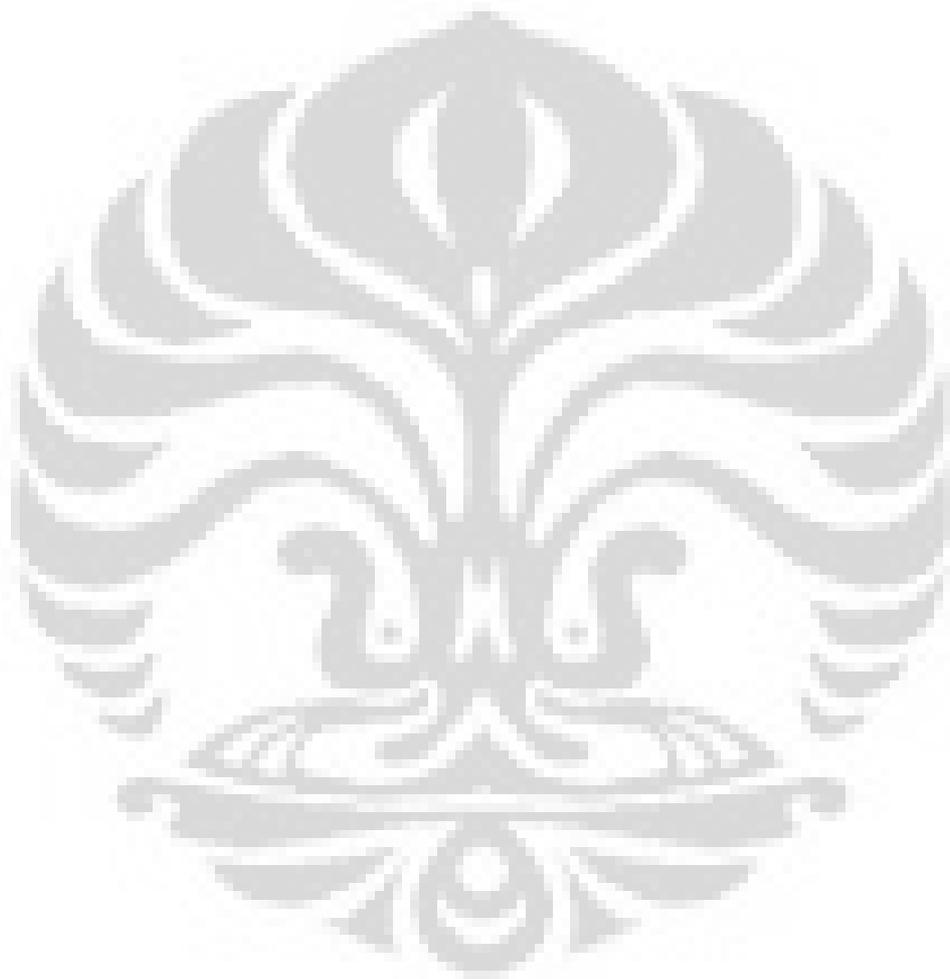
<b>BAB 3</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>36</b>
3.1.	Diagram Alir Penelitian.....	36
3.2.	Variabel Penelitian.....	39
3.2.1.	Variabel Bebas.....	39
3.2.2.	Variabel Terikat.....	40
3.2.3.	Variabel Terkontrol.....	41
3.3.	Formulasi Penelitian.....	42
3.4.	Komposisi Material.....	42
3.5.	Material.....	43
3.5.1.	Polipropilena (PP).....	43
3.5.2.	<i>Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride</i> (PP-g-MA).....	46
3.5.3.	Serat Karbon Fortafil 243.....	47
3.5.4.	Grafit 4012.....	48
3.5.5.	Anti-Oksidan CN-CAT A215.....	49
3.5.6.	CNT ( <i>Carbon Nano Tube</i> ).....	50
3.6.	Peralatan.....	51
3.6.1.	Peralatan Preparasi Sampel Pengujian.....	51
3.6.2.	Peralatan Karakterisasi Sampel.....	55
3.7.	Prosedur Penelitian.....	56
3.7.1.	Kompaksi Spesimen Pengujian Awal Konduktivitas Listrik Bahan.....	56
3.7.2.	Pengujian Konduktivitas Listrik Bahan dengan LCR Meter.....	58
3.7.3.	Pengujian Konduktivitas Listrik Bahan dengan <i>Four Point Probe</i> .....	60
3.7.4.	Penimbangan Bahan.....	62
3.7.5.	Pencampuran Kering ( <i>Dry Mixing</i> ) Bahan.....	63
3.7.6.	Pencampuran Panas ( <i>Hot Blending</i> ) atau <i>Compounding</i> Bahan.....	64
3.7.7.	Pencetakan Panas ( <i>Hot Pressing</i> ) dengan <i>Compression Moulding</i> .....	69
3.7.8.	Preparasi Spesimen Pengujian Tarik.....	69
3.7.9.	Preparasi Spesimen Pengujian Tekuk.....	73
3.7.10.	<i>Conditioning</i> Spesimen Pengujian Tarik dan..... Pengujian Tekuk.....	73 74
3.7.11.	Pengujian Tarik ( <i>Tensile Testing</i> ).....	74
3.7.12.	Pengujian Tekuk ( <i>Flexural Testing</i> ).....	76
3.7.13.	Pengujian Densitas dan Porositas.....	78
3.7.14.	Pengujian Konduktivitas Listrik Sampel dengan <i>Four Point Probe</i> .....	80
3.7.15.	Karakterisasi Morfologi Patahan Tekuk dengan SEM dan EDS.....	81
<b>BAB 4</b>	<b>HASIL PENELITIAN.....</b>	<b>84</b>
4.1.	Hasil Pengujian Awal Nilai Konduktivitas Listrik Bahan.....	84
4.2.	Hasil Proses <i>Hot Blending/Compounding</i> Bahan.....	86
4.3.	Hasil Proses <i>Crushing Master Batch</i> .....	87

4.4.	Hasil Proses Pencetakan Panas ( <i>Hot Pressing</i> ) Pelat Bipolar.....	88
4.5.	Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Tarik.....	89
4.6.	Hasil Pengujian Tarik ( <i>Tensile Testing</i> ) Pelat Bipolar.....	89
4.7.	Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Tekuk.....	92
4.8.	Hasil Pengujian Tekuk ( <i>Flexural Testing</i> ) Pelat Bipolar..	92
4.9.	Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Densitas dan Porositas.....	95
4.10.	Hasil Pengujian Densitas Pelat Bipolar.....	96
4.11.	Hasil Pengujian Porositas Pelat Bipolar.....	97
4.12.	Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Konduktivitas Listrik.....	98
4.13.	Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar.....	99
4.14.	Hasil Pengamatan Morfologi Patahan Pelat Bipolar dengan SEM.....	100
4.15.	Hasil Pengujian EDS Pelat Bipolar.....	103
<b>BAB 5</b>	<b>PEMBAHASAN.....</b>	<b>106</b>
5.1.	Analisis Pengaruh Penambahan CNT Terhadap Hasil Pengujian Tarik Pelat Bipolar.....	106
5.2.	Analisis Pengaruh Penambahan CNT Terhadap Hasil Pengujian Tekuk Pelat Bipolar.....	113
5.3.	Analisis Pengaruh Penambahan CNT Terhadap Nilai Densitas Pelat Bipolar.....	120
5.4.	Analisis Pengaruh Penambahan CNT Terhadap Nilai Porositas Pelat Bipolar.....	123
5.5.	Analisis Pengaruh Penambahan CNT Terhadap Nilai Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar.....	125
5.6.	Analisis Karakteristik Morfologi Patahan Tekuk Pelat Bipolar dengan SEM.....	130
<b>BAB 6</b>	<b>KESIMPULAN.....</b>	<b>138</b>
6.1.	Kesimpulan.....	138
6.2.	Saran.....	139
	<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>142</b>

## DAFTAR TABEL

		Halaman
<b>Tabel 2.1.</b>	Perbedaan Jenis-Jenis <i>Fuel Cell</i> .....	11
<b>Tabel 2.2.</b>	Komponen Utama Penyusun PEMFC.....	15
<b>Tabel 2.3.</b>	Spesifikasi Material untuk Pelat Bipolar Ideal.....	17
<b>Tabel 2.4.</b>	Material untuk Pelat Bipolar PEMFC.....	17
<b>Tabel 2.5.</b>	Karakteristik <i>Maleic Anhydride</i> .....	28
<b>Tabel 2.6.</b>	Sifat-Sifat Grafit.....	32
<b>Tabel 2.7.</b>	Karakteristik <i>Carbon Nanotubes</i> .....	35
<b>Tabel 3.1.</b>	Pengkodean formulasi penelitian.....	42
<b>Tabel 3.2.</b>	Komposisi material pada setiap formulasi penelitian.....	43
<b>Tabel 3.3.</b>	Sifat <i>Cosmoplene Polypropylene Block Copolymer</i> Grade AH561.....	44
<b>Tabel 3.4.</b>	Spesifikasi <i>Cosmoplene Polypropylene Block Copolymer</i> Grade AH561.....	45
<b>Tabel 3.5.</b>	Jumlah Massa Polipropilena (PP) Pada Setiap Formulasi Penelitian.....	46
<b>Tabel 3.6.</b>	Spesifikasi <i>Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride</i> (PP-g-MA).....	46
<b>Tabel 3.7.</b>	Jumlah Massa PP-g-MA Pada Setiap Formulasi Penelitian...	47
<b>Tabel 3.8.</b>	Spesifikasi dari <i>Chopped Carbon Fiber Fortafil 243</i> .....	47
<b>Tabel 3.9.</b>	Jumlah Massa Serat Karbon Pada Setiap Formula Penelitian	48
<b>Tabel 3.10.</b>	Jumlah Massa Grafit 4012 Pada Setiap Formula Penelitian..	49
<b>Tabel 3.11.</b>	Spesifikasi Anti-Oksidan CN-CAT B215.....	49
<b>Tabel 3.12.</b>	Jumlah Massa Anti-Oksidan Pada Setiap Formulasi Penelitian.....	50
<b>Tabel 3.13.</b>	Spesifikasi <i>Carbon Nano Tube</i> (CNT).....	50
<b>Tabel 3.14.</b>	Jumlah Massa CNT Pada Setiap Formulasi Penelitian.....	51
<b>Tabel 3.15.</b>	Peralatan Preparasi Sampel Pengujian.....	51
<b>Tabel 3.16.</b>	Peralatan Karakterisasi Sampel.....	55
<b>Tabel 3.17.</b>	Parameter proses pencetakan panas ( <i>hot pressing</i> ).....	70
<b>Tabel 3.18.</b>	Parameter proses pengondisian spesimen uji tarik dan uji tekuk.....	74
<b>Tabel 3.19.</b>	Parameter Proses Pengujian Tarik.....	75
<b>Tabel 4.1.</b>	Hasil Uji Konduktivitas Listrik Bahan dengan LCR Meter...	84
<b>Tabel 4.2.</b>	Hasil Uji Konduktivitas Listrik Grafit dengan <i>Four Point Probe</i> .....	85
<b>Tabel 4.3.</b>	Nilai <i>Ultimate Tensile Strength</i> (UTS) Pelat Bipolar.....	90
<b>Tabel 4.4.</b>	Nilai <i>Elongation at Break</i> Pelat Bipolar.....	91
<b>Tabel 4.5.</b>	Nilai Kekuatan Tekuk ( <i>Flexural Strength</i> ) Pelat Bipolar.....	93
<b>Tabel 4.6.</b>	Nilai Modulus Elastisitas ( <i>Modulus of Elasticity</i> ) Pelat Bipolar.....	94
<b>Tabel 4.7.</b>	Hasil Pengujian Densitas Pelat Bipolar.....	96
<b>Tabel 4.8.</b>	Nilai Densitas Teoritis Pelat Bipolar.....	97
<b>Tabel 4.9.</b>	Hasil Pengujian Porositas Pelat Bipolar.....	98

<b>Tabel 4.10.</b>	Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar.....	99
<b>Tabel 5.1.</b>	Data Literatur Nilai Densitas Bahan.....	121
<b>Tabel 5.2.</b>	Prediksi Nilai Densitas Pelat Bipolar Berdasarkan Literatur..	122
<b>Tabel 5.3.</b>	Kompilasi Hasil Pengujian dan Karakteristik Keseluruhan Formula.....	137



## DAFTAR GAMBAR

		Halaman
<b>Gambar 2.1.</b>	Skema <i>Input</i> dan <i>Output Fuel Cell</i> .....	10
<b>Gambar 2.2.</b>	Rentang <i>Output</i> Daya Listrik <i>Fuel Cell</i> .....	12
<b>Gambar 2.3.</b>	Susunan PEMFC.....	14
<b>Gambar 2.4.</b>	Pelat Bipolar.....	16
<b>Gambar 2.5.</b>	Kekuatan Berbagai <i>Fiber Reinforcements</i> .....	20
<b>Gambar 2.6.</b>	Rumus Struktural Polipropilena.....	26
<b>Gambar 2.7.</b>	Jenis Isomerisme Stereo pada Polipropilena.....	27
<b>Gambar 2.8.</b>	Isomerisme Geometri pada Polipropilena.....	28
<b>Gambar 2.9.</b>	Proses Pembuatan Serat Karbon dari PAN dan <i>Pitch</i> .....	31
<b>Gambar 3.1.</b>	Diagram alir preparasi spesimen pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan.....	36
<b>Gambar 3.2.</b>	Diagram alir preparasi dan fabrikasi sampel pelat bipolar.....	37
<b>Gambar 3.3.</b>	Diagram alir karakterisasi dan pengujian sampel pelat Bipolar.....	38
<b>Gambar 3.4.</b>	Prinsip Pengujian Konduktivitas Listrik Bahan.....	59
<b>Gambar 3.5.</b>	Diagram Alat Uji Konduktivitas Dalam Bidang ( <i>in-Plane</i> )Sampel Berdasarkan Standarisasi ASTM D-991...	59
<b>Gambar 3.6.</b>	Timbangan digital.....	63
<b>Gambar 3.7.</b>	Grafik Temperatur vs Waktu Proses Pencetakan Panas...	71
<b>Gambar 3.8.</b>	Grafik Tekanan vs Waktu Proses Pencetakan Panas.....	71
<b>Gambar 3.9.</b>	Skema Metode <i>Three-Point Bending Test</i> .....	77
<b>Gambar 3.10.</b>	<i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	82
<b>Gambar 4.1.</b>	Grafik Hasil Uji Konduktivitas Listrik Grafit.....	85
<b>Gambar 4.2.</b>	<i>Master Batch</i> Hasil Proses Pencampuran Panas ( <i>Hot Blending</i> ).....	86
<b>Gambar 4.3.</b>	Pellet atau Granula Hasil Proses <i>Crushing</i> .....	87
<b>Gambar 4.4.</b>	Pelat Hasil Proses <i>Hot Pressing</i> .....	88
<b>Gambar 4.5.</b>	Spesimen Pengujian Tarik Pelat Bipolar.....	89
<b>Gambar 4.6.</b>	Grafik Perbandingan Nilai <i>Ultimate Tensile Strength</i> Pelat Bipolar.....	90
<b>Gambar 4.7.</b>	Grafik Perbandingan Nilai <i>Elongation at Break</i> Pelat Bipolar.....	91
<b>Gambar 4.8.</b>	Patahan Pelat Bipolar Hasil Pengujian Tarik.....	92
<b>Gambar 4.9.</b>	Spesimen Pengujian Tekuk Pelat Bipolar.....	92
<b>Gambar 4.10.</b>	Grafik Perbandingan Nilai Kekuatan Tekuk Pelat Bipolar.....	94
<b>Gambar 4.11.</b>	Grafik Perbandingan Nilai Modulus Elastisitas Pelat Bipolar.....	95
<b>Gambar 4.12.</b>	Patahan Pelat Bipolar Hasil Pengujian Tekuk.....	95
<b>Gambar 4.13.</b>	Spesimen Pengujian Densitas dan Porositas Pelat Bipolar.....	96
<b>Gambar 4.14.</b>	Grafik Perbandingan Nilai Densitas Pelat Bipolar.....	97

<b>Gambar 4.15.</b>	Grafik Perbandingan Nilai Porositas Pelat Bipolar.....	98
<b>Gambar 4.16.</b>	Spesimen Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar	99
<b>Gambar 4.17.</b>	Grafik Perbandingan Nilai Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar.....	100
<b>Gambar 4.18.</b>	Morfologi Patahan Tekuk F1 Titik 1 Perbesaran 500x....	101
<b>Gambar 4.19.</b>	Morfologi Patahan Tekuk F1 Titik 2 Perbesaran 250x....	101
<b>Gambar 4.20.</b>	Morfologi Patahan Tekuk F1 Titik 3 Perbesaran 500x....	101
<b>Gambar 4.21.</b>	Pengamatan CNT Pada F1 Perbesaran 50000x.....	102
<b>Gambar 4.22.</b>	Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 1 Perbesaran 500x....	102
<b>Gambar 4.23.</b>	Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 2 Perbesaran 500x....	102
<b>Gambar 4.24.</b>	Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 3 Perbesaran 500x....	103
<b>Gambar 4.25.</b>	Pengamatan CNT Pada F2 Perbesaran 50000x.....	103
<b>Gambar 4.26.</b>	Grafik EDS F1 Titik 1.....	104
<b>Gambar 4.27.</b>	Grafik EDS F1 Titik 2.....	104
<b>Gambar 4.28.</b>	Grafik EDS F1 Titik 3.....	104
<b>Gambar 4.29.</b>	Grafik EDS F2 Titik 1.....	105
<b>Gambar 4.30.</b>	Grafik EDS F2 Titik 2.....	105
<b>Gambar 4.31.</b>	Grafik EDS F2 Titik 3.....	105
<b>Gambar 5.1.</b>	Grafik Perbandingan Nilai <i>Ultimate Tensile Strength</i> Pelat Bipolar.....	107
<b>Gambar 5.2.</b>	SEM <i>Micrograph</i> F2 Titik 1 Perbesaran 500x.....	108
<b>Gambar 5.3.</b>	Literatur Grafik Kekuatan Tarik Komposit PP-Karbon...	109
<b>Gambar 5.4.</b>	Grafik Perbandingan Nilai <i>Elongation at Break</i> Pelat Bipolar.....	110
<b>Gambar 5.5.</b>	SEM <i>Micrograph</i> yang Menunjukkan <i>Micro-Voids</i> Pelat Bipolar.....	111
<b>Gambar 5.6.</b>	Gambaran Skematik dari Fenomena <i>Craze</i> .....	112
<b>Gambar 5.7.</b>	Patahan Pelat Bipolar Hasil Pengujian Tarik.....	113
<b>Gambar 5.8.</b>	Grafik Perbandingan Nilai Kekuatan Tekuk Pelat Bipolar.....	114
<b>Gambar 5.9.</b>	SEM <i>Micrograph</i> Patahan Tekuk F1 Titik 3 Perbesaran 500x.....	115
<b>Gambar 5.10.</b>	SEM <i>Micrograph</i> Patahan Tekuk F2 Titik 1 dan Titik 3.....	116
<b>Gambar 5.11.</b>	Data Literatur Pengaruh CNT Terhadap Kuat Tekuk.....	118
<b>Gambar 5.12.</b>	Grafik Perbandingan Modulus Elastisitas Tekuk Pelat Bipolar.....	119
<b>Gambar 5.13.</b>	Literatur Grafik Modulus Tekuk Komposit PP-Karbon..	119
<b>Gambar 5.14.</b>	Grafik Hasil Pengujian Nilai Densitas Pelat Bipolar.....	121
<b>Gambar 5.15.</b>	Grafik Perbandingan Nilai Densitas Pelat Bipolar.....	122
<b>Gambar 5.16.</b>	Grafik Hasil Pengujian Porositas Pelat Bipolar.....	124
<b>Gambar 5.17.</b>	Grafik Perbandingan Nilai Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar.....	126
<b>Gambar 5.18.</b>	Data Literatur Efektivitas Penambahan CNT Pada Peningkatan Sifat Mekanis Pelat Bipolar Berbasis Nano Komposit PP/C-CNT.....	127

<b>Gambar 5.19.</b>	Model <i>Conductive Path</i> pada Nano Komposit PP/C-CNT (a) Dispersi CNT yang Baik pada Matriks PP dengan Kristalinitas Rendah (b) Agregasi CNT pada matriks PP dengan Kristalinitas Tinggi.....	128
<b>Gambar 5.20.</b>	SEM <i>Micrograph</i> F1 Titik 1 (Kiri) dan F2 Titik 2 (Kanan).....	129
<b>Gambar 5.21.</b>	SEM <i>Micrograph</i> F1 Pada Titik 1.....	130
<b>Gambar 5.22.</b>	SEM <i>Micrograph</i> CNT Pada F1 dengan Perbesaran 50,000x.....	131
<b>Gambar 5.23.</b>	SEM <i>Micrograph</i> F1 Pada Titik 2.....	132
<b>Gambar 5.24.</b>	SEM <i>Micrograph</i> F1 Pada Titik 3.....	133
<b>Gambar 5.25.</b>	SEM <i>Micrograph</i> F2 Pada Titik 1.....	134
<b>Gambar 5.26.</b>	SEM <i>Micrograph</i> CNT Pada F2 dengan Perbesaran 50,000x.....	135
<b>Gambar 5.27.</b>	SEM <i>Micrograph</i> F2 Pada Titik 2.....	135
<b>Gambar 5.28.</b>	SEM <i>Micrograph</i> F2 Pada Titik 3.....	136



## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>Lampiran 1</b> Foto Bahan yang Digunakan.....	149
<b>Lampiran 2</b> Formulasi Penelitian.....	150
<b>Lampiran 3</b> Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Aktual Bahan dengan <i>Four Point Probes</i> di P2F LIPI.....	151
<b>Lampiran 4</b> Hasil Pengujian Tarik dan Tekuk.....	152
<b>Lampiran 5</b> Hasil Perhitungan Nilai Densitas.....	153
<b>Lampiran 6</b> Hasil Perhitungan Nilai Porositas.....	154
<b>Lampiran 7</b> Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar dengan <i>Four Point Probes</i> di P2F LIPI.....	155



## DAFTAR SINGKATAN

C	<i>Carbon</i>
CNT	<i>Carbon Nano Tubes</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>
UTS	<i>Ultimate Tensile Strength</i>

## DAFTAR SIMBOL

<b>Simbol</b>	<b>Keterangan</b>	<b>Satuan</b>
$wt\%$	Persen Berat	%
$\sigma_c$	Tegangan Tarik Komposit	$N/m^2$
$\sigma_m$	Tegangan Tarik Matriks	$N/m^2$
$\sigma_f$	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	$N/m^2$
$\rho_c$	Densitas Komposit	$gram/cm^3$
$\rho_m$	Densitas Matriks	$gram/cm^3$
$\rho_f$	Densitas Penguat Fiber	$gram/cm^2$
$\sigma$	Konduktivitas	S/cm
$G$	Konduktansi	S
$R$	Resistivitas	$\Omega.cm$
$\rho_{sampel}$	Densitas Sampel	$gram/cm^3$
$\rho_{air}$	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

Salah satu permasalahan vital yang dihadapi oleh masyarakat global saat ini adalah ketersediaan energi. Pada dasarnya energi merupakan elemen dasar yang memiliki pengaruh cukup besar terhadap kemajuan peradaban manusia dewasa ini<sup>[1]</sup>. Sampai saat ini masyarakat global masih bergantung pada energi fosil atau bahan bakar minyak sebagai sumber energi utama yang digunakan dalam berbagai bidang vital seperti bidang transportasi dan industri.

Pada dasarnya energi fosil itu sendiri merupakan sumber daya energi yang tidak dapat diperbarui dan memiliki ketersediaan yang cukup terbatas. Energi fosil berasal zat-zat renik yang terdekomposisi pada lapisan batuan bumi selama berjuta-juta tahun lalu sehingga energi fosil ini tidak dapat diperbarui<sup>[2]</sup>. Sementara di sisi lain kebutuhan manusia akan energi seperti pada bidang transportasi dan industri cukup tinggi dan terus mengalami peningkatan setiap tahunnya namun energi fosil sebagai alat pemenuhan kebutuhan tersebut memiliki jumlah yang sangat terbatas dan persediaannya setiap tahun semakin menurun. Hal ini tentu saja akan menimbulkan krisis energi pada masyarakat global. Kondisi ini dapat terlihat dari fluktuasi harga bahan bakar minyak di pasar global sebagai akibat dari keterbatasan kuantitas energi ini sehingga menimbulkan permasalahan energi yang cukup serius baik di negara maju maupun negara berkembang.

Melihat permasalahan tersebut tentu saja masyarakat global tidak tinggal diam. Dunia terus mencari dan mengembangkan sumber daya energi alternatif dan terbarukan sebagai kandidat untuk mensubstitusi energi fosil tersebut. Beberapa sumber daya energi alternatif yang ditawarkan masyarakat global sebagai solusi untuk permasalahan tersebut di antaranya adalah energi sel surya (*solar cell*), energi panas bumi (*geothermal*), energi angin, energi nuklir dan energi hidrogen atau yang lebih dikenal sebagai sel bahan bakar (*fuel cell*)<sup>[3]</sup>.

Masyarakat global juga telah menetapkan beberapa kriteria yang harus dipenuhi oleh energi alternatif tersebut, yaitu energi alternatif tersebut harus dapat diperbarui, ketersediaan yang memadai, ramah lingkungan, efisiensi tinggi serta

dapat diperoleh dengan harga ekonomis<sup>[4]</sup>. Salah satu kandidat energi alternatif yang dapat memenuhi kriteria tersebut di atas adalah sel bahan bakar (*fuel cell*).

Sel bahan bakar (*fuel cell*) adalah suatu alat konversi energi dari energi hidrogen menjadi energi listrik melalui suatu reaksi elektrokimia<sup>[5]</sup>. Bahan baku utama dari sel bahan bakar (*fuel cell*) adalah gas hidrogen yang dapat berasal dari sinar matahari, sampah organik (*biomass*) ataupun dari angin<sup>[6]</sup>. Sel bahan bakar (*fuel cell*) merupakan alat konversi energi yang dapat diisi ulang (*rechargeable*) dan juga dapat dibawa kemana-mana (*portable*)<sup>[5]</sup>. Semua hal tersebut di atas membuat sel bahan bakar (*fuel cell*) dapat dijadikan sebagai sumber energi yang cukup potensial untuk mengatasi permasalahan energi global dewasa ini. Sel bahan bakar (*fuel cell*) memiliki banyak jenis dan spesifikasi. Salah satu jenis alat konversi energi ini adalah *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC).

*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) adalah salah satu jenis sel bahan bakar yang cukup menjanjikan sebagai sumber energi alternatif khususnya untuk aplikasi bidang transportasi di masa depan karena memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan jenis sel bahan bakar lainnya. Keunggulan yang dimiliki oleh *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) adalah tingkat efisiensi energi yang tinggi, densitas energi yang tinggi, dapat digunakan pada temperatur pengoperasian yang rendah, suplai bahan bakar yang tepat serta dapat digunakan untuk jangka waktu pemakaian yang cukup lama<sup>[7]</sup>. Namun biaya fabrikasi yang cukup tinggi untuk memproduksi *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) masih menjadi kendala utama untuk dapat memproduksi alat konversi energi alternatif ini<sup>[7]</sup>. Oleh karena itu diperlukan suatu inovasi dan terobosan dalam mendesain suatu proses fabrikasi dan pemilihan material yang tepat melalui suatu penelitian secara komprehensif sehingga *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) ini dapat diproduksi dalam jumlah massal dengan harga cukup ekonomis.

## 1.2. Perumusan Permasalahan

Untuk dapat memproduksi *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) dengan harga cukup ekonomis maka biaya proses fabrikasi dan biaya material harus direduksi secara optimal<sup>[7]</sup>. Proses reduksi biaya produksi PEMFC

ini dapat dilakukan secara optimal terhadap biaya fabrikasi pelat bipolar<sup>[7]</sup>. Pelat bipolar itu sendiri merupakan komponen utama dalam PEMFC yang berfungsi untuk mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda menuju katoda. Sebagai komponen utama dalam PEMFC, pelat bipolar berkontribusi terhadap 80% dari volume PEMFC, 70% dari berat PEMFC serta 60% dari biaya fabrikasi PEMFC<sup>[7]</sup>. Hal ini berarti bahwa reduksi ukuran, berat dan biaya fabrikasi pelat bipolar PEMFC dapat difokuskan pada pemilihan material serta metode fabrikasi yang tepat<sup>[7]</sup>. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mereduksi biaya fabrikasi pelat bipolar PEMFC adalah pengembangan material komposit berbasis matriks termoplastik.

Pemilihan material termoplastik sebagai matriks dalam komposit pelat bipolar ini didasarkan pada sifat dari material termoplastik yang ringan sehingga dapat mereduksi berat PEMFC secara optimal<sup>[8]</sup>. Namun hambatan terbesar dalam penggunaan material termoplastik sebagai matriks dalam komposit pelat bipolar ini adalah nilai konduktivitas listrik dari material termoplastik tersebut cukup rendah dan cenderung bersifat sebagai insulator listrik<sup>[9]</sup>. Kendala tersebut dapat diatasi dengan pemilihan material penguat (*reinforcement*) yang tidak hanya dapat meningkatkan sifat konduktivitas listrik namun juga sifat mekanis dari pelat bipolar PEMFC. Selain harus memiliki sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis yang cukup tinggi, material penguat (*reinforcement*) untuk pelat bipolar PEMFC tersebut juga harus dapat dibasahi dengan baik oleh matriks polipropilena serta mampu menghasilkan suatu *interface* yang baik antara penguat tersebut dengan matriks polipropilena.

Salah satu material yang cocok dan dapat dijadikan sebagai penguat dalam fabrikasi pelat bipolar berbasis material komposit matriks polipropilena adalah serat karbon, grafit dan *carbon nanotubes* (CNT). Ketiga jenis material tersebut memiliki karakteristik sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis yang cukup tinggi sehingga cocok untuk dijadikan penguat pada komposit matriks polipropilena. Karena ukuran penguat yang digunakan dalam sistem komposit ini, yaitu *carbon nanotubes* (CNT) berada pada skala nano meter maka komposit yang akan dihasilkan antara kombinasi matriks polipropilena dengan penguat serat karbon, grafit dan partikel *carbon nanotubes* (CNT) ini tergolong sebagai nano

komposit. Selain penambahan serat karbon fortafil 243, grafit 4012 dan *carbon nanotubes* (CNT), dalam nano komposit berbasis matriks polypropilena ini juga dilakukan penambahan *polypropylene-grafted-maleated anhydrate* (PP-g-MA), dan anti oksidan CN-CAT A215 untuk meningkatkan performa dari nano komposit untuk pelat bipolar ini. Dalam penelitian ini akan dikaji secara mendalam mengenai pengaruh penambahan fraksi volume penguat *carbon nanotubes* (CNT) terhadap sifat mekanis dan konduktivitas listrik dari nano komposit PP/C-CNT untuk aplikasi pelat bipolar.

Seperti diketahui bahwa sifat dari suatu material komposit ditentukan oleh jenis dan sifat dari matriks komposit; jenis, sifat dan bentuk penguat komposit; fraksi volume matriks; fraksi volume penguat; *interface* antara matriks dan penguat serta arah orientasi penguat pada komposit<sup>[10]</sup>. Namun secara umum sifat dari suatu material komposit dapat direpresentasikan dalam hukum campuran atau *rules of mixture*<sup>[10]</sup>. Dalam hukum campuran terdapat dua parameter penting yang menentukan sifat dari material komposit. Kedua parameter tersebut adalah sifat dan fraksi volume material penyusun komposit<sup>[10]</sup>. Parameter sifat material dalam rekayasa sifat material komposit hanya dapat dilakukan dengan melakukan pemilihan material yang tepat untuk dijadikan sebagai matriks dan penguat dalam material komposit. Sementara parameter fraksi volume material penyusun komposit merupakan parameter yang dapat direkayasa sehingga dapat dihasilkan suatu material komposit yang memiliki sifat sesuai dengan yang diinginkan.

Berdasarkan landasan tersebut di atas maka penambahan penguat *carbon nanotube* (CNT) akan memiliki pengaruh yang berbeda terhadap sifat material komposit sesuai dengan jumlah fraksi volume penguat *carbon nanotube* (CNT) yang ditambahkan. Hal ini berarti bahwa penambahan penguat *carbon nanotube* (CNT) dengan fraksi volume yang berbeda akan mempengaruhi sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis komposit pelat bipolar secara berbeda pula.

Berdasarkan penjabaran tersebut di atas maka dapat disimpulkan bahwa perumusan permasalahan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar pengaruh penambahan fraksi volume penguat *carbon nanotube* (CNT) terhadap sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis dari pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT.

### 1.3. Tujuan Penelitian

Secara umum tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar pengaruh penambahan fraksi volume penguat *carbon nanotube* (CNT) terhadap sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT. Namun secara terperinci tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Mengetahui karakteristik dari pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT yang difabrikasi dari kombinasi antara polipropilena (PP), *polypropylene-grafted-maleated anhydrate* (PP-g-MA), *carbon nanotubes* (CNT), serat karbon Fortafile 243, grafit 4012 dan anti oksidan CN-CAT A215 apakah sudah mencapai target yang ditetapkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan (P3TKEBT) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- b. Mengetahui sifat-sifat fisis dan mekanis dari pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT yang difabrikasi tersebut seperti konduktivitas listrik (*electrical conductivity*), kekuatan tarik (*tensile strength*), kekuatan tekuk (*flexural strength*), kerapatan massa (*density*), komposisi kimia dan karakteristik patahan tekuk.
- c. Mengetahui seberapa besar pengaruh penambahan fraksi volume penguat *carbon nanotube* (CNT) terhadap peningkatan sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT.

### 1.4. Hipotesis Penelitian

Untuk aplikasi pelat bipolar berbasis *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) maka nilai minimum dari konduktivitas listrik yang disyaratkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan (P3TKEBT) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia yang mengacu pada standar yang berlaku di Amerika Serikat adalah sebesar 100 S/cm. Selain nilai konduktivitas dari pelat bipolar harus cukup tinggi, persyaratan lain yang harus dipenuhi oleh pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC adalah densitas dari pelat bipolar tersebut harus cukup rendah sehingga

dapat mereduksi berat dari pelat bipolar tersebut secara optimal. Untuk mencapai target tersebut maka harus dilakukan pemilihan material konstituen penyusun komposit dengan nilai konduktivitas listrik cukup tinggi serta densitas cukup rendah sehingga dapat memenuhi nilai minimum dari konduktivitas listrik yang disyaratkan, yaitu 100 S/cm.

Berdasarkan pertimbangan tersebut maka pemilihan material *carbon nanotubes* (CNT), serat karbon dan grafit dapat dijadikan material penguat (*reinforcement*) untuk pembuatan pelat bipolar berbasis komposit matriks polimer termoplastik. Berdasarkan data yang diperoleh, diketahui bahwa nilai konduktivitas listrik dari *carbon nanotubes* (CNT) adalah sebesar 100 S/cm dan densitas antara 1,30-1,40 gram/cm<sup>3</sup>. Dengan penambahan fraksi berat *carbon nanotubes* (CNT) antara 0,1% sampai dengan 0,5% dari berat keseluruhan pelat bipolar maka dapat diharapkan nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar yang dihasilkan dapat memenuhi persyaratan yang diinginkan.

Berdasarkan penjelasan tersebut di atas maka dapat disimpulkan hipotesis dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

”Penambahan fraksi volume penguat *carbon nanotube* (CNT) memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap peningkatan sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis dari pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT untuk aplikasi *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC)”

### 1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Secara garis besar ruang lingkup dari penelitian ini adalah proses desain dan pemilihan material yang tepat sehingga dapat menghasilkan suatu pelat bipolar dengan nilai konduktivitas listrik yang cukup tinggi dan densitas yang rendah untuk diaplikasikan pada PEMFC. Ruang lingkup dari penelitian ini secara terperinci adalah sebagai berikut:

- a. Material-material yang akan digunakan untuk memfabrikasi pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT dalam penelitian ini adalah kombinasi antara polipropilena (PP), *polypropylene-grafted-maleated anhydrate* (PP-g-MA), *carbon nanotubes* (CNT), serat karbon Fortafile 243, grafit 4012 dan anti oksidan CN-CAT A215.

- b. Formulasi yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas 3 formulasi, yaitu F1, F2 dan F3 yang merupakan formulasi untuk variabel bebas dari fraksi volume penguat *carbon nanotubes* (CNT) yang ditambahkan untuk memfabrikasi pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT. Formulasi F1, F2 dan F3 berturut-turut adalah variabel bebas penambahan fraksi volume penguat *carbon nanotubes* (CNT) sebesar 0,00105%; 0,00264% dan 0,00529%.
- c. Proses pencampuran material dilakukan dengan menggunakan mesin pencampuran panas (*hot blending machine*) dengan temperatur proses pencampuran 180°C dan waktu pencampuran selama 15 menit.
- d. Pelet nano komposit PP/C-CNT diperoleh dari proses *crushing* sampel hasil proses pencampuran panas (*hot blending*).
- e. Pembuatan sampel nano komposit PP/C-CNT dilakukan melalui proses penekanan panas (*hot pressing*) dengan proses pemanasan pada temperatur proses 240°C selama 14 menit. Proses penekanan panas (*hot pressing*) dilakukan pada tekanan proses sebesar 200 bar yang dilanjutkan dengan proses pendinginan sampel nano komposit PP/C-CNT pada temperatur 40°C ruang selama 12 menit.
- f. Masing-masing formula akan dicetak menjadi dua tipe pelat lingkaran. Pelat lingkaran tipe I untuk spesimen pengujian tarik dicetak dengan diameter 20 cm dan ketebalan  $\pm 2$  mm. Sedangkan pelat lingkaran tipe II untuk spesimen pengujian tekuk dicetak dengan diameter 14 cm dan ketebalan  $\pm 4$  mm.
- g. Pembuatan spesimen uji tarik (*tensile testing*) sampel nano komposit PP/C-CNT dan prosedur teknis pengujian tarik dilakukan sesuai dengan standarisasi ASTM D638 tipe IV.
- h. Pembuatan spesimen uji tekuk (*flexural testing*) sampel nano komposit PP/C-CNT dan prosedur teknis pengujian tekuk dilakukan sesuai dengan standarisasi ASTM D790.
- i. Karakterisasi sampel nano komposit PP/C-CNT meliputi pengujian konduktivitas listrik, pengujian kerapatan massa atau densitas, pengujian tarik (*tensile testing*), pengujian tekuk (*flexural testing*), analisis permukaan hasil perpatahan pengujian tekuk yang dilakukan dengan *Scanning Electron*

*Microscope* (SEM) serta analisis komposisi unsur kimia dalam sampel nano komposit PP/C-CNT yang dilakukan dengan instrumen *Energy Dispersed Spectroscopy* (EDS).

#### 1.6. Sistematika Penulisan

Skripsi ini terdiri dari enam bab, yaitu 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.

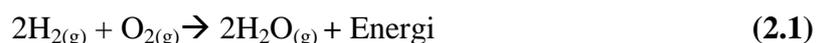
## BAB 2 LANDASAN TEORI

### 2.1. Sel Bahan Bakar (*Fuel Cell*)

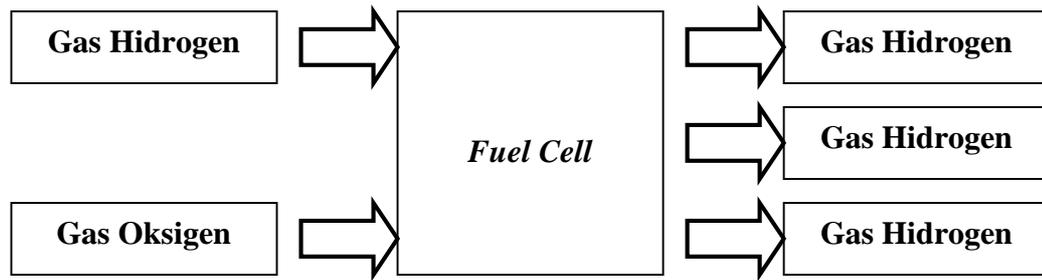
Sebagai suatu perangkat konversi energi, sel bahan bakar (*fuel cell*) merupakan salah satu perangkat energi alternatif yang cukup menjanjikan. Sel bahan bakar (*fuel cell*) adalah suatu alat konversi energi dari energi hidrogen menjadi energi listrik melalui suatu reaksi elektrokimia<sup>[5]</sup>. Bahan baku utama dari sel bahan bakar (*fuel cell*) adalah gas hidrogen yang dapat berasal dari sinar matahari, sampah organik (*biomass*) ataupun dari angin<sup>[6]</sup>. Sel bahan bakar (*fuel cell*) merupakan alat konversi energi yang dapat diisi ulang (*rechargeable*) dan juga dapat dibawa kemana-mana (*portable*)<sup>[5]</sup>. Semua hal tersebut di atas membuat sel bahan bakar (*fuel cell*) dapat dijadikan sebagai sumber energi yang cukup potensial untuk mengatasi permasalahan energi global dewasa ini.

Sejarah dan perkembangan sel bahan bakar (*fuel cell*) ini cukup panjang. Terminologi *fuel cell* pertama kali diperkenalkan oleh Sir Wiliam Grove pada tahun 1839<sup>[5]</sup>. Grove menemukan bahwa ternyata air dapat terurai menjadi gas hidrogen dan gas oksigen ketika diberikan suatu arus listrik<sup>[5]</sup>. Grove kemudian berhipotesis bahwa jika reaksi elektrokimia tersebut dapat dibalik di mana ketika gas hidrogen direaksikan dengan gas oksigen maka dapat menghasilkan air dan juga energi listrik<sup>[5]</sup>. Terminologi inilah yang pertama kali mendasari pemikiran mengenai pengembangan teknologi sel bahan bakar (*fuel cell*).

Secara umum *fuel cell* dapat didefinisikan sebagai suatu alat konversi energi kimia dari beberapa reaktan sehingga dapat menghasilkan suatu energi listrik melalui suatu reaksi elektrokimia secara langsung<sup>[6]</sup>. Reaksi elektrokimia yang terjadi pada *fuel cell* merupakan suatu reaksi pembakaran yang dapat dirumuskan sebagai berikut<sup>[5]</sup>:



Dari persamaan reaksi elektrokimia di atas dapat terlihat bahwa *fuel cell* merupakan alat konversi energi yang ramah lingkungan karena emisi yang dihasilkan dari perangkat ini adalah uap air. Skema kerja dari sistem input dan output dari *fuel cell* dapat dilihat pada gambar di bawah ini<sup>[5]</sup>:



**Gambar 2.1.** Skema *Input dan Output Fuel Cell*<sup>[5]</sup>

Sebagai suatu alat konversi energi, *fuel cell* memiliki beberapa keunggulan yang membuat *fuel cell* menjadi kandidat yang cukup menjanjikan sebagai suatu sumber energi alternatif. Beberapa keunggulan yang dimiliki oleh *fuel cell* ini adalah sebagai berikut<sup>[6]</sup>:

- Efisiensi energi yang cukup tinggi.
- Tidak mengeluarkan emisi suara atau tidak berisik.
- Bebas emisi polutan udara sehingga ramah lingkungan.
- Dapat digunakan untuk beragam aplikasi penggunaan.

Sel bahan bakar (*fuel cell*) memiliki banyak jenis dan spesifikasi. Pengelompokan jenis *fuel cell* dilakukan berdasarkan parameter jenis elektrolit yang menyusun *fuel cell* tersebut. Secara umum jenis elektrolit yang terdapat di dalam *fuel cell* akan menentukan<sup>[6]</sup>:

- Jenis sel bahan bakar (*fuel cell*).
- Jenis reaksi elektrokimia yang terjadi di dalam *fuel cell*.
- Jenis katalis yang digunakan.
- Jenis bahan bakar atau input yang diperlukan.
- Rentang temperatur kerja dari *fuel cell*.

Berdasarkan jenis elektrolit penyusunnya maka *fuel cell* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu sebagai berikut<sup>[6]</sup>:

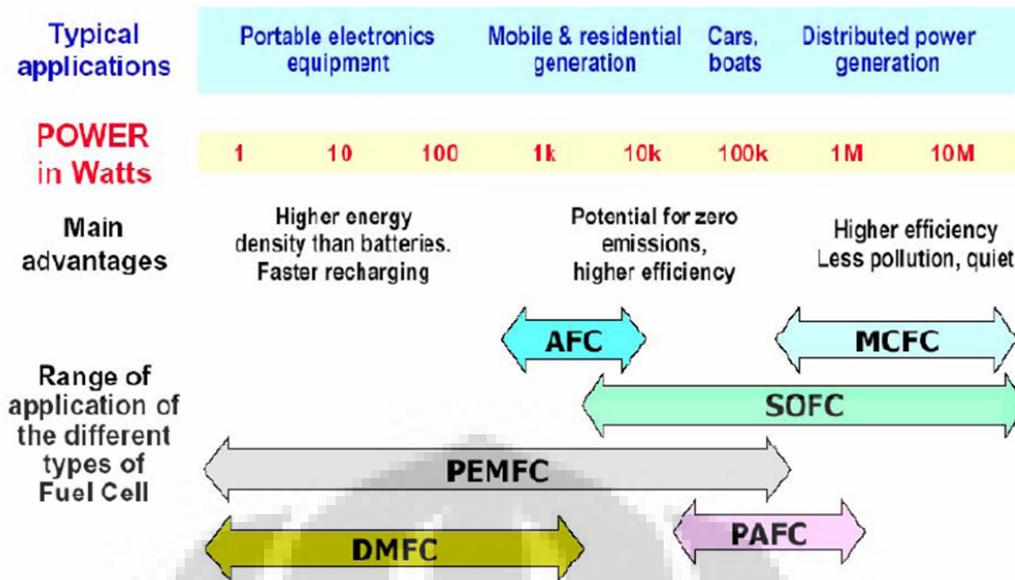
- *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC)
- *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC)
- *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC)
- *Alkaline Fuel Cell* (AFC)
- *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC)

Perbedaan dari jenis-jenis fuel cell tersebut dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 2.1.** Perbedaan Jenis-Jenis *Fuel Cell*<sup>[6]</sup>

<b>Parameter</b>	<b>PEMFC</b>	<b>AFC</b>	<b>PAFC</b>	<b>MCFC</b>	<b>SOFC</b>
<b>Electrolite</b>	<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 LiAlO<sub>2</sub></i>	<i>Perovskite (ceramic)</i>
<b>Catalyst</b>	<i>Platinum</i>	<i>Platinum</i>	<i>Platinum</i>	<i>Electrode Material</i>	<i>Electrode Material</i>
<b>Electrodes</b>	<i>Carbon</i>	<i>Transition Metal</i>	<i>Carbon</i>	<i>Nickel and NiO</i>	<i>Perovskite</i>
<b>Interconnect</b>	<i>Carbon or Metal</i>	<i>Metal</i>	<i>Graphite</i>	<i>Stainless steel / nickel</i>	<i>Ni, steel or ceramic</i>
<b>Operating Temperature</b>	<i>40-80°C</i>	<i>65-220°C</i>	<i>±205°C</i>	<i>±650°C</i>	<i>600-1000°C</i>
<b>Charge Carrier</b>	<i>H<sup>+</sup></i>	<i>OH<sup>-</sup></i>	<i>H<sup>+</sup></i>	<i>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></i>	<i>O<sup>2-</sup></i>
<b>External Reformer</b>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>No</i>
<b>Prime Cell Components</b>	<i>Carbon based</i>	<i>Carbon based</i>	<i>Graphite based</i>	<i>Stainless Steel based</i>	<i>Ceramic based</i>
<b>Product Water Management</b>	<i>Evaporative</i>	<i>Evaporative</i>	<i>Evaporative</i>	<i>Gaseous Product</i>	<i>Gaseous Product</i>

Sementara rentang daya listrik yang dapat dihasilkan oleh setiap jenis fuel cell dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.2. Rentang Output Daya Listrik Fuel Cell<sup>[12]</sup>

## 2.2. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) adalah salah satu jenis sel bahan bakar yang cukup menjanjikan sebagai sumber energi alternatif khususnya untuk aplikasi bidang transportasi di masa depan karena memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan jenis sel bahan bakar lainnya. PEMFC juga dikenal sebagai *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* atau *Solid Polymer Fuel Cell (SPFC)*<sup>[11]</sup>.

PEMFC merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang menggunakan membran pertukaran *solid state* untuk memisahkan elektrodanya. Membran ini pertama kali ditemukan oleh seorang ilmuwan yang bernama William Grubbs pada tahun 1959<sup>[11]</sup>. Grubbs menemukan bahwa tanpa adanya asam yang kuat pada membran ini maka membran tersebut akan mampu untuk memindahkan kation dan proton ke katoda<sup>[11]</sup>.

PEMFC merupakan sumber energi alternatif yang sangat baik bila diaplikasikan pada alat transportasi, karena perangkatnya mudah didistribusikan dan mudah dibawa<sup>[12, 13]</sup>. Pada lima tahun terakhir, penelitian PEMFC mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Industri otomotif melakukan investasi melalui berbagai usaha dalam mengkomersialisasi PEMFC pada mobil dengan harapan mampu bersaing dengan kendaraan bermesin bakar internal<sup>[14]</sup>.

### 2.2.1. Keunggulan PEMFC

Keunggulan yang dimiliki oleh *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) secara umum adalah tingkat efisiensi energi yang tinggi, densitas energi yang tinggi, dapat digunakan pada temperatur pengoperasian yang rendah, suplai bahan bakar yang tepat serta dapat digunakan untuk jangka waktu pemakaian yang cukup lama<sup>[7,15]</sup>. Keunggulan yang dimiliki oleh PEMFC secara terperinci adalah sebagai berikut<sup>[16]</sup>:

- PEMFC mempunyai elektrolit padat yang memberikan ketahanan yang sangat baik terhadap gas.
- Temperature operasi PEMFC yang rendah memungkinkan waktu *start up* yang cepat.
- PEMFC tidak memiliki konstituen sel yang bersifat korosif.
- PEMFC cocok digunakan terutama untuk situasi dimana hidrogen murni dapat digunakan sebagai bahan bakar
- PEMFC mampu beroperasi pada kondisi tekanan hingga 3000 psi dan memiliki differensial tekanan hingga 500 psi.
- *Stack* PEMFC mudah untuk disusun sehingga mudah untuk digunakan dalam berbagai aplikasi.
- Kapasitas daya listrik yang dihasilkan oleh PEMFC cukup bervariasi mulai dari 0,1 watt – 100 kW.
- PEMFC dapat beroperasi pada densitas arus yang sangat tinggi dibandingkan dengan jenis *fuel cell* yang lainnya.

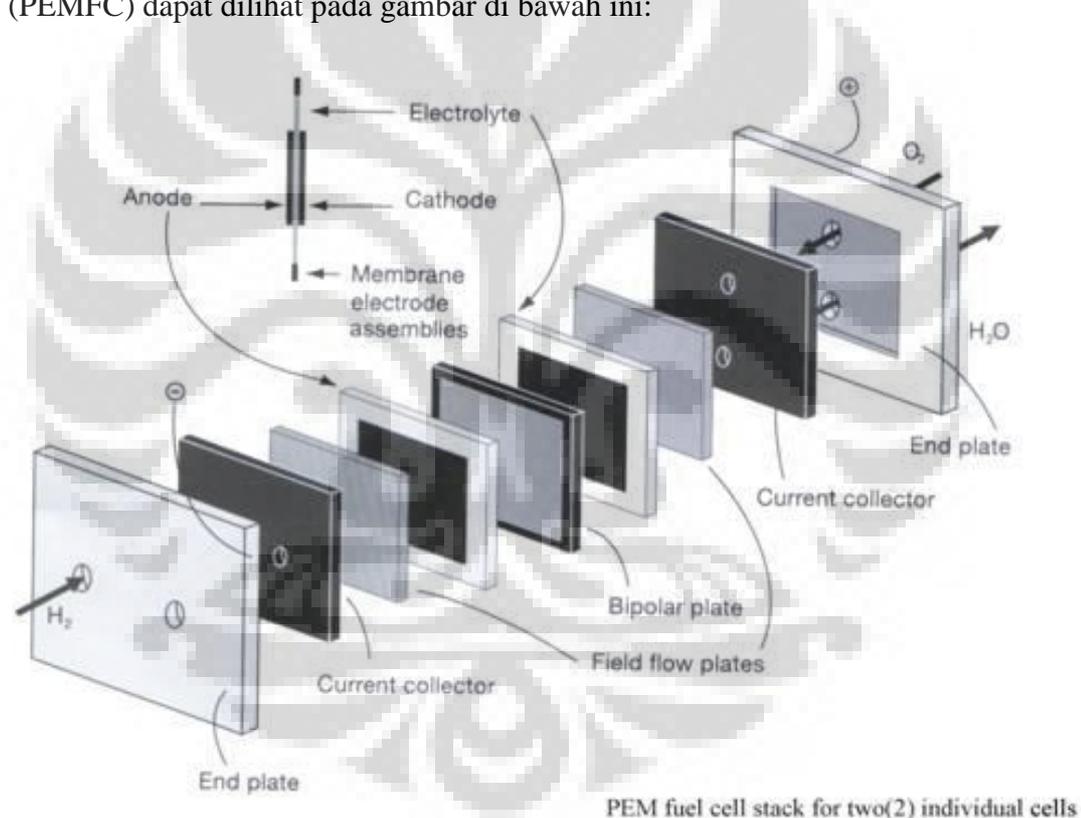
### 2.2.2. Keterbatasan PEMFC

Secara umum biaya fabrikasi yang cukup tinggi untuk memproduksi *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) masih menjadi kendala utama untuk dapat memproduksi alat konversi energi alternatif ini. Oleh karena itu diperlukan suatu inovasi dan terobosan dalam mendesain suatu proses fabrikasi dan pemilihan material yang tepat melalui suatu penelitian secara komprehensif sehingga PEMFC ini dapat diproduksi dalam jumlah masal dengan harga cukup ekonomis. Sementara keterbatasan yang dimiliki oleh PEMFC adalah sebagai berikut<sup>[11]</sup>:

- Temperatur operasi yang rendah dan rentang temperatur kerja yang sempit merupakan kendala tersendiri dalam membuat manajemen panas PEMFC.
- Pengolahan air (*water management*) merupakan salah satu tantangan tersendiri dalam mendesain PEMFC.
- PEMFC sangat sensitif terhadap kontaminasi oleh gas CO, sulfur dan amonia.
- Kualitas panas yang dihasilkan PEMFC rendah dan tidak dapat digunakan secara efektif di semua tempat.

### 2.2.3. Struktur PEMFC

Struktur atau susunan dari *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 2.3.** Susunan PEMFC<sup>[17]</sup>

Secara umum bagian-bagian yang menyusun sistem dari PEMFC terbagi menjadi 4 bagian, yaitu *Membrane Electrolyte Assembly* (MEA), pelat bipolar, *endpelat*, dan bagian pengumpul arus<sup>[6]</sup>. Material yang digunakan dan fungsi dari setiap komponen penyusun PEMFC dapat dilihat pada tabel di bawah ini<sup>[8]</sup>:

**Tabel 2.2.** Komponen Utama Penyusun PEMFC<sup>[8]</sup>

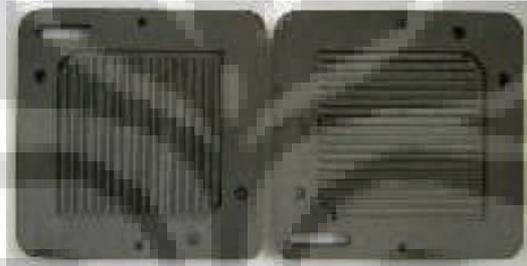
Komponen	Bahan Penyusun	Fungsi
<i>Membrane Electrolyte Assembly</i> (MEA)	Polimer solid terimpregnasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda.  Kertas atau kain karbon berpori untuk <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	Terdiri dari 2 elektroda, 1 membran elektrolit, dan 2 GDL. Membran memisahkan 2 setengah-reaksi 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	Grafrit, <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 aluminium)	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.

### 2.3. Pelat Bipolar

Pelat bipolar merupakan bagian penting dari sistem *fuel cell*. Pelat bipolar itu sendiri merupakan komponen utama dalam PEMFC yang berfungsi untuk mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda menuju katoda. Sebagai komponen utama dalam PEMFC, pelat bipolar berkontribusi terhadap 80% dari

volume PEMFC, 70% dari berat PEMFC serta 60% dari biaya fabrikasi PEMFC<sup>[7]</sup>. Hal ini berarti bahwa reduksi ukuran, berat dan biaya fabrikasi pelat bipolar PEMFC dapat difokuskan pada pemilihan material serta metode fabrikasi yang tepat<sup>[7]</sup>.

Pelat bipolar ini berperan dalam mengumpulkan arus dari masing-masing *Membran Electrolite Assembly* (MEA) yang terletak di antara pelat anoda dan pelat katoda. Syarat utama material yang dapat dijadikan sebagai pelat bipolar adalah mampu mengalirkan listrik atau menghantarkan elektron dengan baik dan tidak dapat ditembus gas. Pelat bipolar biasanya dibuat dari bahan grafit, logam seperti aluminium, baja tahan karat (*stainless steel*), paduan titanium paduan nikel, atau dapat juga dibuat dari material komposit.



**Gambar 2.4.** Pelat Bipolar<sup>[18]</sup>

Fungsi utama pelat bipolar dalam *fuel cell* adalah sebagai berikut<sup>[8]</sup>:

- Mengalirkan elektron ke seluruh sirkuit *fuel cell*.
- Mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda dan katoda,
- Menyatukan rangkaian *fuel cell* yang dilengkapi voltase (rangkaiannya tergantung pada bentuk pelat bipolar)
- Mengalirkan dan mendistribusikan gas ke elektroda secara merata.
- Memisahkan oksigen dan bahan bakar gas lainnya.
- Memasukkan gas H<sub>2</sub> ke anoda dan memasukkan gas O<sub>2</sub> ke katoda
- Membuang air hasil reaksi.
- Berperan sebagai penguat mekanik sekaligus penahan membran tipis dan elektroda dan sebagai penjepit rangkaian *fuel cell*.
- Berperan sebagai konduktor panas untuk meregulasikan temperatur *fuel cell* dan memindahkan panas dari elektroda ke saluran pendingin.

Sementara spesifikasi yang harus dipenuhi oleh suatu material agar dapat dijadikan sebagai pelat bipolar sesuai dengan standarisasi yang ditetapkan oleh Departemen Energi Amerika Serikat (Department of Energy United States) dapat dilihat pada tabel di bawah ini<sup>[8]</sup>:

**Tabel 2.3.** Spesifikasi Material untuk Pelat Bipolar Ideal<sup>[8]</sup>

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 <sup>2</sup>
Kerapatan Arus <i>Decay</i>	< 10% per 5000 jam operasi
Daya Tembus ( <i>permeability</i> )	Maksimum kebocoran H <sub>2</sub> 10 <sup>-4</sup> cm <sup>3</sup> /s-cm <sup>2</sup>

Sementara bahan yang dapat dijadikan sebagai pelat bipolar berikut karakteristiknya dapat dilihat pada tabel di bawah ini<sup>[19]</sup>:

**Tabel 2.4.** Material untuk Pelat Bipolar PEMFC<sup>[19]</sup>

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

## 2.4. Material Komposit

Material komposit merupakan salah satu jenis material rekayasa yang banyak dikembangkan oleh masyarakat global dewasa ini. Material komposit dapat didefinisikan sebagai suatu material rekayasa yang tersusun atas kombinasi antara dua jenis material konstituen atau lebih di mana kombinasi ini terjadi dalam skala makroskopis<sup>[10]</sup>. Secara umum kombinasi antara dua jenis material atau lebih dapat terjadi pada skala makroskopis ataupun pada skala mikroskopis. Apabila kombinasi antara dua jenis material atau lebih terjadi pada skala mikroskopis maka kombinasi ini dinamakan paduan (*alloy*). Sementara apabila kombinasi tersebut terjadi pada skala makroskopis maka dinamakan komposit<sup>[10]</sup>.

Material komposit banyak dikembangkan sebagai material rekayasa karena memiliki sejumlah keunggulan baik dari sisi sifat (*properties*), metode fabrikasi (*processing*) dan juga keunggulan dalam pemakaiannya (*application*). Secara umum keunggulan yang dimiliki oleh material komposit adalah sebagai berikut<sup>[10]</sup>:

- Memiliki nilai rasio perbandingan antara kekuatan dengan berat yang cukup tinggi (*high strength to weight ratio*).
- Memiliki kekuatan yang cukup tinggi dengan densitas yang relatif rendah.
- Memiliki ketahanan yang baik terhadap mekanisme mulur (*high creep resistant*).
- Memiliki kekuatan tarik (*tensile strength*) yang cukup tinggi pada kondisi temperatur penggunaan yang cukup tinggi.
- Memiliki nilai ketangguhan yang cukup tinggi (*high toughness*).

### 2.4.1. Sistem Material Komposit

Material komposit merupakan sistem kombinasi dari dua jenis material atau lebih. Dalam sistem kombinasi material komposit ini, terdapat material yang berfungsi sebagai matriks dan material yang berfungsi sebagai penguat (*reinforcement*). Matriks dalam komposit merupakan fasa *continuous* yang menyelubungi fasa lainnya (*surrounds other phase*). Fraksi volume dari matriks dalam suatu komposit lebih besar dari pada fraksi volume fasa penguat. Matriks ini juga berperan dalam menentukan jenis material komposit. Sementara penguat (*reinforcement*) merupakan fasa *discontinuous* dalam komposit<sup>[10]</sup>.

### 2.4.2. Matriks Pada Komposit

Matriks merupakan fasa yang dominan pada material komposit. Karakteristik dan jenis dari suatu matriks akan menentukan jenis material komposit secara keseluruhan. Secara umum fungsi matriks dalam material komposit adalah sebagai berikut<sup>[10]</sup>:

- Matriks berperan sebagai penjepit fiber.
- Melindungi fiber dari kerusakan permukaan.
- Mentransfer tegangan atau pembebanan ke serat.
- Menginfiltrasi atau mengisi serat dan untuk menginisiasi proses pembekuan.
- Membentuk ikatan koheren antara permukaan matriks dan serat.
- Melepas ikatan.
- Menstabilkan proses pembekuan setelah proses manufaktur
- Memisahkan antara satu fiber dengan fiber lainnya.
- Mencegah terjadinya perambatan retak (*crack propagation*) dari suatu fiber ke fiber lainnya.
- Sebagai media transfer beban atau *eksternal stress*.
- Sebagai media untuk mentransmisikan atau mendistribusikan *eksternal stress* yang diterima komposit ke fiber.
- Sebagai media pembagi beban dari matriks ke fiber.

Secara umum tidak semua material dapat digunakan sebagai matriks dalam material komposit. Material yang akan dijadikan sebagai matriks dalam material komposit harus memenuhi sejumlah persyaratan tertentu. Persyaratan suatu material dapat dijadikan matriks untuk material komposit adalah sebagai berikut<sup>[10]</sup>:

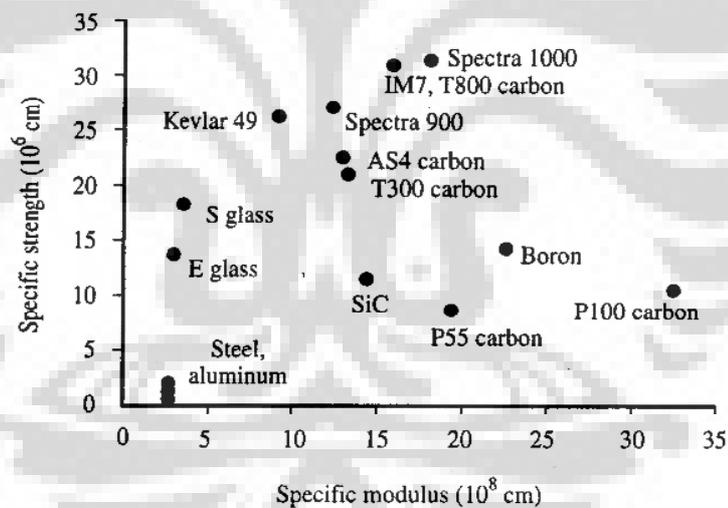
- Memiliki nilai keuletan (*ductility*) yang tinggi.
- Memiliki nilai modulus elastisitas yang lebih rendah dari pada fiber.
- Mempunyai ikatan *interface* yang baik antara matriks dan fiber.
- Mampu membasahi fiber.
- Matriks yang umum yang digunakan adalah material polimer dan material logam.

### 2.4.3. Penguat (*Reinforcement*) Pada Komposit

Material penguat (*reinforcement*) pada material komposit berperan penting dalam meningkatkan sifat mekanis dari material komposit. Penguat (*reinforcement*) pada material komposit merupakan fasa dengan fraksi volume yang lebih rendah daripada fraksi volume matriks. Penguat (*reinforcement*) pada umumnya ditambahkan dalam jumlah kecil namun dapat meningkatkan sifat dari material komposit secara signifikan. Secara umum fungsi penguat (*reinforcement*) dalam material komposit adalah sebagai berikut<sup>[10]</sup>:

- Sebagai penguat (*reinforcement*) dalam komposit
- Sebagai media penanggung beban
- Meningkatkan kekuatan material komposit
- Meningkatkan ketangguhan material komposit

Gambaran mengenai kekuatan berbagai *fiber reinforcement* dalam komposit adalah sebagai berikut<sup>[20]</sup>:



Gambar 2.5. Kekuatan Berbagai *Fiber Reinforcements*<sup>[20]</sup>

Sementara pesyaratan suatu material dapat dijadikan sebagai penguat (*reinforcement*) untuk material komposit adalah sebagai berikut<sup>[10]</sup>:

- Mempunyai diameter yang lebih kecil dari diameter *bulk* atau matriksnya.
- Fiber harus lebih kuat dari *bulk* atau matriksnya
- Penguat fiber harus mempunyai kekuatan tarik atau *tensile strength* yang tinggi

#### 2.4.4. Klasifikasi Material Komposit

Klasifikasi dalam suatu sistem material dapat mempermudah seseorang untuk mempelajari material tersebut. Sebagai suatu material rekayasa, material komposit memiliki beberapa parameter untuk mengklasifikasikannya. Klasifikasi dari material komposit adalah sebagai berikut:

- Klasifikasi material komposit berdasarkan sumber ketersediaannya.
- Klasifikasi material komposit berdasarkan jenis penguat (*reinforcement*).
- Klasifikasi material komposit berdasarkan jenis matriksnya.

Berdasarkan sumber ketersediaannya, material komposit dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu sebagai berikut<sup>[10]</sup>:

- Komposit alam (*natural composite*)

Komposit alam (*natural composite*) merupakan material komposit yang secara harfiah dihasilkan oleh alam<sup>[10]</sup>. Contoh dari komposit alam adalah sebagai berikut:

- Kayu (*wood*)

Kayu (*wood*) merupakan komposit alam yang tersusun atas pengaut (*reinforcement*) yang berupa *flexible cellulose fibers*. Sementara matriks pada komposit kayu ini berupa *stiff lignin*<sup>[10]</sup>.

- Tulang (*bone*)

Tulang (*bone*) merupakan komposit alam yang tersusun atas pengaut (*reinforcement*) yang berupa *strong protein collagen*. Sementara matriks pada komposit tulang ini berupa *brittle apatite*<sup>[10]</sup>.

- Komposit buatan (*artificial composite*)

Komposit buatan (*artificial composite*) merupakan komposit yang dibuat atau disintesis oleh manusia melalui suatu proses *engineering*<sup>[10]</sup>. Contoh komposit buatan adalah sebagai berikut<sup>[10]</sup>:

- *Automobile tires*
- *Spherodized steel*
- Beton bertulang (*concrete*)
- *Fiber glass*
- Komposit Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- *Ceramic metal composite* (Cermet)

Berdasarkan jenis penguatnya, material komposit dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu sebagai berikut<sup>[21]</sup>:

➤ Komposit berpenguat partikel

Penguat partikel dalam komposit dapat berupa *large particles* ataupun *dispersion strngthened particles*<sup>[21]</sup>.

➤ Komposit berpenguat fiber

Penguat serat dalam komposit dapat berupa serat kontinu (*continuous fiber*) ataupun serat putus-putus (*discontinuous fiber*)<sup>[21]</sup>.

➤ Komposit berpenguat struktural

Komposit berpenguat struktural dapat berupa *laminates* ataupun *sandwich panels*<sup>[21]</sup>.

Sementara berdasarkan jenis matriksnya, material komposit dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu sebagai berikut<sup>[21]</sup>:

➤ *Metal Matrix Composite* (MMC)

*Metal Matrix Composite* (MMC) merupakan komposit yang tersusun atas matriks berbasis material logam.

➤ *Polymer Matrix Composite* (PMC)

*Polymer Matrix Composite* (PMC) merupakan komposit yang tersusun atas matriks berbasis material polimer.

➤ *Ceramic Matrix Composite* (CMC)

*Ceramic Matrix Composite* (CMC) merupakan komposit yang tersusun atas matriks berbasis material keramik.

## 2.5. Nano Komposit

Secara etimologi kata “nano” berasal dari bahasa Yunani yang berarti *dwarf* atau kurcaci<sup>[22]</sup>. Pada tahun 1960 telah disepakati dalam standarisasi Satuan Internasional (SI) bahwa satuan nano berarti faktor pengali  $10^{-9}$  dan dapat singkat sebagai *n*<sup>[22]</sup>.

Sebagai suatu istilah dalam dunia rekayasa material, *hybrid* nano komposit dapat didefinisikan sebagai suatu material padat yang diperoleh dari kombinasi dari dua konsituen material atau lebih di mana salah satu konstituen material penyusunnya memiliki ukuran partikel dalam skala nano meter<sup>[22]</sup>. Kombinasi

material ini biasanya terdiri atas material induk yang berupa padatan anorganik yang mengandung komponen organik ataupun sebaliknya<sup>[22]</sup>. Kombinasi antara dua atau lebih material organik dan anorganik ini terjadi dalam suatu bentuk kombinasi di mana paling tidak salah satu fasa penyusun kombinasi ini memiliki dimensi kurang dari 100 nm<sup>[22]</sup>.

Istilah nano komposit pertama kali diperkenalkan oleh Theng pada tahun 1970<sup>[22]</sup>. Pada perkembangannya istilah nano komposit ini berkembang menjadi beberapa istilah seperti nano struktural komposit, *hybrid* nano komposit dan nano *hybrid*<sup>[22]</sup>. Sanchez dan Ribot pertama kali memperkenalkan istilah *hybrid* yang dapat berupa suatu sistem homogen yang berasal dari monomer, komponen organik dan komponen anorganik ataupun berupa suatu sistem heterogen atau nano komposit di mana salah satu konstituen dalam sistem heterogen ini memiliki ukuran dengan dimensi yang bervariasi mulai dari skala angstrom sampai beberapa nano meter<sup>[22]</sup>.

Tanpa disadari sebenarnya terdapat material *hybrid* dengan jumlah yang tidak terhingga yang berada di sekitar lingkungan kita. Material *hybrid* tersebut terdiri atas konstituen bio-organik dan konstituen organik yang berada dalam skala nano meter dan telah dihasilkan secara alami oleh alam semesta sejak lima ratus juta tahun yang lalu<sup>[22]</sup>. Sebagai contoh dari material *hybrid* yang diproduksi secara alami ini adalah cangkang udang, cangkang dan tulang hewan lunak (*mollusca*) dan jaringan penyusun gigi pada hewan bertulang belakang seperti manusia<sup>[22]</sup>. Material *hybrid* alami tersebut dapat digolongkan sebagai suatu nano komposit alami. Salah satu contoh dari nano komposit alami ini adalah rangka dari diatom yang tergolong sebagai mikroorganisme yang hidup di lingkungan perairan<sup>[22]</sup>.

Selain nano komposit alami seperti yang telah dijabarkan di atas terdapat satu jenis nano komposit lainnya yang umumnya dikenal sebagai *modern* nano komposit. Komposit yang satu ini tergolong sebagai suatu material rekayasa yang sengaja disintesis atau diproduksi oleh manusia untuk kebutuhan aplikasi tertentu. Lebih jauh lagi perkembangan dari *modern* nano komposit ditandai dengan perkembangan industri cat dan industri polimer pada tahun 1950-an<sup>[22]</sup>. Proses fabrikasi dari *modern* nano komposit ini diawali oleh perkembangan pembuatan

pigmen anorganik dan *filler* untuk komponen organik seperti pelarut, pelapis dan polimer untuk meningkatkan sifat mekanis dan sifat optis dari produk yang dihasilkan<sup>[22]</sup>.

Sebagai tambahan suatu material dapat dikatakan berada dalam suatu struktur nano apabila salah satu dimensi ukurannya berada dalam skala nano meter seperti berikut ini<sup>[22]</sup>:

- Nol dimensi (0D) seperti *embedded clusters*.
- Satu dimensi (1D) seperti *nanotubes*.
- Dua dimensi (2D) seperti *nanoscale film*.
- Tiga dimensi (3D) seperti *embedded network*.

Selain klasifikasi di atas, material nano *hybrid* juga dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk dari material konstituen penyusunnya dan aplikasinya seperti sebagai berikut<sup>[22]</sup>:

- *metal and ceramic nanohybrids*;
- *bio-mimetic nanohybrids*;
- *polymer-based and polymer-filled nanohybrids*.

## 2.6. Komposit Polimer Termoplastik

Komposit polimer merupakan suatu komposit yang didominasi oleh material polimer sebagai matriksnya. Keunggulan dari material polimer yang dijadikan sebagai matriks dalam komposit polimer adalah sebagai berikut<sup>[21]</sup>:

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

Secara garis besar material polimer dapat diklasifikasikan ke dalam 3 kelas utama, yaitu sebagai berikut<sup>[9]</sup>:

- Polimer termoplastik

Polimer 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 dari polimer termoplastik ini adalah polipropilena (PP), polietilena (PE), *Poly Vinyl Chloride* (PVC), polistirena (PS) dan lain sebagainya.

➤ Polimer termoset

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

➤ Polimer elastomer

Polimer 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 dari polimer elastomer ini adalah karet alam, *Styrene Butadiene Rubber (SBR), buthyl rubber* dan lain sebagainya.

Keunggulan yang dimiliki oleh polimer termoplastik sehingga dapat dijadikan sebagai matriks dalam komposit polimer adalah sebagai berikut<sup>[21]</sup>:

- 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.

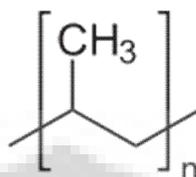
Sementara keterbatasan yang dimiliki oleh polimer termoplastik sebagai matriks dalam komposit polimer adalah sebagai berikut<sup>[21]</sup>:

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

## 2.7. Polipropilena (PP)

Polypropilena termasuk ke dalam jenis polimer termoplastik yang memiliki struktur rantai molekul linier. Polimer polipropilena ini diproduksi dengan cara proses polimerisasi dari monomer propilena. Proses polimerisasi adalah proses penyambungan unit-unit molekul kecil (*monomer*) menjadi molekul makro (*macromolecule*) dengan struktur rantai molekul yang sangat panjang<sup>[11]</sup>. Kebanyakan polipropilena komersial merupakan isotaktik dan

memiliki kristalinitas tingkat menengah di antara polietilena berdensitas rendah dengan polietilena berdensitas tinggi. Aplikasi dari polipropilena antara lain adalah untuk pengemasan, tekstil, alat tulis, berbagai tipe wadah, perlengkapan laboratorium, komponen otomotif, dan uang kertas polimer<sup>[23]</sup>.



Gambar 2.6. Rumus Struktural Polipropilena<sup>[23]</sup>

Keunggulan yang dimiliki oleh polipropilena adalah sebagai berikut<sup>[24]</sup>:

- Ringan karena memiliki berat jenis antara 0,9-0,92 gram/cm<sup>3</sup>.
- Memiliki ketahanan terhadap *stress* dan retak yang tinggi (kekuatan tekan dan kekuatan tarik yang tinggi)
- Memiliki suhu operasional yang tinggi dengan titik leleh 160°C.
- Memiliki sifat dielektrik yang baik
- Memiliki ketahanan yang baik terhadap serangan alkali kuat, asam, pelarut organik dan *elektrostatic degreasing*.
- Tidak beracun
- Mudah untuk diproduksi, dirakit dan murah

Struktur dari polipropilena juga mengalami isomerisasi. Isomerisasi dari polimer dibagi menjadi dua yaitu isomerisme stereo dan isomerisme geometrikal<sup>[9]</sup>. Isomerisme stereo adalah isomerisme yang disebabkan oleh perbedaan lokasi atom-atom R atau gugus-gugus samping<sup>[9]</sup>. Isomerisme stereo pada polipropilena dibagi menjadi 3 macam, yaitu sebagai berikut<sup>[9]</sup>:

- Isomer stereo isotactic

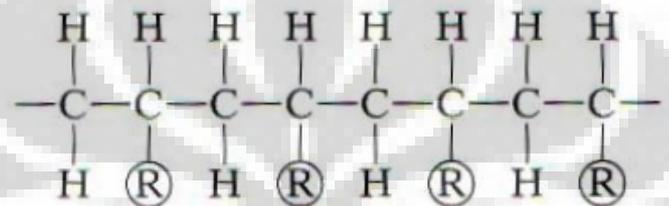
Isomer stereo isotactic adalah isomer yang atom-atom R atau gugus samping berada pada sisi yang sama dari rantai utama. Apabila gugus metil pada polipropilena berada pada sisi yang sama dari rantai utama maka dinamakan polipropilena isotactic.

- Isomer stereo syndiotactic

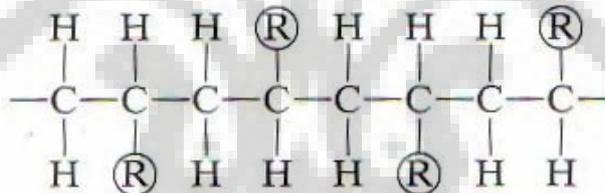
Isomer stereo syndiotactic adalah isomer yang atom-atom R atau gugus samping berada pada sisi yang berselang-seling dari rantai utama. Apabila gugus metil pada polipropilena berada pada sisi yang berselang-seling dari rantai utama maka dinamakan polipropilena syndiotactic.

➤ Isomer stereo atactic

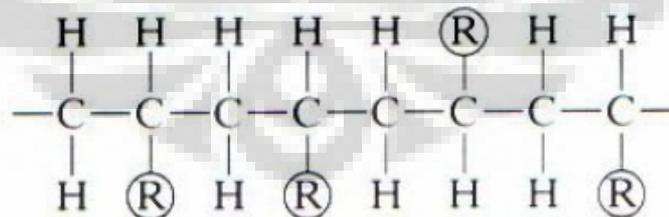
Isomer stereo atactic adalah isomer yang atom-atom R atau gugus samping berada pada sisi yang saling acak dari rantai utama. Apabila gugus metil pada polipropilena berada pada sisi yang saling acak dari rantai utama maka dinamakan polipropilena atactic.



Isotactic



syndiotactic



atactic

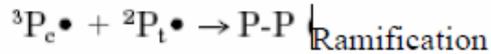
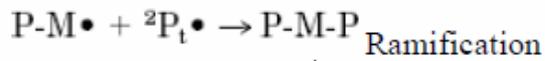
**Gambar 2.7.** Jenis Isomerisme Stereo pada Polipropilena<sup>[1]</sup>

Sedangkan isomer geometrikal adalah isomer yang disebabkan oleh perbedaan gugus R dan atom H terhadap posisi ikatan ganda pada rantai polimer.





- Terminasi melalui kombinasi



- Terminasi melalui disproporsionasi



Keterangan:

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

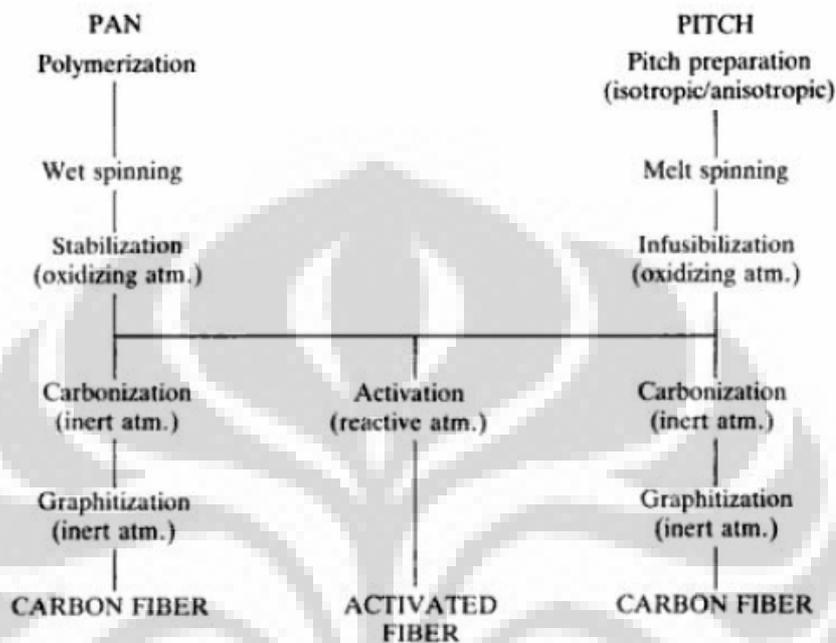
Reaksi pencangkakan (*grafting*) anhidrida maleat pada polipropilen dalam proses ini melibatkan reaksi polimer leleh dengan anhidrida maleat yang dipengaruhi adanya peroksida organik<sup>[26]</sup>.

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 pencangkakan (*grafting*). Untuk mendapatkan kondisi optimum dari proses pencangkakan 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<sup>[26]</sup>.

## 2.9. Serat Karbon

Serat karbon adalah serat yang memiliki komposisi minimal 92 wt.% karbon. Struktur kristal dari serat karbon bermacam-macam yaitu kristalin, amorf dan semi kristalin. Serat karbon memiliki diameter yang sangat tipis yaitu 0,005-

0,010 mm. Tujuan ditambahkan serat karbon didalam sistem komposit adalah untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Serat karbon di hasilkan dengan cara mensintesis dari rayon, poliakrilonitril (PAN), dan pitch dengan menghilangkan hidrogen dan nitrogen dalam kondisi atmosfer inert<sup>[11]</sup>.



Gambar 2.9. Proses Pembuatan Serat Karbon dari PAN dan *Pitch*<sup>[11]</sup>

## 2.10. Grafit

Grafit, sebagaimana berlian, adalah bentuk alotrop karbon, karena kedua senyawa ini mirip namun karakteristik struktur atomnya dapat mempengaruhi sifat kimiawi dan fisiknya. Grafit terdiri atas lapisan atom karbon, yang dapat menggelincir dengan mudah. Artinya, grafit amat lembut, dan dapat digunakan sebagai minyak pelumas untuk membuat peralatan mekanis bekerja lebih lancar.

Grafit berwarna kelabu. Akibat delokalisasi elektron antarpermukannya, grafit dapat berfungsi sebagai konduktor listrik. Grafit dinamai oleh Abraham Gottlob Werner pada tahun 1789 dengan mengambil kata dari bahasa Yunani<sup>[27]</sup>.

Grafit digolongkan menjadi dua jenis, yaitu grafit alami dan grafit sintetik. Grafit sintetik lebih murni dibandingkan grafit alami. Grafit sintetik merupakan produk yang dibuat dari material karbon amorf melalui proses perlakuan khusus pada kondisi temperatur tinggi. Grafit digunakan sebagai bahan pengisi khususnya

dalam matriks polimer karena memiliki konduktivitas listrik dan panas yang baik, serta memiliki sifat-sifat pelumasan (lubrikasi) yang baik. Karena strukturnya yang berlapis, grafit memberi sifat kekakuan dan dimensi yang stabil terhadap polimer<sup>[11]</sup>.

Grafit sintetis 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 sintetis berukuran 2  $\mu\text{m}$  (bubuk) sampai dengan 2 cm (potongan-potongan) dengan kandungan 99% karbon<sup>[11]</sup>. Sifat dan karakteristik dari grafit dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

**Tabel 2.6.** Sifat-Sifat Grafit<sup>[11]</sup>

Sifat-Sifat	Keterangan
Komposisi Kimia	C (80-99,7%), Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < 0,2%
Kerapatan	2- 2,25 gr/cm <sup>3</sup>
Titik lebur	4027 - 4427 °C
Kapasitas Panas	8,517 (25 °C) J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Konduktivitas Panas	200 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Kekerasan	1 - 2 Mohs scale
Hambatan Volume	800 – 2500 $\Omega\text{cm}$
Warna	Hitam keabu-abuan
Struktur Kristal	Hexagonal

### 2.11. Anti-oksidan

Anti-oksidan merupakan senyawa kimia yang digunakan untuk mencegah atau menghambat terjadinya reaksi oksidasi dari material plastik<sup>[28]</sup>. Reaksi oksidasi pada material plastik itu sendiri dapat terjadi pada saat<sup>[28]</sup>:

- Pembentukan resin.
- Pemrosesan resin.
- Penyimpanan resin.
- Produk barang plastik disimpan.
- Produk barang plastik digunakan.

Reaksi oksidasi yang terjadi pada material polimer ini dapat mengakibatkan terjadi perubahan pada sifat polimer itu sendiri, yaitu sebagai berikut<sup>[28]</sup>:

- Terjadinya pemotongan rantai molekul polimer.
- Terjadinya penurunan berat molekul polimer.
- Berkurang atau hilangnya kekuatan mekanik dari polimer.
- Permukaan polimer menjadi kasar.
- Terjadinya perubahan warna pada polimer.
- Terjadinya perubahan *Melt Flow Rate (MFR) Index* dari polimer.

Tahapan reaksi oksidasi pada material polimer terjadi melalui 4 langkah, yaitu sebagai berikut<sup>[28]</sup>:

- *Chain initiation* (langkah pengaktifan)

Tahapan ini diinisiasi oleh adanya pengaruh panas (*heat*), gas oksigen (O<sub>2</sub>), sinar ultraviolet dan gaya mekanik (*mechanical shearing*). Reaksi yang terjadi pada tahapan ini adalah sebagai berikut:



- *Chain propagation* (reaksi lanjutan)

Reaksi yang terjadi pada tahapan ini adalah sebagai berikut:



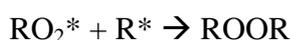
- *Chain branching* (pemutusan rantai)

Reaksi yang terjadi pada tahapan ini adalah sebagai berikut:



- *Chain termination*

Reaksi yang terjadi pada tahapan ini adalah sebagai berikut:



Untuk mencegah atau mengantisipasi terjadinya reaksi oksidasi tersebut maka perlu ditambahkan suatu anti-oksidan. Secara umum anti-oksidan dapat diklasifikasikan menjadi 3 macam, yaitu sebagai berikut<sup>[28]</sup>:

- Anti-oksidan primer (*preventive anti-oxidant*)  
Anti-oksidan primer berfungsi untuk menjadikan peroxide maupun radikal alkil yang terbentuk dalam tahap pengaktifan dan tahap propagasi (misalnya phenoxy) menjadi tidak aktif dengan membentuk radikal lain dan produk samping yang stabil.
- Anti-oksidan sekunder (*chain branching anti-oxidant*)  
Anti-oksidan sekunder berfungsi untuk menguraikan senyawa hidro peroxide dengan membentuk senyawa lain yang lebih stabil.
- *Metal deactivators*  
*Metal deactivators* berfungsi untuk menangkap ion-ion logam yang terdapat dalam polimer dengan membentuk senyawa kompleks (ligan) yang lebih stabil.

## 2.12. Carbon Nano Tube (CNT)

CNT adalah alotrop karbon dengan struktur nano silinder<sup>[29]</sup>. CNT memiliki rasio diameter dan panjang sampai 132,000,000:1, yang secara signifikan lebih besar dibandingkan bahan lainnya. CNT digunakan dalam banyak aplikasi dalam bidang nanoteknologi, elektronik, optik, serta bidang-bidang ilmu material<sup>[29]</sup>. CNT memiliki kekuatan yang luar biasa dan unik terutama dalam sifat elektrik dan memiliki tingkat efisiensi yang tinggi dalam hal konduktansi termal<sup>[29]</sup>. Secara umum CNT dapat diklasifikasikan menjadi CNT berdinding tunggal (*Single Wall Carbon Nanotube/SWCNT*) dan CNT berdinding multi (*Multi Wall Carbon Nanotube/MWCNT*)<sup>[29]</sup>.

Dalam suatu penelitian telah dibuktikan bahwa CNT memiliki kekuatan tarik sebesar 63 GPa<sup>[29]</sup>. Hal ini berarti bahwa CNT memiliki kemampuan untuk bertahan pada tegangan setara berat 6422 kg pada kabel dengan penampang 1 mm<sup>2</sup> CNT. Data juga menunjukkan bahwa CNT memiliki nilai kerapatan jenis yang cukup rendah, yaitu sekitar 1,3-1,4 gram/cm<sup>3</sup>, dan kekuatan spesifik hingga 48.000 kN·M·kg<sup>-1</sup><sup>[29]</sup>. Karakteristik dari CNT dapat dilihat pada tabel di bawah ini<sup>[29]</sup>:

Tabel 2.7. Karakteristik *Carbon Nanotubes*<sup>[29]</sup>

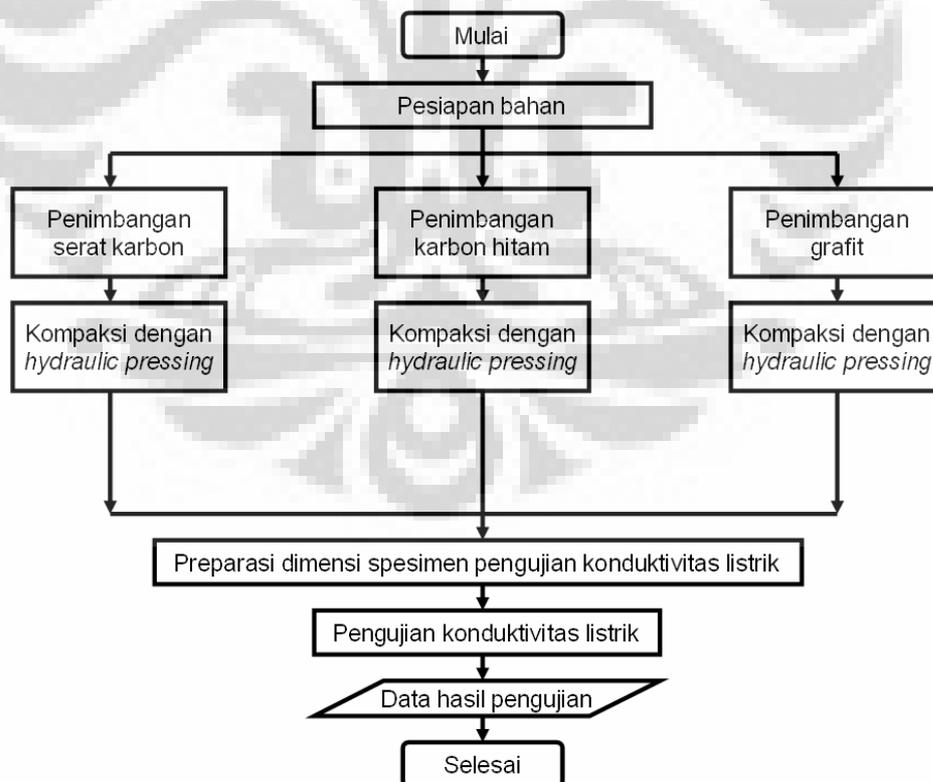
Material	Modulus Young (TPa)	Kekuatan Tarik (GPa)	Elongasi (%)
SWNT	~ 1 (dari 1 sampai 5)	13-53	16
SWNT	0,94	126,2	23.1
Zigzag SWNT	0,94	94,5	15.6-17.5
Kiral SWNT	0.92		
MWNT	0,27 - 0,95	11 - 63	



## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

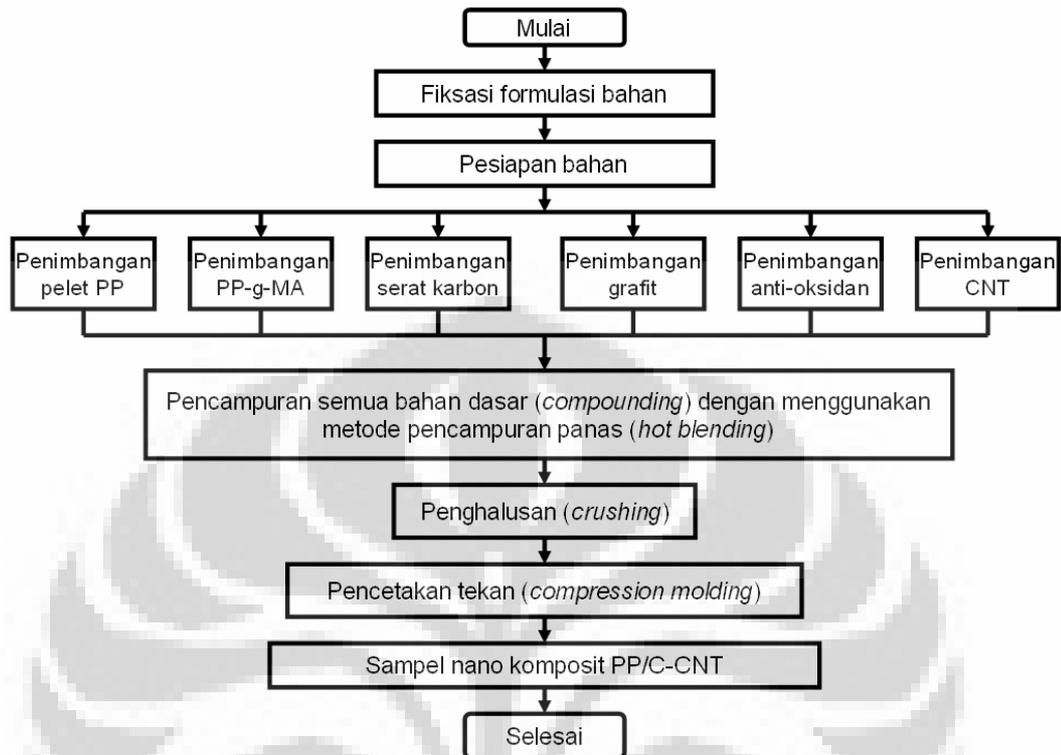
### 3.1. Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian ini secara umum terdapat 3 macam diagram alir penelitian, yaitu diagram alir preparasi spesimen pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan, diagram alir preparasi dan fabrikasi sampel pelat bipolar serta diagram alir karakterisasi dan pengujian sampel pelat bipolar. Tahapan awal dalam penelitian ini adalah pengujian awal nilai konduktivitas listrik dari bahan-bahan yang akan digunakan untuk memfabrikasi pelat bipolar berbasis komposit termoplastik untuk aplikasi PEMFC ini. Tahapan ini penting dilakukan karena dengan mengetahui nilai konduktivitas listrik dari setiap bahan maka dapat dirancang suatu formulasi material yang tepat dan akurat sehingga dapat menghasilkan suatu pelat bipolar dengan sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis yang baik. Diagram alir preparasi spesimen pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan adalah sebagai berikut:



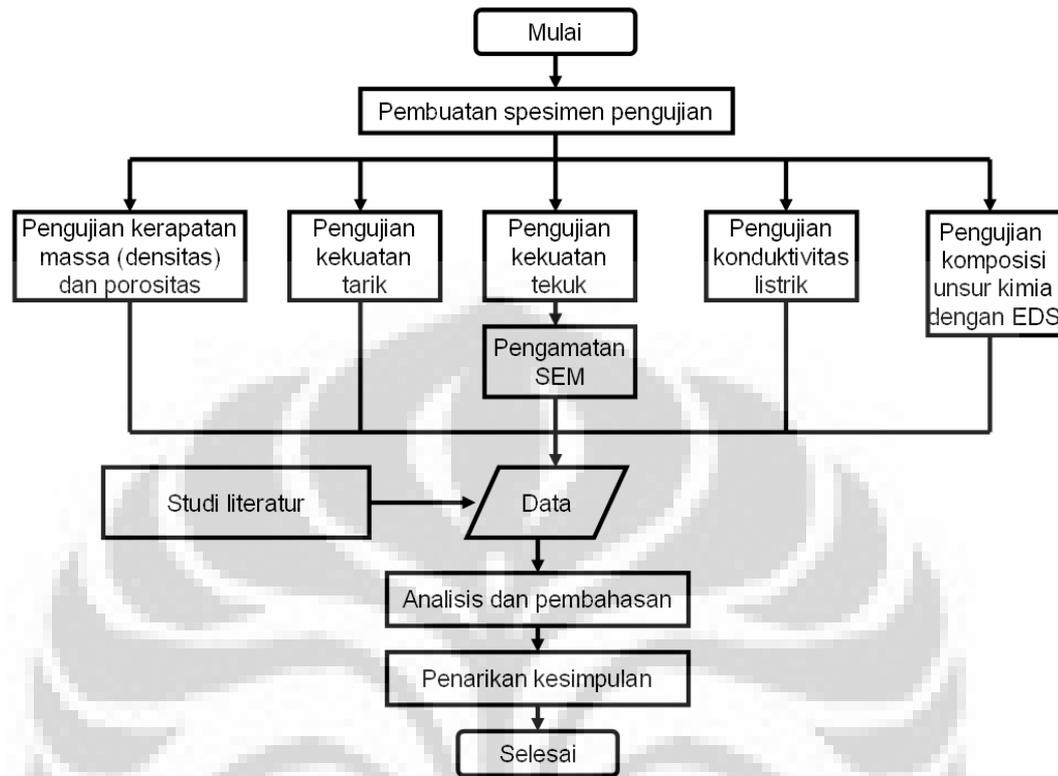
**Gambar 3.1.** Diagram alir preparasi spesimen pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan

Diagram alir preparasi dan fabrikasi sampel pelat bipolar ditunjukkan pada gambar berikut ini:



**Gambar 3.2.** Diagram alir preparasi dan fabrikasi sampel pelat bipolar

Sementara diagram alir karakterisasi dan pengujian sampel pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT adalah sebagai berikut:



**Gambar 3.3.** Diagram alir karakterisasi dan pengujian sampel pelat bipolar

### 3.2. Variabel Penelitian

Variabel penelitian pada dasarnya dapat didefinisikan sebagai segala sesuatu yang berbentuk apa saja yang ditetapkan oleh seorang peneliti untuk dipelajari sehingga diperoleh informasi tentang hal tersebut, kemudian ditarik kesimpulannya<sup>[30]</sup>. Variabel penelitian memiliki peran yang cukup vital dalam suatu penelitian, yaitu untuk mempersiapkan alat dan metode pengumpulan data, untuk mempersiapkan metode analisis dan pengolahan data serta untuk pengujian hipotesis penelitian<sup>[31]</sup>.

Secara umum variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas 3 macam variabel, yaitu variabel bebas, variabel terikat dan variabel terkontrol. Penjelasan terperinci mengenai ketiga macam variabel penelitian tersebut adalah sebagai berikut:

#### 3.2.1. Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan salah satu jenis dari variabel penelitian. Variabel bebas memiliki nama lain seperti variabel independen, variabel stimulus, antecedent, variabel pengaruh ataupun variabel perlakuan<sup>[31]</sup>. Variabel bebas dapat didefinisikan sebagai variabel penelitian yang mempengaruhi atau yang menjadi sebab perubahannya atau timbulnya variabel terikat<sup>[31]</sup>. Variabel ini dinamakan sebagai variabel bebas karena variabel ini bersifat bebas dalam mempengaruhi variabel penelitian lainnya<sup>[31]</sup>.

Penelitian pelat bipolar berbasis material komposit termoplastik untuk aplikasi PEMFC ini menekankan pada aspek desain material yang tepat sehingga dapat menghasilkan pelat bipolar dengan konduktivitas listrik dan sifat mekanis yang prima. Hal ini berarti bahwa penentuan variabel bebas dan variabel penelitian lainnya berhubungan erat dengan aspek pemilihan material dan desain komposisi material. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas satu macam, yaitu fraksi volume penguat material *Carbon Nano Tube* (CNT).

Dalam penelitian ini akan diuji dan dianalisis secara komprehensif apakah variabel bebas dalam penelitian ini, yaitu penambahan material penguat (*reinforcements*) *Carbon Nano Tube* (CNT) memiliki pengaruh terhadap peningkatan sifat mekanis dan konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis

komposit termoplastik ini. Melalui analisis lebih lanjut dapat dipelajari juga seberapa besar pengaruh penambahan fraksi volume penguat material *Carbon Nano Tube* (CNT) terhadap peningkatan sifat mekanis dan konduktivitas listrik dari pelat bipolar berbasis komposit termoplastik ini.

### 3.2.2. Variabel Terikat

Variabel lainnya yang digunakan dalam penelitian ini adalah variabel terikat. Nama lain dari variabel terikat adalah variabel dependen, variabel *output*, variabel efek, variabel terpengaruh, atau variabel tergantung<sup>[31]</sup>. Secara umum variabel terikat dapat didefinisikan sebagai variabel penelitian yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat karena adanya variabel bebas<sup>[31]</sup>. Dinamakan variabel terikat karena variabel ini dipengaruhi oleh variabel bebas atau variabel independen<sup>[31]</sup>. Variabel terikat dari penelitian ini terdiri atas tiga macam, yaitu sebagai berikut:

- Sifat konduktivitas listrik pelat bipolar.
- Sifat mekanis pelat bipolar.
- Sifat fisis pelat bipolar.

Variabel terikat dalam suatu penelitian berbasis ilmu material merupakan suatu sifat atau karakteristik yang kualitas maupun kuantitasnya dapat diperoleh melalui suatu pengujian material<sup>[32]</sup>. Dalam penelitian pelat bipolar berbasis material komposit termoplastik dilakukan beberapa pengujian material (*material testings*) yang berperan sebagai alat (*tools*) untuk mengkarakterisasi sifat mekanis, sifat fisis dan sifat konduktivitas listrik dari pelat bipolar yang merupakan variabel terikat dari penelitian ini. Pengujian yang dilakukan untuk melihat pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Pengujian konduktivitas listrik untuk mengkarakterisasi sifat konduktivitas listrik pelat bipolar.
- Pengujian tarik (*tensile testing*) untuk mengkarakterisasi sifat mekanis pelat bipolar.
- Pengujian tekuk (*flexural testing*) untuk mengkarakterisasi sifat mekanis pelat bipolar.

- Pengujian nilai kerapatan massa atau densitas untuk mengkarakterisasi sifat fisis pelat bipolar.
- Pengujian nilai porositas untuk mengkarakterisasi sifat fisis pelat bipolar.
- Pengamatan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) terhadap patahan hasil pengujian tekuk digunakan sebagai alat bantu untuk menganalisis metode perpatahan pelat bipolar saat mengalami pembebanan tekuk.
- Pengujian komposisi kimia dengan *Energy Dispersed Spectroscopy* (EDS) digunakan untuk mengetahui komposisi dan distribusi material dalam pelat bipolar berbasis komposit termoplastik ini.

### 3.2.3. Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol atau yang biasa disebut sebagai variabel kontrol merupakan jenis lainnya yang digunakan dalam penelitian ini. Secara umum variabel kontrol dapat didefinisikan sebagai variabel yang dikendalikan atau dibuat konstan sehingga hubungan variabel bebas terhadap variabel terikat tidak dipengaruhi oleh faktor luar yang tidak diteliti<sup>[31]</sup>. Variabel kontrol ini sering dipakai oleh peneliti dalam penelitian yang bersifat membandingkan melalui suatu penelitian eksperimental<sup>[32]</sup>.

Dalam penelitian pelat bipolar berbasis komposit termoplastik untuk aplikasi PEMFC ini digunakan beberapa jenis material atau bahan untuk memfabrikasi pelat bipolar tersebut. Dalam penelitian ini terdapat beberapa jenis material yang ditambahkan dengan komposisi yang berbeda pada tiap formulasi penelitian yang pada bagian sebelumnya dikenal sebagai variabel bebas. Selain itu juga terdapat beberapa material yang ditambahkan dengan komposisi sama pada tiap formulasi penelitian yang dikenal sebagai variabel kontrol dalam penelitian ini. Variabel kontrol yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Fraksi volume matriks polipropilena (PP).
- Fraksi volume *Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride* (PP-g-MA).
- Fraksi volume antioksidan CN-CAT A215.
- Fraksi volume penguat serat karbon Fortafil 243.
- Fraksi volume penguat grafit 4012.

### 3.3. Formulasi Penelitian

Formulasi penelitian dalam skripsi ini dilambangkan dengan huruf F, yang berarti formula. Dalam penelitian ini digunakan 3 macam formulasi penelitian dengan pengkodean sebagai berikut:

**Tabel 3.1.** Pengkodean formulasi penelitian

Pengkodean	Keterangan
F1	Formulasi Penelitian 1
F2	Formulasi Penelitian 2
F3	Formulasi Penelitian 3

Ketiga macam formulasi penelitian tersebut menggambarkan variasi kuantitas dari variabel bebas, yaitu penambahan fraksi volume penguat material *Carbon Nano Tube* (CNT) dalam komposit termoplastik sehingga dapat dianalisis efek dari variasi variabel bebas pada setiap formulasi penelitian terhadap sifat mekanis dan konduktivitas listrik dari pelat bipolar berbasis komposit termoplastik untuk aplikasi PEMFC. Komposisi dari setiap bahan baik yang merupakan variabel bebas ataupun variabel terkontrol yang digunakan pada tiap formulasi penelitian ini dapat dilihat pada bagian komposisi material.

### 3.4. Komposisi Material

Formulasi material yang digunakan untuk memfabrikasi pelat bipolar berbasis komposit termoplastik ini ditentukan berdasarkan pertimbangan parameter nilai konduktivitas listrik dan densitas dari setiap bahan yang diperoleh baik dari data pada literatur, spesifikasi yang dikeluarkan oleh produsen bahan maupun dari hasil pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan yang dilakukan pada tahapan awal dari penelitian ini. Komposisi material yang digunakan pada setiap formulasi penelitian untuk memfabrikasi pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.2.** Komposisi material pada setiap formulasi penelitian

Jenis Bahan	Satuan	F1	F2	F3
Polipropilena (PP)	%wt	13.9	13.75	13.5
	gram	69.5	68.75	67.5
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	0.1	0.25	0.5
	gram	0.5	1.25	2.5
<b>Total</b>	%wt	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
	gram	<b>500</b>	<b>500</b>	<b>500</b>

### 3.5. Material

Material atau bahan yang digunakan untuk memfabrikasi pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C- -CNT terdiri atas 6 macam bahan. Spesifikasi dari material atau bahan yang digunakan untuk memfabrikasi pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT adalah sebagai berikut:

#### 3.5.1. Polipropilena (PP)

Fabrikasi pelat bipolar berbasis komposit termoplastik menggunakan polimer termoplastik polipropilena (PP) sebagai matriksnya. Penggunaan polipropilena (PP) sebagai matriks mengacu pada penelitian fabrikasi pelat bipolar berbasis komposit termoplastik terdahulu. Matriks polipropilena (PP) dalam sistem komposit termoplastik ini berperan sebagai media pengikat dalam fabrikasi pelat bipolar dan juga sebagai media transfer tegangan dari matriks menuju material penguat (*reinforcements*). Penggunaan matriks polipropilena (PP) dalam

fabrikasi pelat bipolar ini juga berperan dalam mempengaruhi sifat mekanis, sifat fisis dan sifat konduktivitas listrik dari pelat bipolar secara umum.

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.

Secara umum sifat dari polipropilena (PP) yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel berikut ini:

**Tabel 3.3.** Sifat *Cosmoplene Polypropylene Block Copolymer* Grade AH561<sup>[33]</sup>

Sifat	Nilai
<i>Melt Flow Rate</i> (gram/10min)	3
Berat Jenis (gram/cm <sup>3</sup> )	0.9
Modulus Kelenturan (MPa)	1080
Kekuatan Tarik (MPa)	24.5
Elongasi (%)	680

Sementara karakteristik atau spesifikasi secara terperinci dari matriks polipropilena (PP) yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.4.** Spesifikasi *Cosmoplene Polypropylene Block Copolymer* Grade AH561<sup>[11]</sup>

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</i> /MFR)	3	gram/10 menit	ASTM D1238
Kerapatan massa (Densitas)	0,9	gram/cm <sup>3</sup>	ASTM D1505
Kekuatan Impak	23°C = 24,5 -20°C = 4,7	kJ/m <sup>2</sup>	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	-

Adapun jumlah massa dari polipropilena (PP) yang digunakan pada setiap formulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.5.** Jumlah Massa Polipropilena (PP) Pada Setiap Formulasi Penelitian

Formula	Persentase	Massa yang Digunakan (gram) (persentase x 500 gram)
1	13.9	69.5
2	13.75	68.75
3	13.5	67.5
<b>Total</b>		<b>205.75</b>

### 3.5.2. Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride (PP-g-MA)

*Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride* atau yang sering disingkat sebagai PP-g-MA merupakan salah satu bahan yang digunakan dalam memfabrikasi pelat bipolar berbasis komposit termoplastik ini. PP-g-MA merupakan aditif polimer yang ditambahkan dalam komposisi kecil dalam suatu fabrikasi komposit termoplastik. Sebagai suatu bahan aditif PP-g-MA berperan sebagai suatu *compactibilizer* yang menjembatani ikatan antara matriks polipropilena (PP) dengan berbagai penguat yang ada dalam sistem komposit termoplastik ini. PP-g-MA yang digunakan dalam penelitian ini berwarna kuning dan berbentuk pelet. Spesifikasi dari PP-g-MA yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.6.** Spesifikasi *Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride*(PP-g-MA)<sup>[11]</sup>

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

Adapun jumlah massa dari PP-g-MA yang digunakan pada setiap formulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.7.** Jumlah Massa PP-g-MA Pada Setiap Formulasi Penelitian

Formula	Persentase	Massa yang Digunakan (gram) (persentase x 500 gram)
1	5	25
2	5	25
3	5	25
<b>Total</b>		<b>75</b>

### 3.5.3. Serat Karbon Fortafil 243

Serat karbon merupakan salah satu jenis penguat yang digunakan dalam fabrikasi pelat bipolar berbasis komposit termoplastik. Serat karbon merupakan jenis penguat yang dapat meningkatkan sifat mekanis dan juga sifat konduktivitas listrik dari pelat bipolar. Hal ini dapat dicapai dengan mengontrol arah orientasi atau susunan dari serat karbon itu sendiri di dalam pelat bipolar. Serat karbon yang digunakan dalam penelitian ini disuplai dari produsen Fortafil Carbons. Sementara *grade* dari serat karbon yang digunakan ini adalah *Chopped Carbon Fiber Fortafil 243* dengan karakteristik warna hitam dan berbentuk seperti bubuk halus.

Spesifikasi dari *Chopped Carbon Fiber Fortafil 243* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.8.** Spesifikasi dari *Chopped Carbon Fiber Fortafil 243*<sup>[11]</sup>

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%

**Tabel 3.8.** Spesifikasi dari *Chopped Carbon Fiber Fortafil 243*<sup>[11]</sup> (lanjutan)

Densitas	1,8 gram/cm <sup>3</sup>
<i>Cross-sectional area/filament</i>	3,3 x 10 <sup>-5</sup> mm <sup>2</sup>
Diameter filamen	6 mikron
<i>Electrical resistivity</i>	1,67 miliOhm.cm
Panjang <i>fiber</i>	3 mm
Konduktivitas listrik	598 S/cm

Adapun jumlah massa dari *Chopped Carbon Fiber Fortafil 243* yang digunakan pada setiap formulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.9.** Jumlah Massa Serat Karbon Pada Setiap Formulasi Penelitian

Formula	Persentase	Massa yang Digunakan (gram) (persentase x 500 gram)
1	50	250
2	50	250
3	50	250
<b>Total</b>		<b>750</b>

#### 3.5.4. Grafit 4012

Penggunaan grafit sebagai salah satu bahan dalam memfabrikasi pelat bipolar berbasis komposit termoplastik ini didasarkan atas sifat konduktivitas listrik yang cukup tinggi dari grafit. 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. Adapun jumlah massa dari grafit 4012 yang digunakan pada setiap formulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.10.** Jumlah Massa Grafit 4012 Pada Setiap Formulasi Penelitian

Formula	Persentase	Massa yang Digunakan (gram) (persentase x 500 gram)
1	30	150
2	30	150
3	30	150
<b>Total</b>		<b>450</b>

### 3.5.5. Anti-Oksidan CN-CAT A215

Penggunaan anti-oksidan dalam proses fabrikasi pelat bipolar berbasis komposit termoplastik ini berperan sebagai agen pencegah terhadap proses degradasi yang dapat dialami pelat bipolar, khususnya degradasi akibat temperatur tinggi pada proses fabrikasi. Anti-oksidan yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis CN-CAT B125 yang merupakan produk dari China Catalyst Ltd. Anti-oksidan CN-CAT B215 merupakan hasil penggabungan dari anti oksidan A1010 dengan anti oksidan A168 dengan penambahan *chelant stabilizer*. Anti oksidan ini secara visual berwarna putih dan berbentuk serbuk halus. Spesifikasi dari anti-oksidan CN-CAT B215 yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.11.** Spesifikasi Anti-Oksidan CN-CAT B215<sup>[11]</sup>

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%

Adapun jumlah massa dari anti-oksidan CN-CAT B215 yang digunakan pada setiap formulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.12.** Jumlah Massa Anti-Oksidan Pada Setiap Formulasi Penelitian

Formula	Persentase	Massa yang Digunakan (gram) (persentase x 500 gram)
1	1	5
2	1	5
3	1	5
<b>Total</b>		<b>15</b>

### 3.5.6. CNT (*Carbon Nano Tube*)

Penggunaan *Carbon Nano Tube* (CNT) dalam fabrikasi pelat bipolar berbasis komposit termoplastik ini didasarkan atas sifat dari CNT yang memiliki nilai konduktivitas yang tinggi<sup>[34]</sup>. Spesifikasi dari *Carbon Nano Tube* (CNT) yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.13.** Spesifikasi *Carbon Nano Tube* (CNT)<sup>[35]</sup>

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 <sup>2</sup> /gram
Konduktivitas listrik ( <i>electrical conductivity</i> )	> 100 S/cm

Ukuran partikel *Carbon Nano Tube* (CNT) dalam skala nano membuat luas permukaan secara keseluruhan dari partikel *Carbon Nano Tube* (CNT) cukup

besar. Hal ini dapat meningkatkan kontak permukaan baik antara partikel CNT maupun antara partikel CNT dengan penguat lainnya dalam sistem komposit termoplastik ini. Adapun jumlah massa dari partikel CNT yang digunakan pada setiap formulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.14.** Jumlah Massa CNT Pada Setiap Formulasi Penelitian

<b>Formula</b>	<b>Persentase</b>	<b>Massa yang Digunakan (gram) (persentase x 500 gram)</b>
1	0.1	0.5
2	0.25	1.25
3	0.5	2.5
<b>Total</b>		<b>4.25</b>

### 3.6. Peralatan

Secara umum peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu peralatan preparasi sampel pengujian dan peralatan karakterisasi sampel. Penjelasan mengenai kedua kelompok peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 3.6.1. Peralatan Preparasi Sampel Pengujian

Peralatan yang digunakan dalam tahapan preparasi sampel pengujian pelat bipolar yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.15.** Peralatan Preparasi Sampel Pengujian

<b>Nama Alat</b>	<b>Spesifikasi</b>	<b>Foto Alat</b>
Neraca Massa Digital	Timbangan Digital Kapasitas 1 kg Ketelitian : 0,01 gram Lab.Metalurgi Proses DTMM FTUI	

Tabel 3.15. Peralatan Preparasi Sampel Pengujian (lanjutan)

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)	

Tabel 3.15. Peralatan Preparasi Sampel Pengujian (Lanjutan)

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	

Tabel 3.15. Peralatan Preparasi Sampel Pengujian (Lanjutan)

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	
Mesin <i>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	

Tabel 3.15. Peralatan Preparasi Sampel Pengujian (Lanjutan)

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

### 3.6.2. Peralatan Karakterisasi Sampel

Peralatan yang digunakan dalam proses karakterisasi sampel pelat bipolar yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3.16. 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)	
<i>Flexural Tester</i>	ASTM D790 (Uji Tekuk) Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK Serpong	

Tabel 3.16. Peralatan Karakterisasi Sampel (lanjutan)

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

### 3.7. Prosedur Penelitian

Prosedur atau tahapan kerja yang dilakukan dalam penelitian ini cukup bervariasi mulai dari tahapan proses kompaksi untuk pembuatan spesimen pengujian nilai konduktivitas listrik sampel bahan hingga proses karakterisasi patahan sampel pelat bipolar dengan menggunakan instrumen *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. Tahapan kerja dalam penelitian ini disusun secara sistematis sesuai dengan diagram alir penelitian yang telah dipaparkan pada bagian awal dari bab ini. Prosedur atau tahapan kerja dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 3.7.1. Kompaksi Spesimen Pengujian Awal Konduktivitas Listrik Bahan

Proses kompaksi atau *pressing* yang dilakukan pada sampel bahan, yaitu grafit, serat karbon, karbon hitam dan nano tembaga bertujuan untuk membuat bahan tersebut menjadi lebih padat dan lebih *compact* serta memiliki dimensi tertentu sehingga dapat dijadikan sebagai spesimen pengujian nilai konduktivitas listrik. Pengujian nilai konduktivitas listrik awal terhadap seluruh bahan yang akan digunakan dalam memfabrikasi pelat bipolar berbasis komposit termoplastik

ini penting dilakukan untuk mendapatkan suatu formulasi bahan yang tepat sehingga dapat dihasilkan suatu pelat bipolar dengan sifat mekanis dan sifat konduktivitas listrik yang optimal. Proses kompaksi ini sering dinamakan sebagai proses *pelletizing* karena produk yang dihasilkan dari proses ini berbentuk silinder pelet dengan diameter sekitar 1 cm. 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 pembuatan spesimen pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan dengan metode *pressing* atau *pelletizing* ini adalah sebagai berikut<sup>[36]</sup>:

1. Siapkan seluruh bahan dan peralatan yang akan digunakan.
2. Siapkan dan pasang komponen *dies pelletizing*.
3. Dengan menggunakan spatula ambil sekitar 3 spatula serat karbon fortafil 243 dan masukkan ke dalam *dies pelletizing*..
4. Tutup *dies pelletizing* dengan *dies* penekan.
5. Siapkan posisi *dies pelletizing* pada mesin *pressing*.
6. Kompak tuas mesin pompa hidrolik sehingga tekanan proses kompaksi mencapai 100 bar.
7. Setelah mencapai tekanan 100 bar tahan selama 10 menit.
8. Buang tekanan dengan memutar katup hidrolik ke arah kiri sehingga tekanan menjadi 0 bar dan *dies pressing* naik kembali ke atas.
9. Buka bagian penutup bawah *dies pelletizing*.
10. Balik posisi *dies pelletizing* pada mesin *pressing*.
11. Kompak tuas mesin *pressing* sehingga tekanan yang ada mampu mendorong *dies* pendorong pada *dies pelletizing* hingga mengeluarkan produk hasil proses kompaksi.
12. Jika *dies* pendorong telah mendorong secara optimal maka buang tekanan dengan memutar katup hidrolik ke arah kiri sehingga tekanan menjadi 0 bar dan *dies pressing* naik kembali.
13. Ambil produk hasil kompaksi.

14. Ulangi langkah yang sama seperti di atas untuk kompaksi grafit, karbon hitam dan nano tembaga.

### 3.7.2. Pengujian Konduktivitas Listrik Bahan dengan LCR Meter

Pengujian konduktivitas listrik bahan ini dilakukan dengan menggunakan alat LCR-Meter sesuai dengan standar ASTM B193. Alat ini dapat digunakan untuk mengukur sifat bahan yang meliputi induktansi, kapasistansi, dan konduktansi terhadap fungsi frekuensi<sup>[37]</sup>. Frekuensi dapat divariasikan antara 0,01 Hz sampai dengan 100 kHz. Parameter lain yang dapat diukur yaitu sudut fase terhadap fungsi frekuensi<sup>[37]</sup>.

Data yang didapatkan 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<sup>[37]</sup>:

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

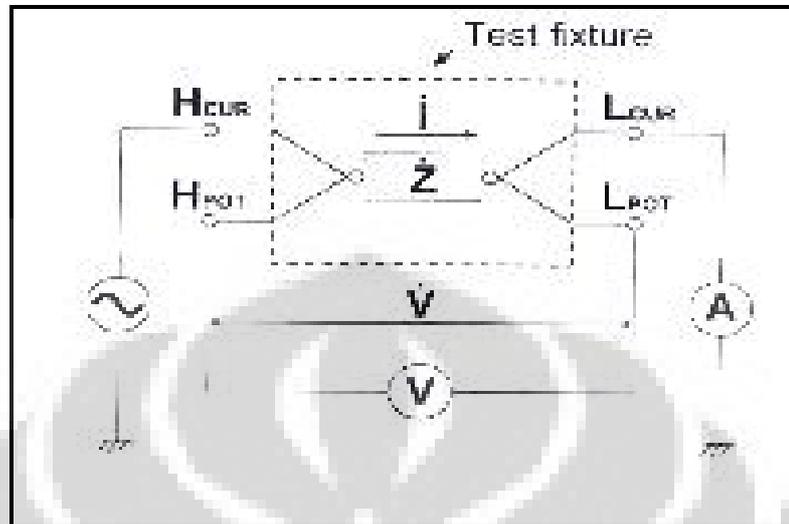
Pengujian konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis komposit termoplastik menggunakan standar ASTM D991 untuk menghitung konduktivitas dalam bidang (*in-plane*) sampel<sup>[37]</sup>. Rumus untuk menghitung nilai konduktivitas adalah sebagai berikut<sup>[37]</sup>:

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

di mana:

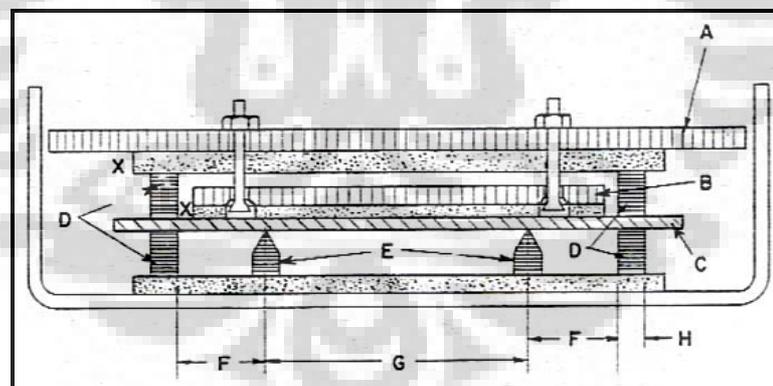
- EC → Konduktivitas listrik (S/m)
- I → Arus listrik (Ampere)
- L → Jarak antara 2 titik tumpu (26 mm)
- V → Tegangan listrik (volt)
- w → Lebar sampel (mm)
- t → Ketebalan sampel (mm)
- k → Konstanta = 0,001

Gambar di bawah ini menunjukkan prinsip pengujian konduktivitas dengan mengilustrasikan sirkuit listrik untuk menghitung konduktivitas dalam bidang (*in-plane*) sampel<sup>[37]</sup>:



**Gambar 3.4.** Prinsip Pengujian Konduktivitas Listrik Bahan

Gambar di bawah ini adalah diagram alat uji konduktivitas dalam bidang (*in-plane*) sampel. Pada gambar, tanda C adalah spesimen uji, sedangkan tanda D dan E menunjukkan elektroda arus dan tegangan<sup>[37]</sup>.



**Gambar 3.5.** Diagram Alat Uji Konduktivitas Dalam Bidang (*in-plane*) Sampel  
Berdasarkan Standarisasi ASTM D-991

Sementara prosedur pengujian nilai konduktivitas listrik bahan dengan menggunakan instrumen LCR-Meter ini adalah sebagai berikut<sup>[38]</sup>:

1. Persiapkan spesimen uji yang akan diukur nilai konduktivitas listriknya yang merupakan produk hasil tahapan proses *pelletizing*.

2. Ratakan permukaan spesimen uji dengan menggunakan kertas amplas sehingga permukaannya benar-benar rata dan datar (*flat*).
3. Setelah siap ukur diameter dan ketebalan spesimen uji.
4. Persiapkan spesimen uji yang telah diukur dimensinya untuk ditempatkan di antara dua pemegang spesimen yang terbuat dari bahan tembaga.
5. Kencangkan penjepit tersebut dengan mengencangkan keempat baut yang terdapat pada pemegang spesimen uji.
6. Sambungkan bagian pemegang spesimen uji ke terminal alat LCR-meter dengan menggunakan karbel penghubung yang telah tersedia.
7. Nyalakan alat LCR Meter dengan menekan tombol '*Power Switch*'.
8. Lakukan pengaturan parameter yang digunakan dalam pengujian antara lain batas *open circuit voltage*, batas voltase konstan, batas arus konstan, dan parameter-parameter lainnya.
9. Pengujian dilakukan dengan menggunakan frekuensi mulai dari 0,1 Hz sampai 100.000 Hz.
10. Setelah pengukuran selesai, frekuensi harus dikembalikan ke frekuensi rendah.
11. Setelah pengujian selesai, matikan alat LCR-meter dengan menekan tombol '*Power Switch*' dan melepas kabel dari alat LCR-meter.

### **3.7.3. Pengujian Konduktivitas Listrik Bahan dengan *Four Point Probe***

Pengujian lain yang dapat dilakukan untuk menentukan nilai konduktivitas listrik bahan selain dengan menggunakan LCR Meter adalah dengan menggunakan perangkat *four point probe*. Prinsip pengujian nilai konduktivitas listrik dengan metode ini sebenarnya adalah dengan memberikan suatu arus listrik dan beda potensial tertentu terhadap spesimen uji sehingga nilai resistansi listrik dari material yang diuji dapat diketahui<sup>[39]</sup>. Apabila nilai hambatan jenis dari suatu bahan diketahui maka nilai dari konduktivitas listrik bahan tersebut dapat dihitung.

Karakteristik pengujian nilai konduktivitas listrik bahan dengan perangkat *four point probe* ini cukup akurat untuk spesimen uji yang bersifat semi konduktif hingga spesimen uji yang bersifat konduktif<sup>[39]</sup>. Dalam pengujian dengan metode ini dimensi merupakan faktor yang sangat mempengaruhi hasil pengujian<sup>[39]</sup>. 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<sup>[39]</sup>. Berikut adalah tahapan kerja pengujian nilai konduktivitas listrik sampel bahan dengan metode *four point probe*<sup>[40]</sup>:

1. Siapkan bahan yang akan dilakukan pengujian nilai konduktivitas listrik dengan metode *four point probe* dan pastikan permukaan spesimen cukup rata dan datar.
2. Lakukan pengampelasan dengan *grid* halus terhadap permukaan spesimen hingga permukaannya benar-benar datar dan rata.
3. Ukur ketebalan spesimen dan catat hasilnya
4. Ukur diameter spesimen jika spesimen berbentuk lingkaran atau ukur panjang sisi spesimen jika spesimen berbentuk persegi panjang dan catat hasilnya.
5. Dengan menggunakan perekat *adhesive* berbasis *epoxy* rekatkan spesimen uji pada permukaan papan mika berbentuk persegi berukuran panjang sisi sekitar 10 cm.
6. Pastikan perekatan spesimen uji pada papan mika dilakukan secara perlahan sehingga menghasilkan kontak permukaan yang datar dan rata (*flat*).
7. Nyalakan perangkat *four point probe*.
8. Pilih modus pengukuran nilai hambatan jenis material.
9. Pilih modus kalibrasi awal.
10. Setelah instrumen siap maka letakan papan mika yang telah direkatkan spesimen uji pada *chamber* perangkat *four point probe*.
11. Masukkan nilai diameter atau panjang spesimen uji yang telah diukur.
12. Masukkan nilai ketebalan dari spesimen uji yang telah diukur.
13. Jika alat sudah siap maka tekanlah penekan pada bagian atas sehingga akan mendorong papan mika untuk tertekan ke dalam *chamber* pengujian.
14. Baca nilai hambatan jenis bahan yang tertera pada *display*. Hambatan jenis bahan yang terbaca berada pada satuan  $\Omega\text{cm}$  dan catat hasilnya.
15. Ulangi langkah di atas sehingga diperoleh 3 hasil pengujian.

16. Untuk mendapatkan nilai konduktivitas bahan maka dapat dilakukan dengan formulasi sebagai berikut:

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

di mana:

$\sigma$  → Konduktivitas listrik bahan (S/cm)

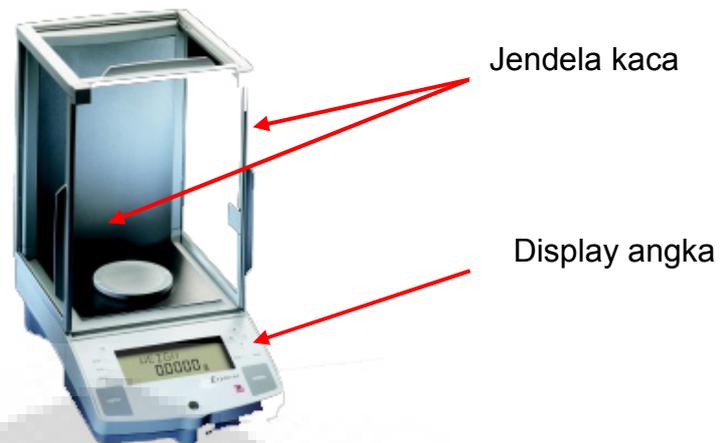
$R$  → Hambatan jenis bahan ( $\Omega\text{cm}$ )

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

#### 3.7.4. Penimbangan Bahan

Penimbangan bahan dilakukan untuk mendapatkan kuantitas yang tepat dari setiap bahan yang akan digunakan untuk memfabriaksi pelat bipolar sesuai dengan komposisi bahan untuk setiap formulasi penelitian. Penimbangan bahan dilakukan dengan menggunakan neraca massa digital dengan tingkat akurasi dan ketelitian yang cukup baik. Tahapan kerja penimbangan bahan adalah sebagai berikut<sup>[41]</sup>:

1. Hidupkan timbangan digital.
2. Buka jendela timbangan di sebelah kanan untuk memasukkan wadah tempat menimbang.
3. Letakkan cawan petri sebagai wadah menimbang pada timbangan digital
4. Nol – kan *display* angka timbangan dengan memencet tombol *re-zero*.
5. Buka jendela timbangan sebelah kiri untuk memasukkan zat ke dalam wadah timbangan. (tangan kiri memegang botol zat, tangan kanan mengambil zat dengan spatula).
6. Tutup jendela timbangan dan lihat angka pada display timbangan. Apabila kelebihan atau kekurangan buka kembali jendela kemudian tambahkan atau kurangi zat yang ditimbang. Tutup kembali jendela timbangan. Ketika menimbang pastikan tidak ada zat yang jatuh ke dalam timbangan karena sulit membersihkannya. Jangan menimbang dengan berat lebih dari 50 gram
7. Setelah selesai menimbang, matikan kembali timbangan melalui tombol OFF.



Gambar 3.6. Timbangan digital<sup>[42]</sup>

### 3.7.5. Pencampuran Kering (*Dry Mixing*) Bahan

Pencampuran kering atau *dry mixing* terhadap seluruh bahan yang digunakan untuk memfabrikasi pelat bipolar ini dilakukan setelah tahapan penimbangan bahan. 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) tidak dilibatkan dalam pencampuran kering ini namun langsung ditambahkan pada saat proses *hot blending* atau pencampuran panas bahan. Hal ini dikarenakan jumlah penguat *carbon nano tube* (CNT) yang digunakan cukup kecil dan kemungkinan akan banyak tertinggal pada wadah pencampuran kering sehingga penambahan CNT menjadi kurang optimal. Pencampuran kering (*dry mixing*) ini perlu dilakukan untuk mengoptimalkan pencampuran bahan sebelum dilakukan proses pencampuran panas (*hot blending*)<sup>[43]</sup>. Pencampuran kering (*dry mixing*) ini akan meningkatkan kontak dan interaksi antara setiap bahan sehingga dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi pada tahapan pencampuran panas (*hot blending*) selanjutnya<sup>[43]</sup>. Tahapan pencampuran kering (*dry mixing*) yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Siapkan baskom plastik ukuran besar untuk wadah pencampuran kering (*dry mixing*).
2. Masukkan pellet polipropilena (PP) yang telah ditimbang ke baskom.

3. Masukkan pellet PP-g-MA yang telah ditimbang ke baskom dan aduk rata.
4. Masukkan bubuk anti-oksidan yang telah ditimbang ke baskom dan aduk rata.
5. Masukkan grafit yang telah ditimbang ke baskom dan aduk rata.
6. Masukkan serat karbon yang telah ditimbang ke baskom dan aduk rata.
7. Pastikan proses pengadukan dan pencampuran dilakukan dengan baik sehingga tidak ada bahan yang tercecer ke luar wadah pencampuran.
8. Setelah selesai masukkan hasil proses pencampuran kering (*dry mixing*) ini ke dalam wadah plastik untuk dikondisikan terlebih dahulu sebelum proses pencampuran panas (*hot blending*).
9. Ulangi langkah tersebut di atas untuk pencampuran kering (*dry mixing*) formula 2 dan formula 3.

### 3.7.6. Pencampuran Panas (*Hot Blending*) atau *Compounding* Bahan

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<sup>[44]</sup>. Mesin ini menggunakan 2 buah *screw* yang berputar secara berlawanan di dalam suatu *chamber* yang memiliki kapasitas penuh 379 gram<sup>[44]</sup>. 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<sup>[44]</sup>. Mesin Rheomix HAAKE 3000 ini terdiri dari 3 pelat di mana pelat pertama yang stasioner, dan pelat kedua serta pelat ketiga yang dapat dilepas<sup>[44]</sup>. Pada mesin ini, *chamber* pencampuran berada pada pelat kedua yang dapat dibersihkan untuk mendapat *master batch* hasil proses *hot blending*<sup>[44]</sup>. 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 dengan menggunakan mesin Rheomix HAAKE 3000 adalah sebagai berikut<sup>[45]</sup>:

1. Periksa apakah alat dalam keadaan siap untuk digunakan.
  - Tentukan perangkat yang akan digunakan apakah *mixer* atau *extruder*.
  - Periksa/pastikan kabel-kabel *heater* telah terhubung dengan baik.
  - Periksa/pastikan kabel-kabel *thermocouple* telah terhubung dengan baik.
  - Periksa/pastikan saluran udara pendingin silinder telah terhubung dengan baik.
2. Penggunaan *mixer*:
  - Bukalah *valve* aliran udara pendingin pada saluran utama yang terletak pada dinding bawah *exhaust fan*.
  - Buka *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:
  - Pindahkan 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. Pindahkan 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. Pindahkan posisi *cursor* ke posisi "*max time*" dan kemudian tekan *enter*.
  - Ketik waktu yang dibutuhkan untuk *blending*, yaitu 15 menit dan kemudian tekan *enter*.
  - Ketik *maximum torque*, yaitu level tertinggi pada grafik yang akan tampil dan kemudian tekan *enter*.
  - Ketik *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*.
  - Ketik batasan maksimum untuk temperatur, yaitu sebesar 180°C. Hal ini diperlukan untuk menjaga agar proses pemanasan tidak melampaui temperatur proses yang telah ditentukan.
8. Pindahkan *cursor* ke posisi "*Temperature*", kemudian tekan *enter* maka akan muncul tampilan menu yang akan menjelaskan pilihan alat yang akan digunakan, yaitu:
  - *Mixer*, atau
  - *Extruder*
  - Tekan tombol M karena yang akan kita gunakan adalah *mixer*. Tekan *enter* maka akan muncul kotak dialog "*temperature zone*".
  - Tekan pada posisi *zone 1* dan tulis suhu operasi yang kita atur, yaitu sebesar 180°C dan kemudian tekan *enter*.
  - Tekan pada posisi *zone 2* dan tulis suhu operasi yang kita atur, yaitu sebesar 180°C dan kemudian tekan *enter*.
  - Tekan pada posisi *zone 3* dan tulis suhu operasi yang kita atur, yaitu sebesar 180°C dan kemudian tekan *enter*.
  - Tekan *escape* untuk kembali ke menu utama.

9. Pindahkan *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*".
  - Ketiklah 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. Pindahkan *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. Siapkan alat "*Loading Clute*" dan "*Loading Tray*" sebagai wadah atau tempat untuk memasukan material yang akan diproses ke dalam *chamber*.
  - Tempatkan *loading clute* pada *chamber* kemudian dikunci agar posisinya stabil dengan memutar tuas penguncinya searah putaran jarum jam.
  - Tempatkan 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. Angkat *loading chute* 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. Naikkan "*Floating Chamber*" sampai pada posisi di mana *pin* akan mengunci. Kemudian "OFF" kan *power heater* pada *gear box*.
20. Bukalah 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. Bukalah *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. Bersihkan 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.

### 3.7.7. *Crushing Master Batch*

Karakteristik produk hasil pencampuran panas (*hot blending*) yang dilakukan dengan Rheomix Haake 3000 berbentuk gumpalan padat atau bongkahan yang cukup keras. Kondisi sampel dalam bentuk bongkahan seperti ini tentu saja akan sangat sukar untuk dilakukan proses pencetakan panas (*hot pressing*). Untuk mengatasi permasalahan ini maka produk hasil proses pencampuran panas (*hot blending*) harus mengalami proses *crushing* terlebih dahulu sebelum dilakukan proses pencetakan spesimen pengujian tarik dan pengujian tekuk dengan metode pencetakan panas (*hot pressing*).

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*)<sup>[44]</sup>. Produk hasil proses *crushing* ini berbentuk granula dengan berbagai variasi ukuran. Adapun tahapan kerja proses *crushing* bahan ini adalah sebagai berikut<sup>[44]</sup>:

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*.

### 3.7.8. *Pencetakan Panas (Hot Pressing) dengan Compression Moulding*

Setelah proses *crushing* selesai dilakukan untuk ketiga formulasi penelitian maka selanjutnya dilakukan proses pencetakan panas (*hot pressing*)

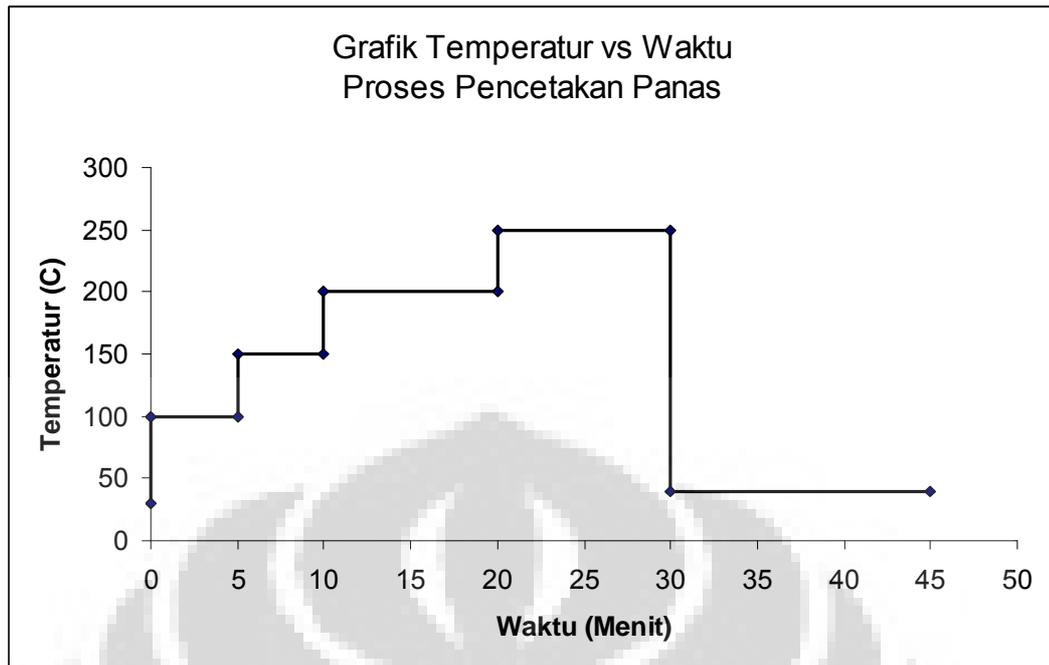
dengan metode *compression moulding* untuk mencetak sampel pelat bipolar yang selanjutnya akan dilakukan pengujian tarik dan pengujian tekuk. Proses pencetakan panas (*hot pressing*) ini dilakukan di Sentra Teknologi Polimer (STP) dengan menggunakan mesin COLLIN P300P *Hydraulic Hot Pressing*. Proses 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  $\pm 2$  mm. Sedangkan pelat tipe II diperuntukkan untuk preparasi spesimen pengujian tekuk (*flexural test*) dengan diameter pelat 14 cm dan ketebalan  $\pm 4$  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 3.17. Parameter proses pencetakan panas (*hot pressing*)

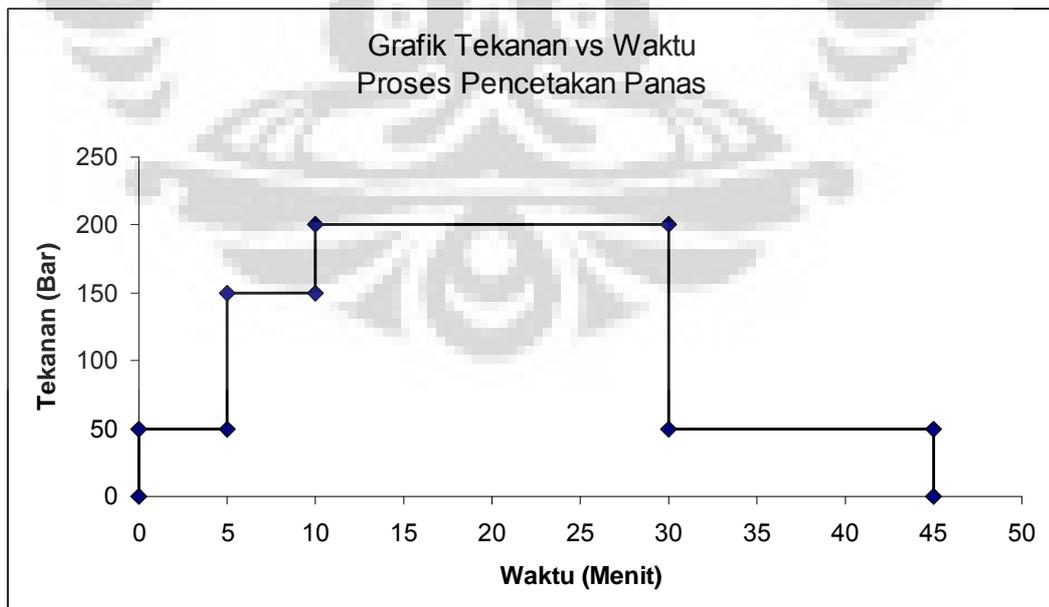
Fase	Parameter Proses		
	Temperatur (°C)	Tekanan (Bar)	Waktu (Menit)
I	100	50	5
II	150	150	5
III	200	200	10
IV	250	200	10
V	40	50	15

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 di bawah ini:



**Gambar 3.7.** 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 di bawah ini:



**Gambar 3.8.** 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 mm.
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 mm.
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*).

### 3.7.9. Preparasi Spesimen Pengujian Tarik

Setelah proses penekanan panas (*hot pressing*) maka selanjutnya pelat bipolar akan memasuki tahapan preparasi spesimen pengujian 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*).

Pada awalnya preparasi spesimen pengujian tekuk ingin dilakukan dengan standarisasi ASTM D638 Tipe IV. Namun pada saat proses *punching* dengan menggunakan cetakan (*dies*) khusus sampel selalu patah akibat tingginya kadar karbon dalam komposisi sampel. Hal ini yang menyebabkan terjadinya perubahan standarisasi preparasi spesimen pengujian tarik dari standarisasi ASTM D638 Tipe IV menjadi standarisasi ASTM D3039. Perubahan standarisasi ini hanya bertujuan untuk mempermudah proses preparasi spesimen pengujian tarik tanpa mempengaruhi keakuratan dan akuntabilitas proses pengujian tarik itu sendiri. 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.

### 3.7.10. Preparasi Spesimen Pengujian Tekuk

Selain dilakukan proses preparasi spesimen pengujian tarik, pelat bipolar hasil proses penekanan panas (*hot pressing*) selanjutnya juga akan memasuki tahapan preparasi spesimen pengujian tekuk (*flexural testing*). Pengujian kelenturan ditujukan untuk mengetahui ketahanan pelat bipolar berbasis komposit termoplastik ini terhadap mekanisme pembebanan lentur (*flexural loading*). Pada aplikasinya sebagai pelat bipolar, material komposit berbasis termoplastik ini akan mengalami pembebanan lentur sebagai akibat dari penyusunannya sebagai *fuel cell*. Proses preparasi spesimen pengujian tekuk (*flexural testing*) dilakukan

dengan menggunakan standarisasi ASTM D790 untuk preparasi spesimen pengujian tekuk berbasis material plastik.

### 3.7.11. *Conditioning* Spesimen Pengujian Tarik dan Pengujian 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*)<sup>[47]</sup>. Proses pengkondisian spesimen pengujian tarik dan spesimen pengujian tekuk ini dilakukan dalam suatu lemari pengkondisian (*conditioning chamber*) dengan parameter proses sebagai berikut:

**Tabel 3.18.** Parameter proses pengkondisian spesimen uji tarik dan uji tekuk

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

### 3.7.12. Pengujian Tarik (*Tensile Testing*)

Pengujian tarik merupakan salah satu jenis pengujian sifat mekanis yang cukup banyak dilakukan untuk mengkarakterisasi sifat mekanis dari suatu material. Hal ini dikarenakan informasi sifat mekanis yang dapat diperoleh dari suatu pengujian tarik cukup banyak seperti nilai kekuatan tarik (*tensile strength*), modulus tarik (*tensile modulus*), kekuatan luruh (*yield strength*), modulus luruh (*yield modulus*), elongasi dan lain sebagainya<sup>[48]</sup>. Secara umum tujuan utama dilakukannya pengujian tarik terhadap suatu material adalah untuk menganalisis respon atau perilaku material pada saat mengalami pembebanan mekanis<sup>[49]</sup>. Hal ini juga berarti bahwa pengujian tarik dapat mengkarakterisasi deformasi yang

dialami suatu material terhadap suatu mekanisme pembebanan statis yang diberikan serta untuk memprediksi performa atau kinerja material tersebut di bawah kondisi pembebanan mekanis tersebut<sup>[49]</sup>.

Pengujian tarik ini penting dilakukan untuk mengkarakterisasi sifat mekanis dari pelat bipolar. Hal ini dikarenakan pelat bipolar yang akan dirakit dalam suatu sistem PEMFC akan mengalami pembebanan mekanis baik pada saat instalasi dan aplikasinya di lapangan. Prinsip pengujian tarik yang dilakukan pada pelat bipolar ini sama dengan prinsip pengujian tarik material pada umumnya, yaitu spesimen atau benda uji dengan ukuran dan bentuk tertentu akan diberi pembebanan tarik secara satu arah (*uniaxial*) yang bertambah secara kontinu hingga spesimen pengujian tarik tersebut putus. Bersamaan dengan pembebanan tarik tersebut juga dilakukan pengamatan terhadap pertambahan panjang atau elongasi yang dialami spesimen pengujian tarik.

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 di bawah ini:

**Tabel 3.19.** 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

Data yang diperoleh dari pengujian tarik ini dapat dibagi atas data yang didapatkan secara manual seperti diameter spesimen untuk mengetahui luas

penampang spesimen ( $A$ ) dan data yang terekam dari *universal testing machine* yang berupa beban  $P$  yang diberikan (*load cell*) dan elongasi ( $\Delta l$ ) yang dihasilkan dari pembebanan tersebut. Beban dan elongasi ini kemudian dikonversikan ke dalam kurva tegangan-regangan berdasarkan persamaan berikut ini:

$$\text{Tegangan (stress)} = \sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.4)$$

$$\text{Regangan (strain)} = \varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (3.5)$$

Kemudian nilai tegangan dan regangan yang dihasilkan tersebut dapat dihubungkan dengan persamaan berikut:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.6)$$

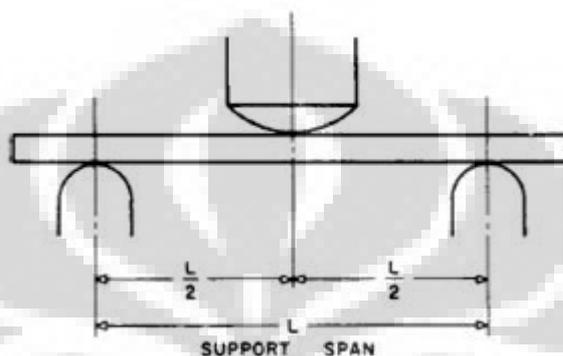
Di mana  $E$  adalah modulus elastisitas dari material yang digunakan,  $P$  adalah beban yang diaplikasikan pada material,  $A_0$  adalah luas penampang awal spesimen,  $l_0$  adalah panjang awal spesimen, dan  $l_1$  adalah panjang spesimen saat mengalami pembebanan tarik. Adapun prosedur atau tahapan 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.

### 3.7.13. Pengujian Tekuk (*Flexural Testing*)

Pengujian tekuk dilakukan untuk mengetahui ketahanan suatu material terhadap mekanisme pembebanan tekuk. Pada aplikasinya pelat bipolar akan

mengalami suatu mekanisme pembebanan tekuk sebagai akibat dari penyusunannya sebagai *fuel cell*. Pengujian tekuk ini dilakukan dengan metode *three-point bending test* yang memiliki tiga titik utama pengujian, yaitu dua titik tumpuan pada pinggir spesimen uji tekuk dan satu titik pembebanan pada bagian tengah spesimen. Selanjutnya, beban tekuk dengan kecepatan konstan diberikan kepada spesimen hingga spesimen mengalami perpatahan. Gambar di bawah ini menunjukkan skema pengujian tekuk dengan metode *three-point bending test*:



Gambar 3.9. Skema Metode *Three-Point Bending Test*<sup>[44]</sup>

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.

Pada pengujian tekuk ini, kecepatan pembebanan ( $R$ ) dihitung menurut *support span* yaitu 16 kali ketebalan sampel ( $L$ ), kecepatan peregangan spesimen ( $Z$ ), dan ketebalan sampel ( $d$ ) menggunakan persamaan berikut<sup>[44]</sup>:

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (3.7)$$

Data yang didapatkan dari pengujian tekuk ini terdiri dari modulus kelenturan, kekuatan lentur, serta beban maksimum yang dapat diterima material. Data tersebut langsung didapatkan pada komputer yang tersambung dengan mesin. Data yang terekam dari mesin uji kelenturan berupa beban  $P$  yang diberikan (*load*

cell) dan defleksi (D) yang dihasilkan<sup>[44]</sup>. Beban dan defleksi ini kemudian dikonversikan ke kurva tegangan-defleksi berdasarkan persamaan berikut<sup>[44]</sup>:

$$\text{Tegangan lentur (flexural stress)} = \sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.8)$$

$$\text{Regangan lentur (flexural strain)} = \varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (3.9)$$

Sementara untuk menghitung nilai modulus tekuk (*flexural modulus*) dari spesimen dapat digunakan persamaan berikut<sup>[44]</sup> :

$$\text{Modulus tekuk (flexural modulus)} = E_f = \frac{L^3 m}{4bd^2} \quad (3.10)$$

Di mana  $E_f$  adalah modulus kelenturan dari material yang digunakan, P adalah beban tekuk yang diterima, L adalah *support span*, b adalah lebar spesimen, d adalah ketebalan spesimen, dan m adalah sudut tangensial dari kurva tegangan-defleksi. Adapun prosedur atau tahapan pengujian tekuk yang dilakukan pada pelat bipolar ini adalah sebagai berikut<sup>[44]</sup>:

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.

#### 3.7.14. 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 ( $\rho$  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:

$$\text{Densitas sampel} = \rho_{\text{sampel}} = \frac{M_u}{M_a} \rho_{\text{air}} \quad (3.11)$$

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

$$\% \text{Porositas} = \frac{\rho_{\text{teoritis}} - \rho_{\text{percobaan}}}{\rho_{\text{teoritis}}} \times 100\% \quad (3.12)$$

Di mana:

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

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

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

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

### 3.7.15. Pengujian Konduktivitas Listrik Sampel dengan *Four Point Probe*

Prinsip pengujian nilai konduktivitas listrik dengan metode *four point probe* ini sebenarnya adalah dengan memberikan suatu arus listrik dan beda potensial tertentu terhadap spesimen uji sehingga nilai resistansi listrik dari material yang diuji dapat diketahui<sup>[39]</sup>. Apabila nilai hambatan jenis dari suatu bahan diketahui maka nilai dari konduktivitas listrik bahan tersebut dapat dihitung.

Dalam pengujian dengan metode ini dimensi merupakan faktor yang sangat mempengaruhi hasil pengujian<sup>[39]</sup>. 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<sup>[39]</sup>. Berikut adalah tahapan kerja pengujian nilai konduktivitas listrik sampel bahan dengan metode *four point probe*<sup>[40]</sup>:

1. Siapkan sampel pelat bipolar yang akan dilakukan pengujian nilai konduktivitas listrik dengan metode *four point probe* dan pastikan permukaan spesimen cukup rata dan datar.
2. Lakukan pengampelasan dengan *grid* halus terhadap permukaan spesimen hingga permukaannya benar-benar datar dan rata.
3. Ukur ketebalan spesimen dan catat hasilnya
4. Ukur diameter spesimen jika spesimen berbentuk lingkaran atau ukur panjang sisi spesimen jika spesimen berbentuk persegi panjang dan catat hasilnya.

5. Dengan menggunakan perekat *adhesive* berbasis *epoxy* rekatkan spesimen uji pada permukaan papan mika berbentuk persegi berukuran panjang sisi sekitar 10 cm.
6. Pastikan perekatan spesimen uji pada papan mika dilakukan secara perlahan sehingga menghasilkan kontak permukaan yang datar dan rata (*flat*).
7. Nyalakan perangkat *four point probe*.
8. Pilih modulus pengukuran nilai hambatan jenis material.
9. Pilih modulus kalibrasi awal.
10. Setelah instrumen siap maka letakan papan mika yang telah direkatkan spesimen uji pada *chamber* perangkat *four point probe*.
11. Masukkan nilai diameter atau panjang spesimen uji yang telah diukur.
12. Masukkan nilai ketebalan dari spesimen uji yang telah diukur.
13. Jika alat sudah siap maka tekanlah penekan pada bagian atas sehingga akan mendorong papan mika untuk tertekan ke dalam *chamber* pengujian.
14. Baca nilai hambatan jenis bahan yang tertera pada *display*. Hambatan jenis bahan yang terbaca berada pada satuan  $\Omega\text{cm}$  dan catat hasilnya.
15. Ulangi langkah di atas sehingga diperoleh 3 hasil pengujian.
16. Untuk mendapatkan nilai konduktivitas bahan maka dapat dilakukan dengan formulasi sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{1}{R} \quad (3.12)$$

di mana:

$\sigma$  → Konduktivitas listrik bahan (S/cm)

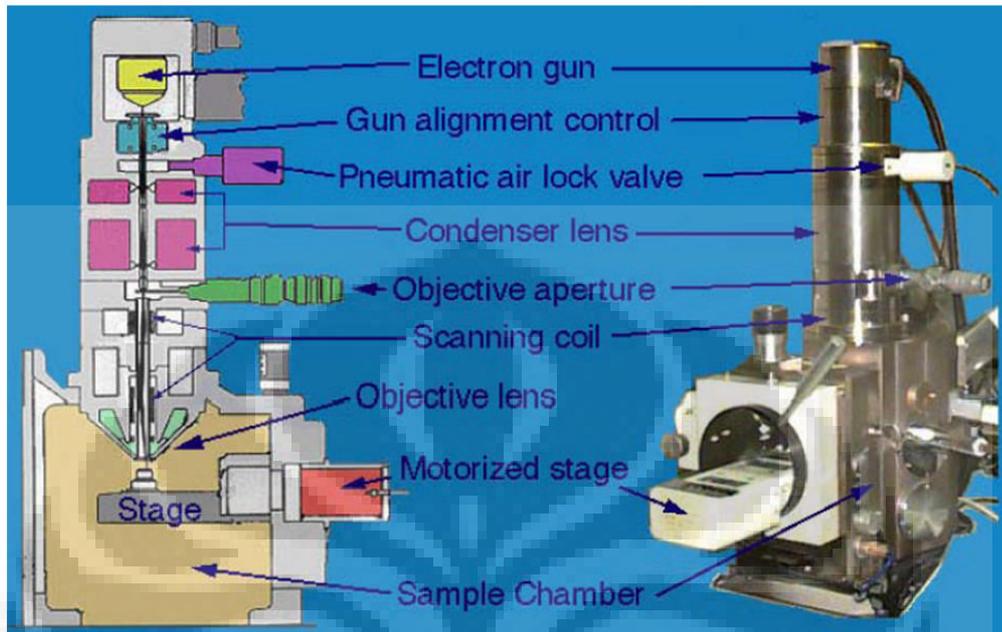
$R$  → Hambatan jenis bahan ( $\Omega\text{cm}$ )

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

### 3.7.16. Karakterisasi Morfologi Patahan Tekuk dengan SEM dan EDS

Karakterisasi terhadap 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). Sebelum dilakukan pengujian SEM, spesimen patahan hasil

pengujian tekuk pelat bipolar terlebih dahulu dilapisi dengan emas (Au). Prosedur ini bertujuan agar bersifat spesimen bersifat konduktif sehingga spesimen tersebut dapat menghantarkan elektron<sup>[50]</sup>.



Gambar 3.10. Scanning Electron Microscope (SEM)<sup>[51]</sup>

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 spesimn 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)<sup>[52]</sup>. 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 Awal Nilai Konduktivitas Listrik Bahan

Pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan terhadap bahan serat karbon, grafit dan karbon hitam. 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 dan karbon hitam. 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. Adapun hasil pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

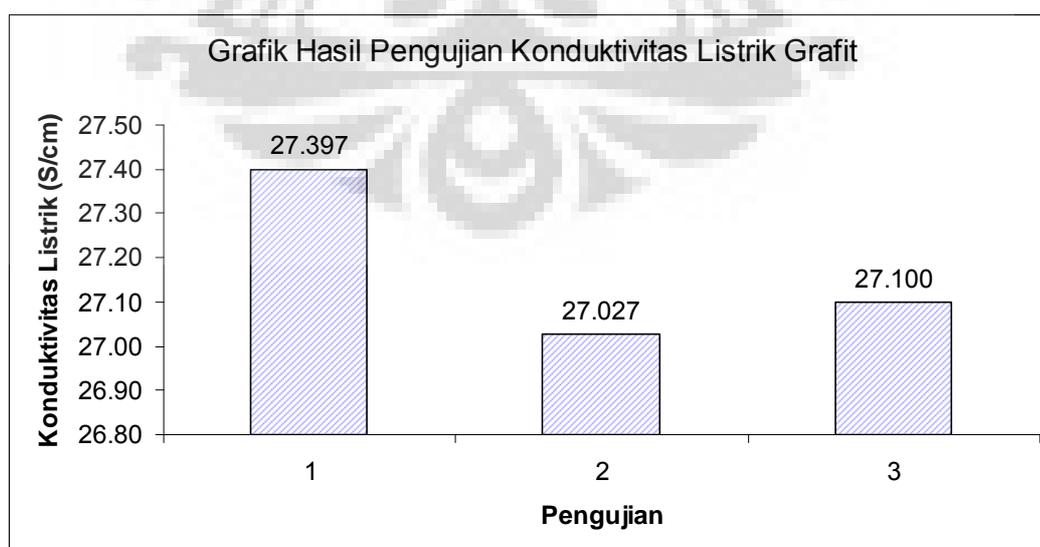
**Tabel 4.1.** Hasil Uji Konduktivitas Listrik Bahan dengan LCR Meter

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

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 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*. Adapun hasil pengujian nilai konduktivitas listrik untuk sampel bahan grafit ini dapat dilihat pada tabel dan grafik di bawah ini:

**Tabel 4.2.** 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
		<b>Rataan</b>	<b>27.175</b>	<b>S/cm</b>



**Gambar 4.1.** Grafik Hasil Uji Konduktivitas Listrik Grafit

#### 4.2. Hasil Proses *Hot Blending/Compounding* Bahan

Proses fabrikasi pelat bipolar dalam penelitian ini diawali dengan proses penimbangan masing-masing bahan yang digunakan sesuai dengan formulasi penelitian. Selanjutnya seluruh bahan akan memasuki tahapan proses pencampuran kering (*dry mixing*) dalam suatu wadah. Proses pencampuran kering (*dry mixing*) ini penting dilakukan agar seluruh bahan telah tercampur secara merata terlebih dahulu sebelum dilakukan proses pencampuran panas atau *hot blending/compounding*. 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 di bawah ini:



**Gambar 4.2.** *Master Batch* Hasil Proses Pencampuran Panas (*Hot Blending*)

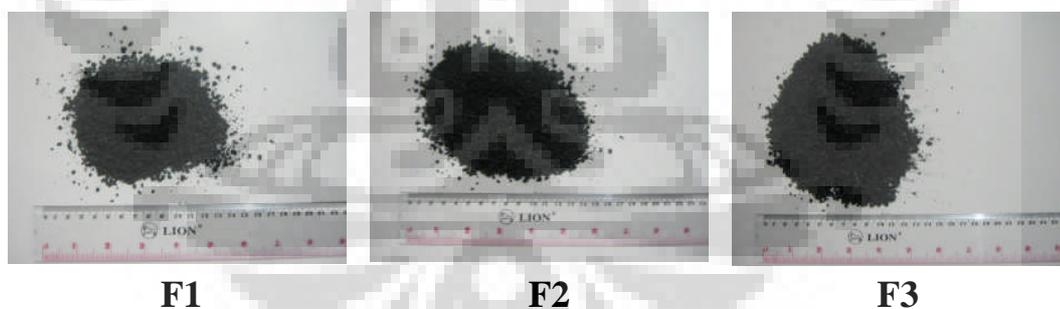
Dari hasil pengamatan secara visual dapat dilihat bahwa *master batch* yang dihasilkan dari ketiga formula tersebut memiliki bentuk yang sama, yaitu berupa gumpalan padat dengan morfologi tidak rata dan berwarna hitam pekat. Gumpalan padat ini terbentuk dari proses pencampuran panas seluruh bahan yang meliputi PP, PP-g-MA, serat karbon, grafit, anti-oksidan dan CNT. Pencampuran atau penggabungan seluruh bahan ini dapat terjadi karena bahan polimer yang terdiri atas matriks polipropilena (PP) dan PP-g-MA yang terdapat pada komposisi bahan meleleh (*melting*) pada saat proses pencampuran bahan dengan menggunakan mesin Rheomix pada temperatur proses 180°C.

Proses pencampuran atau penggabungan seluruh bahan ini juga dapat terjadi karena mesin Rheomix yang memiliki mekanisme kerja dengan cara melelehkan polimer dan mencampur seluruh bahan bahan di dalam *chamber*

mesin dengan menggunakan gaya putar oleh *screw* yang terbuat dari bahan *stainless steel*, maka lelehan polimer juga akan terdistribusi secara merata di seluruh bagian *chamber* Rheomix selama proses pencampuran panas (*hot blending*) berlangsung. Permasalahan umum yang sering terjadi pada proses pencampuran panas ini adalah adanya *master batch* yang menempel pada *screw* mesin rheomix dan menyebabkan permasalahan dalam proses pembersihan *chamber* mesin Rheomix.

#### 4.3. Hasil Proses *Crushing Master Batch*

Tahapan selanjutnya dalam fabrikasi pelat bipolar setelah proses pencampuran panas (*hot blending*) terhadap seluruh bahan adalah proses *crushing* yang dilakukan terhadap *master batch*. 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 di bawah ini:

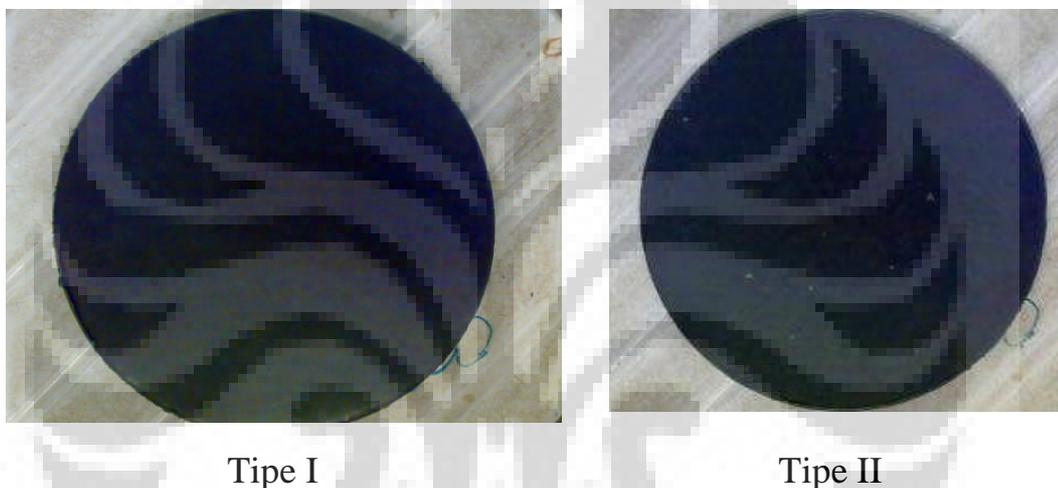


Gambar 4.3. Pellet atau Granula Hasil Proses *Crushing*

Dari hasil pengamatan secara visual terhadap pellet komposit, terlihat bahwa pellet komposit tersebut berbentuk serpihan atau granula dengan morfologi permukaan cukup kasar dan memiliki ukuran yang berbeda-beda. Dari ketiga formula yang digunakan, yaitu F1, F2 dan F3 ternyata pellet atau granula komposit yang dihasilkan memiliki bentuk dan warna yang hampir sama.

#### 4.4. 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  $\pm 2$  mm. Sedangkan pelat tipe II diperuntukkan untuk preparasi spesimen pengujian tekuk (*flexural test*) dengan diameter pelat 14 cm dan ketebalan  $\pm 4$  mm. Pelat hasil proses pencetakan panas (*hot pressing*) untuk kedua macam tipe pelat tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



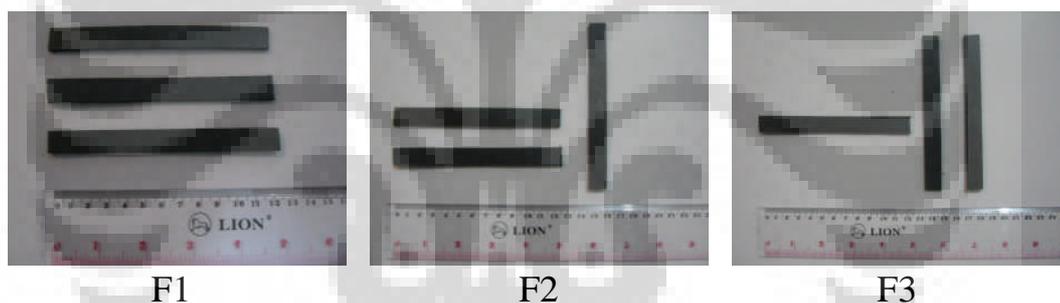
**Gambar 4.4.** Pelat Hasil Proses *Hot Pressing*

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. Pelat hasil proses pencetakan panas untuk formula F1, F2 dan F3 baik untuk pelat tipe I maupun tipe II secara umum hampir sama karena parameter proses pencetakan panas untuk setiap formula tersebut sama dan komposisi bahan dalam setiap formula juga hampir sama. Secara umum proses pencetakan panas (*hot pressing*) untuk pelat bipolar ini dapat dikatakan cukup berhasil sehingga menghasilkan pelat bipolar dengan cukup baik. Hal ini dapat terjadi karena parameter proses pencetakan panas yang terdiri atas temperatur, waktu dan tekanan proses telah

dirancang dengan cukup baik. Selain itu sebelum proses pencetakan panas dimulai terlebih dahulu cetakan (*mold*) dilumasi oleh suatu pelumas (*wax*). Operator yang mengoperasikan mesin *hot pressing* ini juga cukup hati-hati dan terampil dalam mengeluarkan pelat hasil *hot pressing* dari cetakan (*mold*). Sementara tingkat kekasaran permukaan pelat untuk formula F1, F2 dan F3 cukup seragam dengan tingkat kekasaran menengah.

#### 4.5. Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Tarik

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



Gambar 4.5. Spesimen Pengujian Tarik Pelat Bipolar

#### 4.6. Hasil Pengujian Tarik (*Tensile Testing*) Pelat Bipolar

Setelah spesimen pengujian tarik pelat bipolar dipreparasi dengan menggunakan mesin *compression moulding* dan pemotongan sehingga diperoleh 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

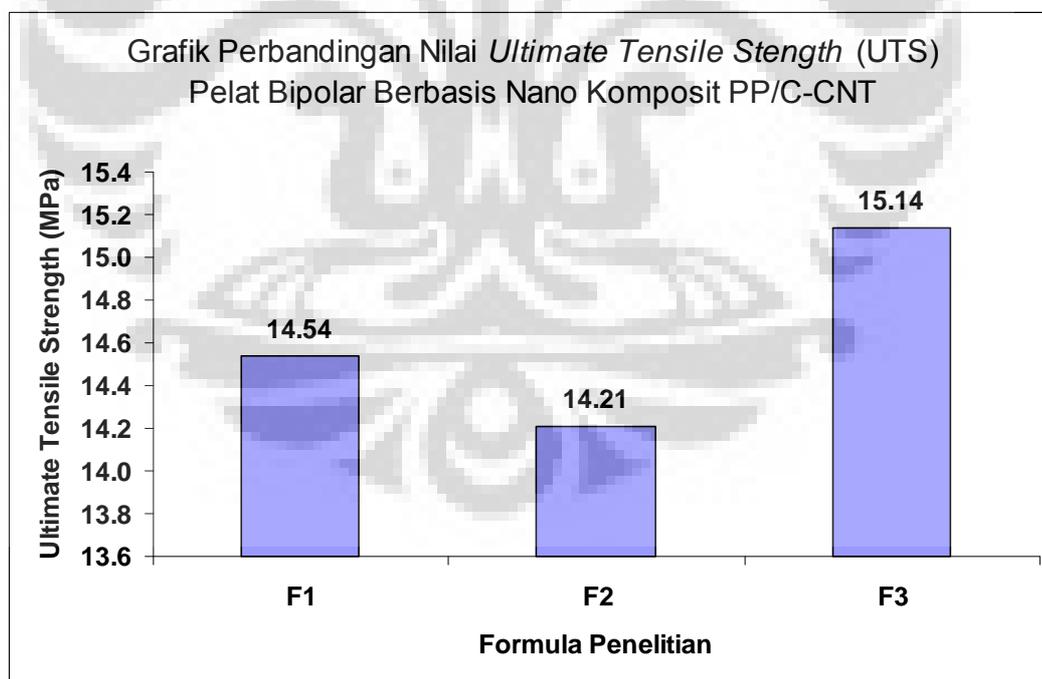
pengujian tarik ini diperoleh dua parameter penting yang berhubungan dengan sifat mekanis pelat bipolar, yaitu *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dan elongasi saat perpatahan (*Elongation at Break*).

Nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) yang diperoleh dari hasil pengujian tarik sampel pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.3.** Nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) Pelat Bipolar

Formula	<i>Ultimate Tensile Strength</i> (UTS)	Toleransi	Satuan
F1	14.54	±3.54	MPa
F2	14.21	±2.26	MPa
F3	15.14	±3.72	MPa

Sementara grafik yang menunjukkan perbandingan nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) sampel pelat bipolar untuk ketiga formulasi penelitian adalah sebagai berikut:



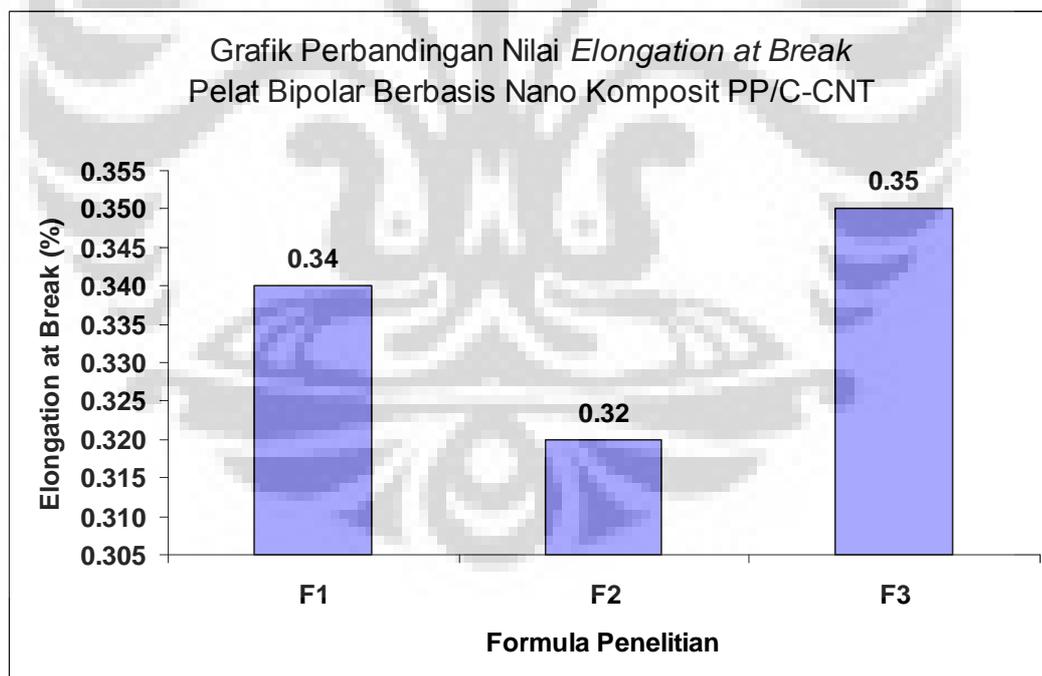
**Gambar 4.6.** Grafik Perbandingan Nilai *Ultimate Tensile Strength* Pelat Bipolar

Nilai elongasi saat perpatahan (*Elongation at Break*) yang diperoleh dari hasil pengujian tarik sampel pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.4.** Nilai *Elongation at Break* Pelat Bipolar

Formula	<i>Elongation at Break</i>	Toleransi	Satuan
F1	0.34	$\pm 0.06$	%
F2	0.32	$\pm 0.03$	%
F3	0.35	$\pm 0.05$	%

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



**Gambar 4.7.** Grafik Perbandingan Nilai *Elongation at Break* Pelat Bipolar

Pelat bipolar yang telah mengalami pengujian tarik (*tensile testing*) tentu akan mengalami perpatahan pada akhir pengujian. Patahan pelat bipolar hasil pengujian tarik dapat dilihat pada gambar di bawah ini:

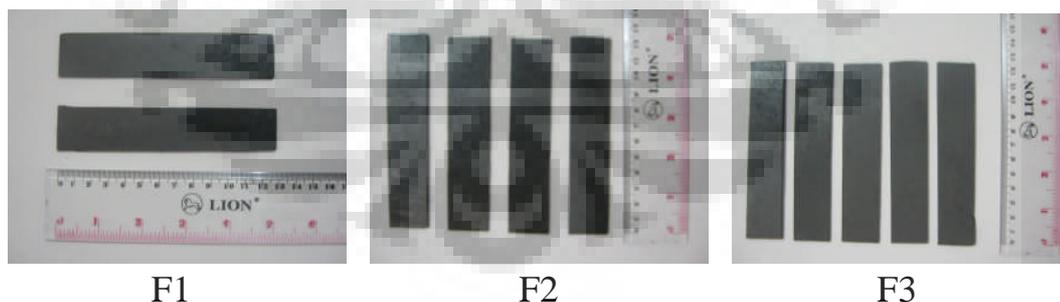


**Gambar 4.8.** Patahan Pelat Bipolar Hasil Pengujian Tarik

Perpatahan pelat bipolar hasil pengujian tarik untuk ketiga formula penelitian terjadi pada bagian tengah dari spesimen pengujian tarik. Melihat lokasi perpatahan hasil pengujian tarik dari pelat bipolar ini dapat dikatakan bahwa preparasi spesimen pengujian tarik sudah cukup baik sehingga menghasilkan data hasil pengujian tarik yang cukup representatif dan cukup valid.

#### 4.7. Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Tekuk

Proses preparasi spesimen pengujian tekuk (*flexural testing*) 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 di bawah ini:



**Gambar 4.9.** Spesimen Pengujian Tekuk Pelat Bipolar

#### 4.8. Hasil Pengujian Tekuk (*Flexural Testing*) Pelat Bipolar

Pengujian tekuk dilakukan yang dilakukan terhadap pelat bipolar bertujuan untuk mengetahui ketahanan pelat bipolar tersebut terhadap mekanisme pembebanan tekuk. 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%.

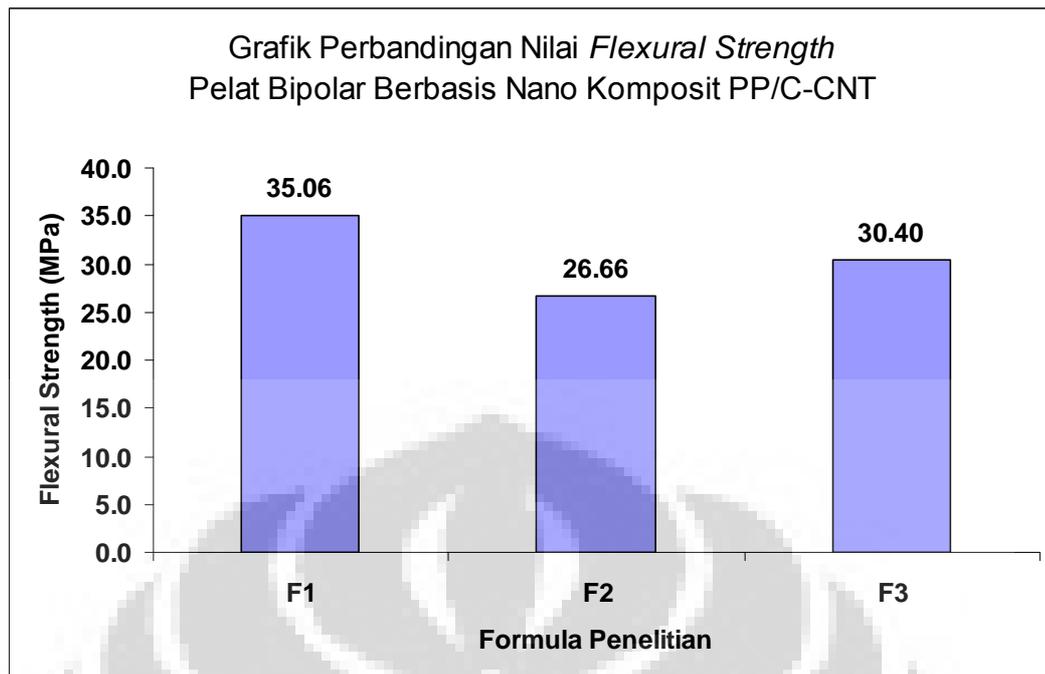
Pengujian tekuk (*flexural testing*) yang dilakukan terhadap pelat bipolar ini akan menghasilkan dua parameter penting yang berhubungan dengan sifat mekanis dari pelat bipolar tersebut. Kedua parameter tersebut adalah nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) dan nilai modulus elastisitas (*modulus of elasticity*).

Nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) yang diperoleh dari hasil pengujian tekuk (*flexural testing*) spesimen pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.5.** Nilai Kekuatan Tekuk (*Flexural Strength*) Pelat Bipolar

<b>Formula</b>	<b><i>Flexural Strength</i></b>	<b>Toleransi</b>	<b>Satuan</b>
<b>F1</b>	35.06	±2.31	MPa
<b>F2</b>	26.66	±2.96	MPa
<b>F3</b>	30.40	±2.39	MPa

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



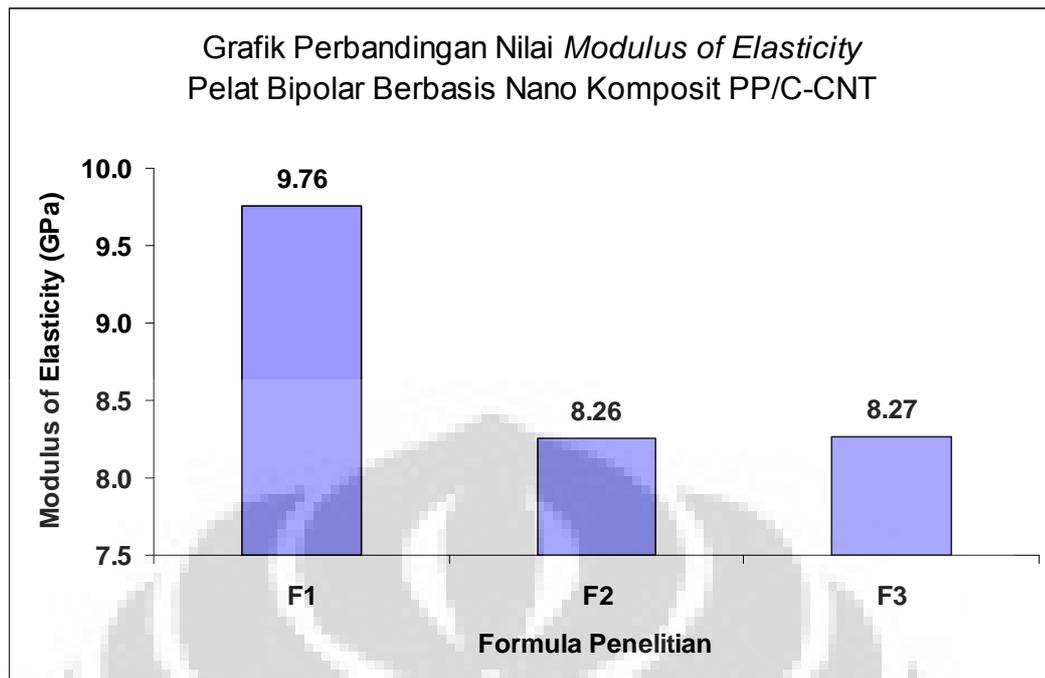
**Gambar 4.10.** Grafik Perbandingan Nilai Kekuatan Tekuk Pelat Bipolar

Nilai modulus elastisitas (*modulus of elasticity*) yang diperoleh dari hasil pengujian tekuk (*flexural testing*) spesimen pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.6.** Nilai Modulus Elastisitas (*Modulus of Elasticity*) Pelat Bipolar

Formula	<i>Modulus of Elasticity</i>	Toleransi	Satuan
F1	9.76	$\pm 1.55$	GPa
F2	8.26	$\pm 1.41$	GPa
F3	8.27	$\pm 1.07$	GPa

Sementara grafik yang menunjukkan perbandingan nilai modulus elastisitas (*modulus of elasticity*) dari spesimen pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian adalah sebagai berikut:



**Gambar 4.11.** Grafik Perbandingan Nilai Modulus Elastisitas Pelat Bipolar

Pelat bipolar yang telah mengalami pengujian tekuk (*flexural testing*) tentu akan mengalami perpatahan pada akhir pengujian. Patahan pelat bipolar hasil pengujian tekuk tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini:

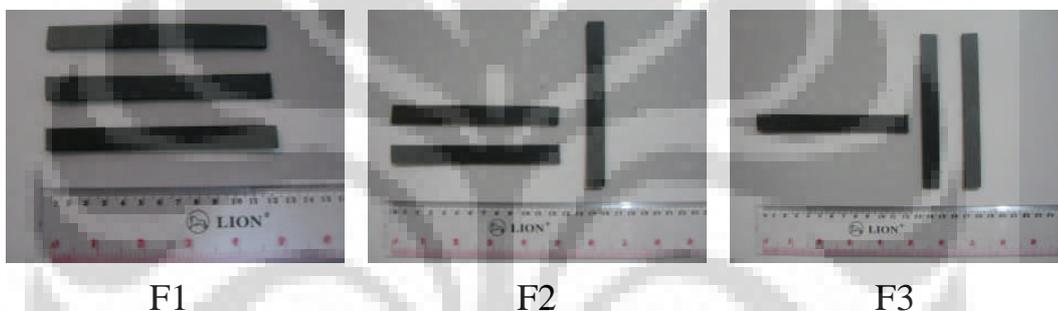


**Gambar 4.12.** Patahan Pelat Bipolar Hasil Pengujian Tekuk

#### **4.9. Hasil Preparasi Spesimen 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 Laboratorium Kimia Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan (P3TKEBT) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Sebelum dilakukan pengujian densitas dan porositas ini maka sampel pelat bipolar perlu dipreparasi terlebih dahulu. Preparasi spesimen pengujian densitas dan porositas ini dilakukan dengan menggunakan sisa spesimen pengujian tarik yang tidak terpakai dalam pengujian tarik. 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 di bawah ini:



**Gambar 4.13.** Spesimen Pengujian Densitas dan Porositas Pelat Bipolar

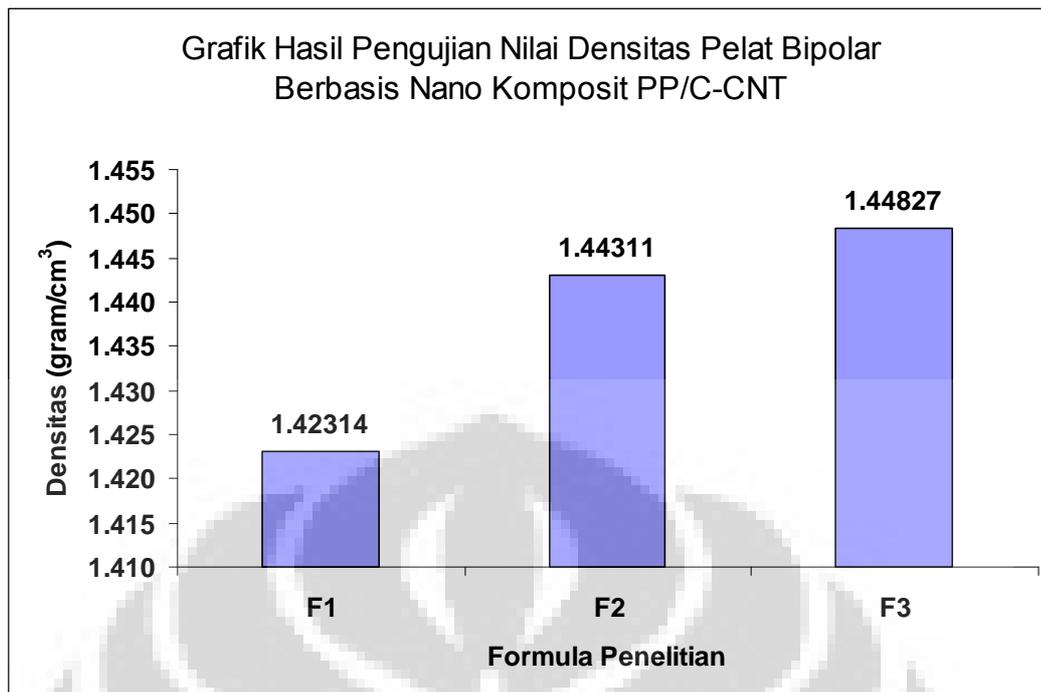
#### 4.10. Hasil Pengujian Densitas Pelat Bipolar

Hasil pengujian densitas terhadap pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 4.7.** Hasil Pengujian Densitas Pelat Bipolar

Formula	Densitas	Satuan
<b>F1</b>	1.42314	gram/cm <sup>3</sup>
<b>F2</b>	1.44311	gram/cm <sup>3</sup>
<b>F3</b>	1.44827	gram/cm <sup>3</sup>

Sementara grafik perbandingan nilai densitas pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 4.14.** Grafik Perbandingan Nilai Densitas Pelat Bipolar

#### 4.11. 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. Nilai densitas teoritis pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 4.8.** Nilai Densitas Teoritis Pelat Bipolar

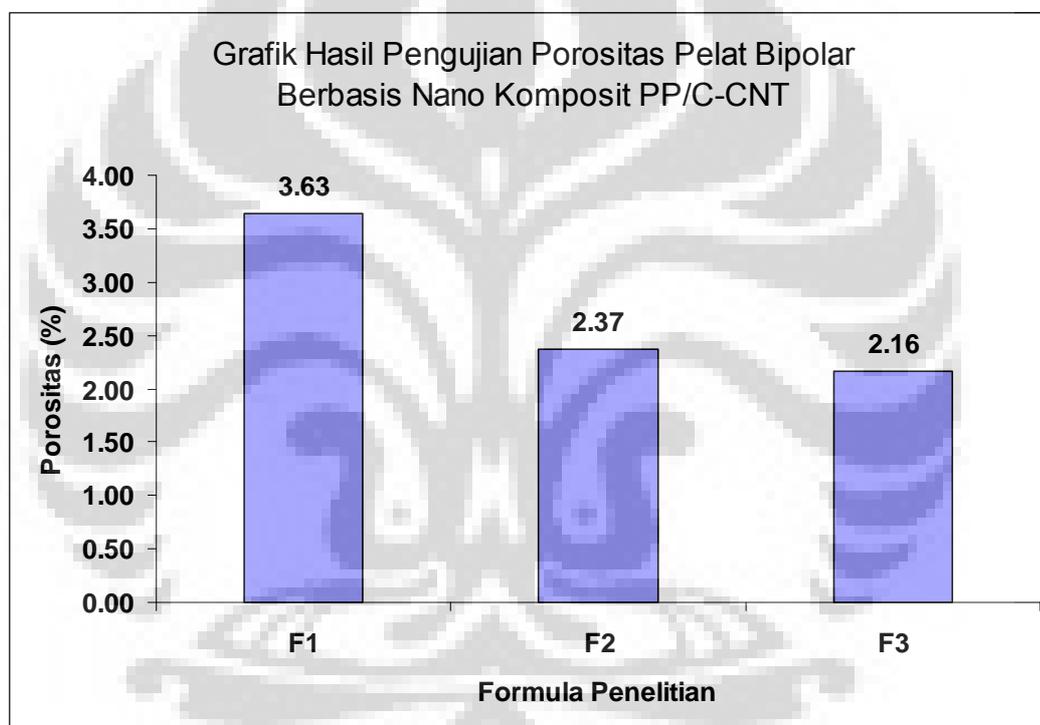
Formulasi	$\rho$ teoritis	Satuan
<b>F1</b>	1.4768	gram/cm <sup>3</sup>
<b>F2</b>	1.4781	gram/cm <sup>3</sup>
<b>F3</b>	1.4802	gram/cm <sup>3</sup>

Hasil pengujian porositas terhadap pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 4.9.** Hasil Pengujian Porositas Pelat Bipolar

Formulasi	Porositas	Satuan
F1	3.63	%
F2	2.37	%
F3	2.16	%

Sementara grafik perbandingan nilai porositas pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada gambar di bawah ini:

**Gambar 4.15.** Grafik Perbandingan Nilai Porositas Pelat Bipolar

#### 4.12. Hasil Preparasi Spesimen Pengujian Konduktivitas Listrik

Pengujian konduktivitas listrik terhadap spesimen pelat bipolar dilakukan dengan 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. 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<sup>[39]</sup>. Spesimen pengujian konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 4.16.** Spesimen Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar

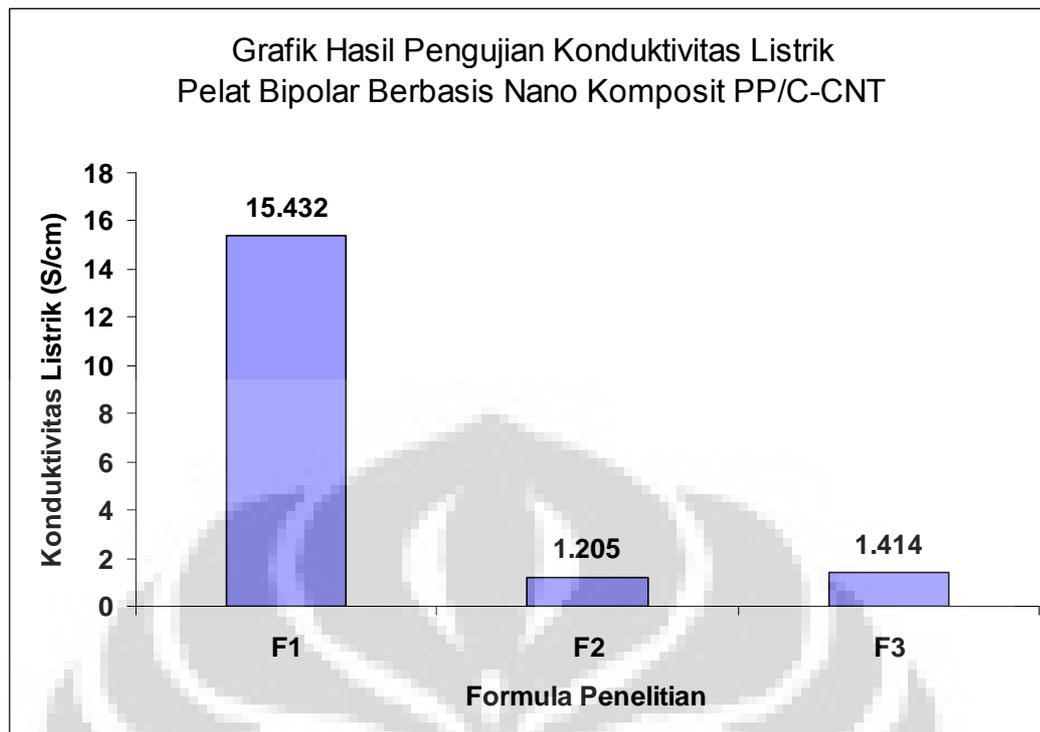
#### 4.13. Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar

Hasil pengujian konduktivitas listrik terhadap pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT untuk ketiga formula penelitian dilakukan di Pusat Penelitian Fisika (P2F) LIPI dan dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 4.10.** Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar

Formula	Konduktivitas Listrik	Satuan
F1	15.432	S/cm
F2	1.205	S/cm
F3	1.414	S/cm

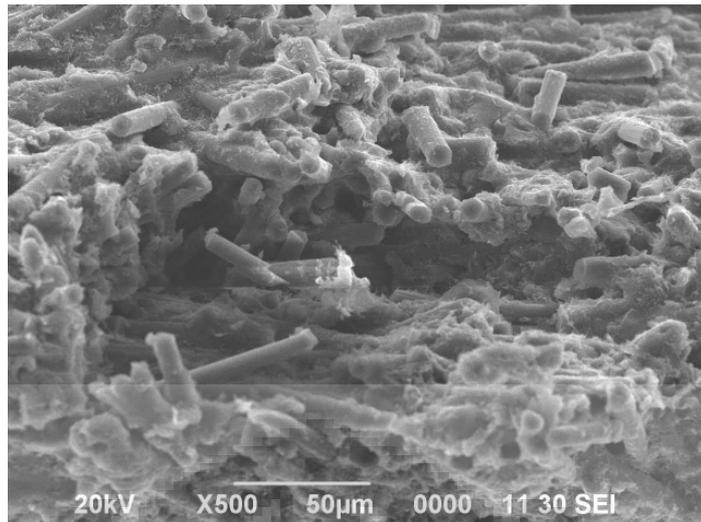
Sementara grafik perbandingan nilai konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



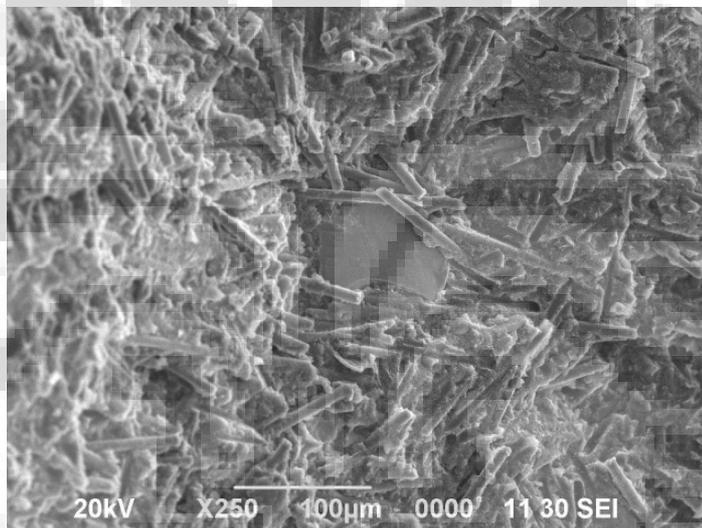
**Gambar 4.17.** Grafik Perbandingan Nilai Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar

#### 4.14. Hasil Pengamatan Morfologi Patahan Pelat Bipolar dengan SEM

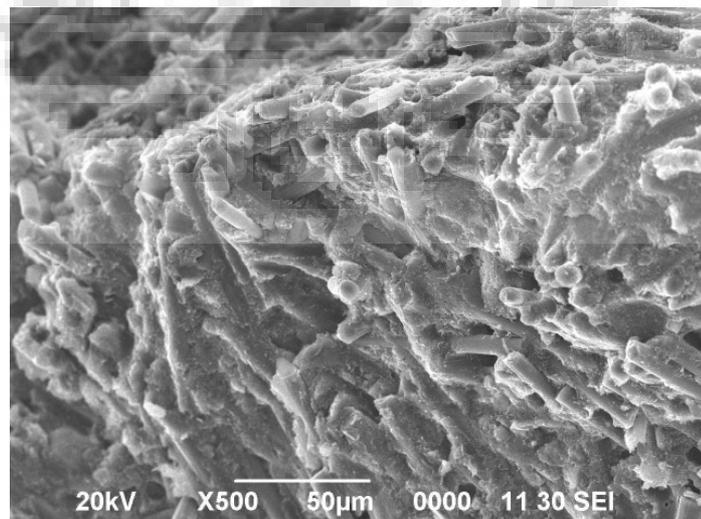
Pengamatan morfologi patahan hasil pengujian tekuk pelat bipolar dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pengujian ini dilakukan di Pusat Penelitian Metalurgi (P2M) Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). Pengamatan morfologi patahan hasil pengujian tekuk pelat bipolar hanya 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 *carbon nanotubes* (CNT) dengan perbesaran cukup tinggi, yaitu sekitar 50000x. Hasil pengamatan patahan tekuk pelat bipolar dengan SEM didokumentasikan dalam bentuk pencitraan foto. Foto hasil pengamatan patahan tekuk dengan SEM secara lengkap dapat dilihat pada lampiran skripsi ini. Hasil pengamatan patahan tekuk dengan SEM dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



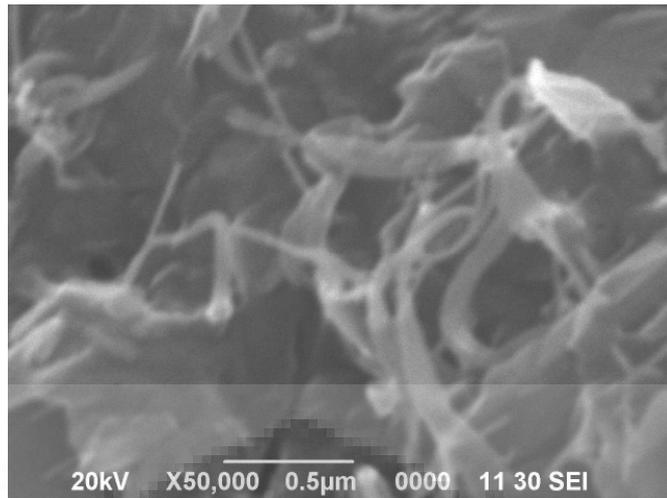
**Gambar 4.18.** Morfologi Patahan Tekuk F1 Titik 1 Perbesaran 500x



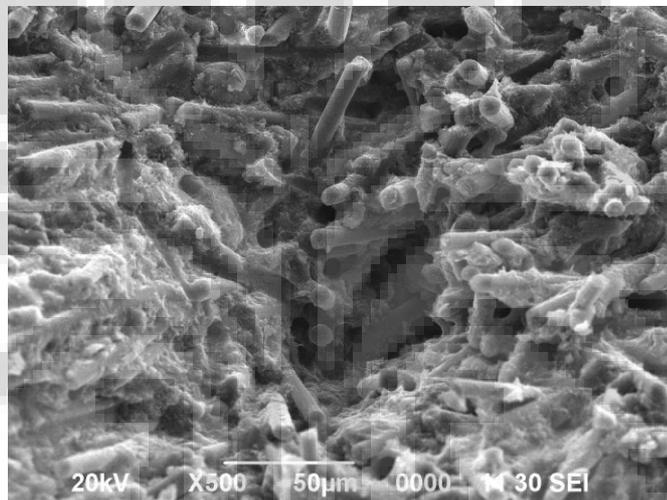
**Gambar 4.19.** Morfologi Patahan Tekuk F1 Titik 2 Perbesaran 250x



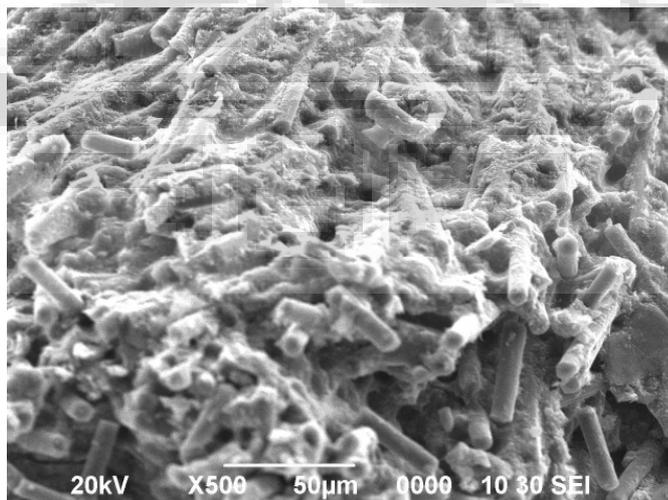
**Gambar 4.20.** Morfologi Patahan Tekuk F1 Titik 3 Perbesaran 500x



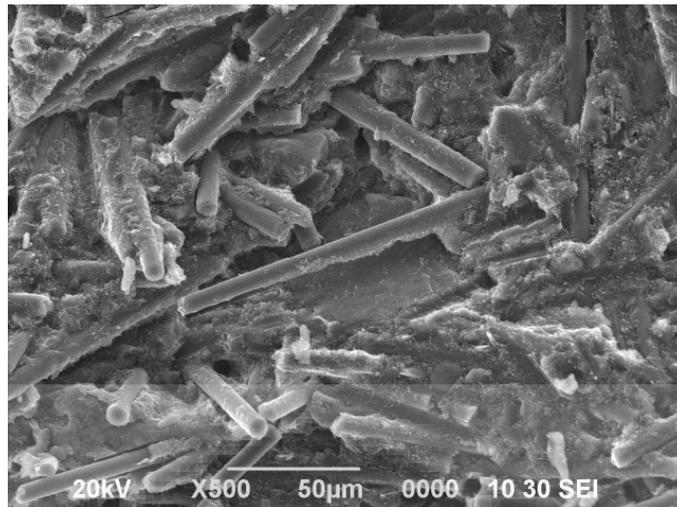
**Gambar 4.21.** Pengamatan CNT Pada F1 Perbesaran 50000x



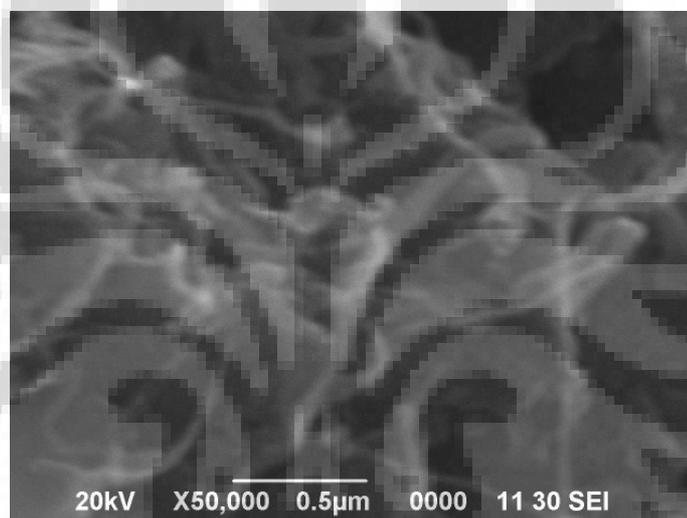
**Gambar 4.22.** Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 1 Perbesaran 500x



**Gambar 4.23.** Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 2 Perbesaran 500x



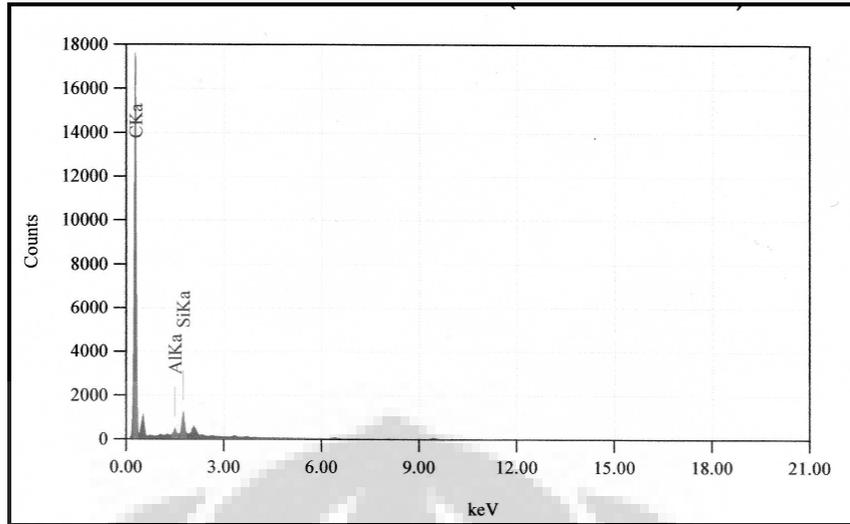
**Gambar 4.24.** Morfologi Patahan Tekuk F2 Titik 3 Perbesaran 500x



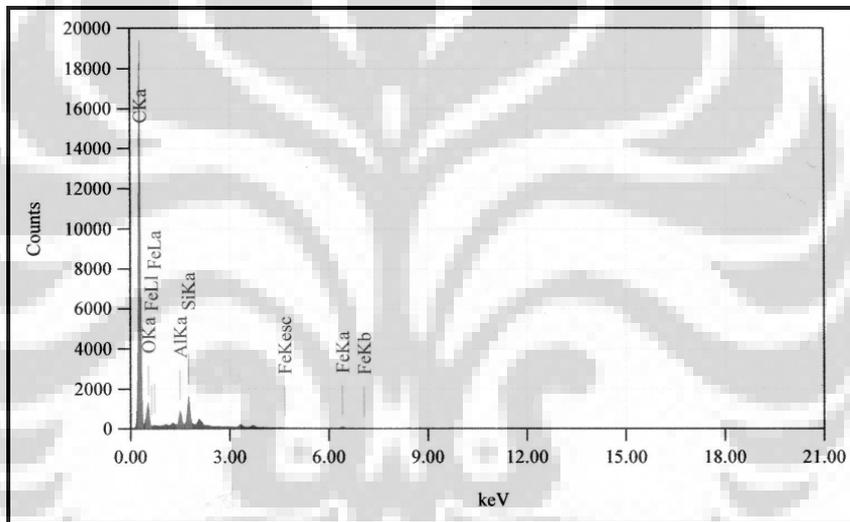
**Gambar 4.25.** Pengamatan CNT Pada F2 Perbesaran 50000x

#### 4.15. Hasil Pengujian EDS Pelat Bipolar

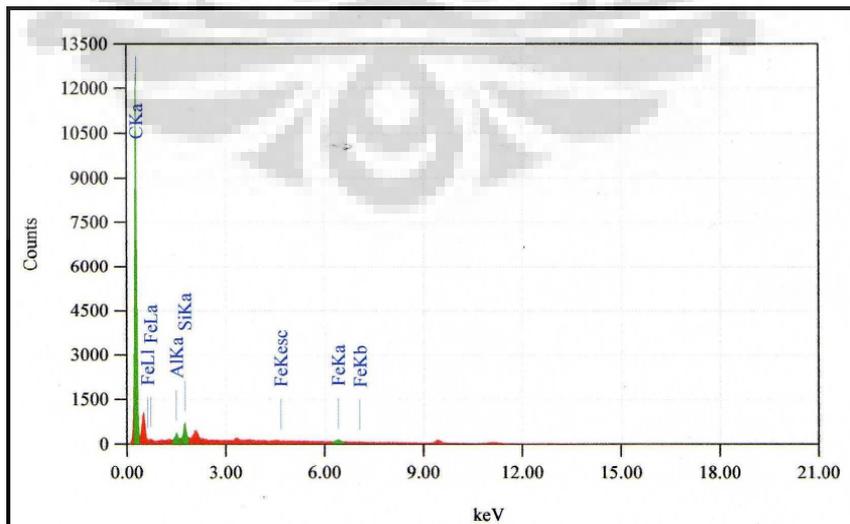
Pengujian *Energy Dispersed Spectroscopy* (EDS) terhadap pelat bipolar dilakukan bersamaan dengan pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hal ini dapat dilakukan karena instrumen SEM yang dimiliki oleh Pusat Penelitian Metalurgi (P2M) Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) juga dilengkapi 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:



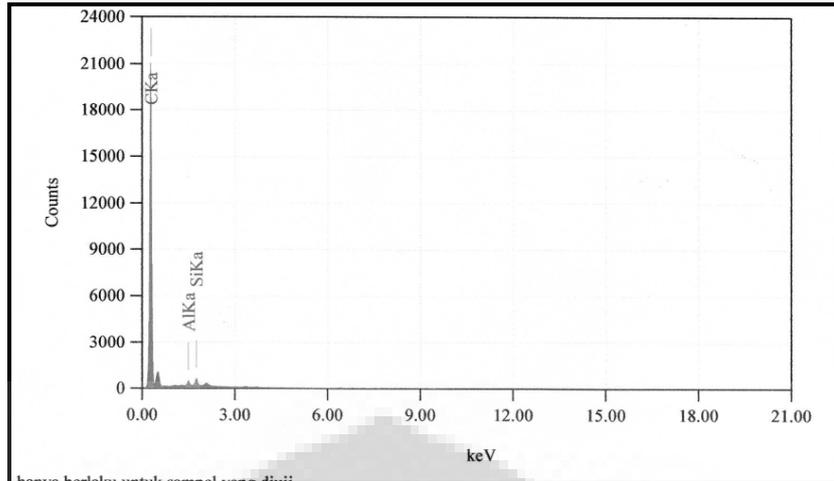
Gambar 4.26. Grafik EDS F1 Titik 1



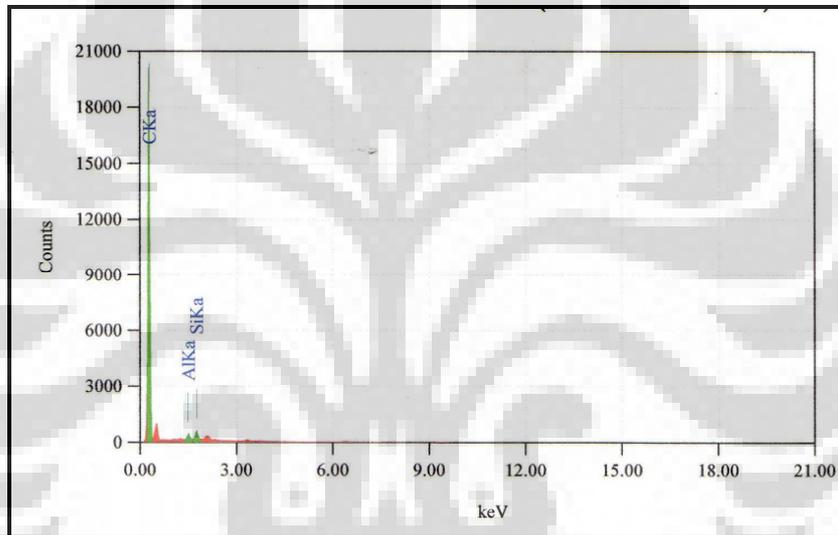
Gambar 4.27. Grafik EDS F1 Titik 2



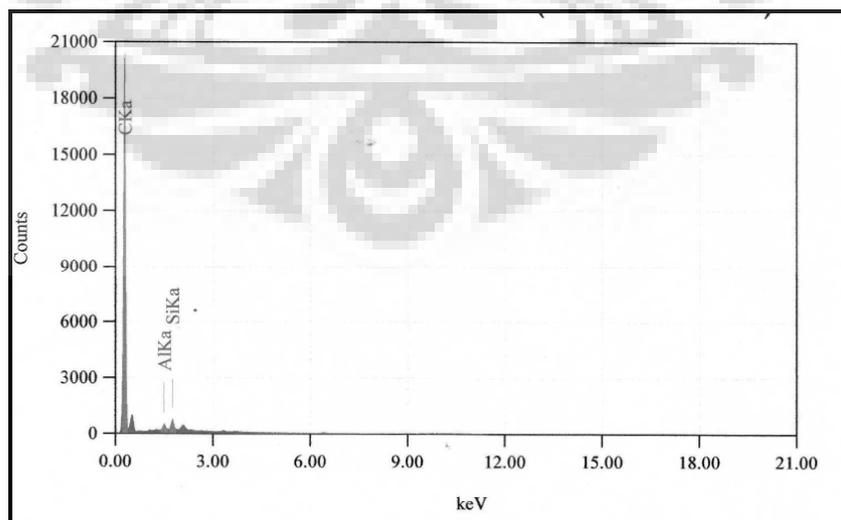
Gambar 4.28. Grafik EDS F1 Titik 3



**Gambar 4.29.** Grafik EDS F2 Titik 1



**Gambar 4.30.** Grafik EDS F2 Titik 2



**Gambar 4.31.** Grafik EDS F2 Titik 3

## BAB 5 PEMBAHASAN

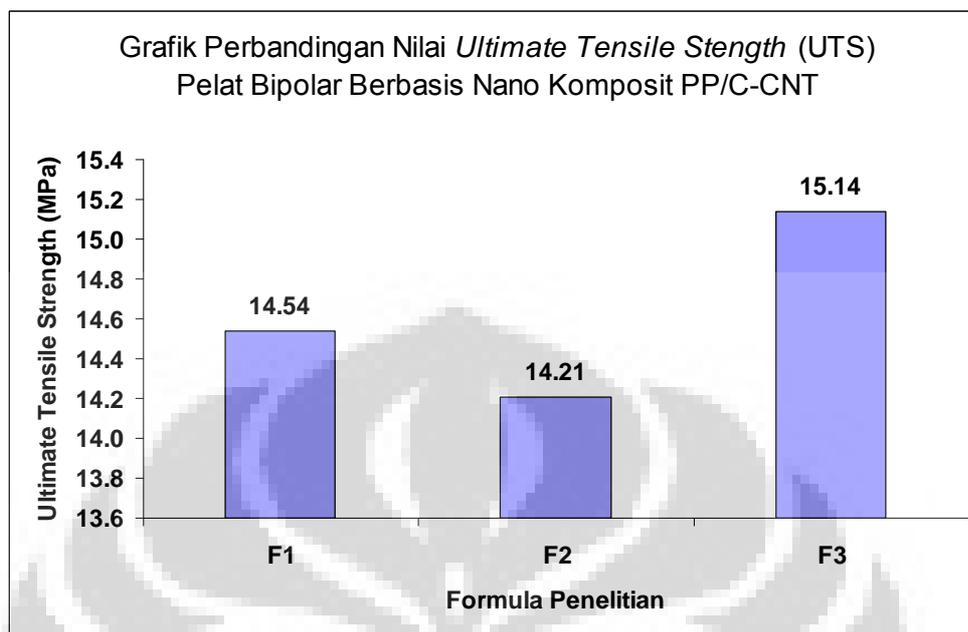
### 5.1. Analisis Pengaruh Penambahan CNT Terhadap Hasil Pengujian Tarik Pelat Bipolar

Pengujian tarik merupakan salah satu pengujian yang dilakukan untuk mengkarakterisasi sifat mekanis dari suatu bahan. Sifat mekanis untuk pelat bipolar merupakan parameter penting yang menentukan seberapa besar kekuatan pelat bipolar untuk menerima pembebanan minimal hingga terjadinya deformasi plastis. Selain itu tujuan dari pengujian tarik ini adalah untuk mengetahui seberapa baik ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) antara matriks polipropilena dengan dengan penguat (*reinforcements*) berbasis karbon seperti serat karbon, grafit dan CNT di mana kekuatan antarmuka (*interfacial bonding*) ini dipengaruhi oleh peranan PP-g-MA sebagai *compactibilizer* yang berperan dalam meningkatkan pembasahan (*wetting*) antara matriks PP dengan penguat karbon. Secara teoritis dengan peningkatan fraksi volume penguat berbasis karbon seperti CNT, serat karbon dan grafit maka kekuatan mekanis dari pelat bipolar berbasis komposit PP-karbon ini juga akan meningkat. Parameter penting yang harus diperhatikan dalam hal ini adalah seberapa besar pengaruh penambahan fraksi volume penguat CNT terhadap sifat mekanis pelat bipolar serta formula penelitian mana yang menunjukkan pengaruh paling signifikan dari penambahan CNT tersebut.

Berdasarkan literatur pengujian tarik seharusnya penambahan komposisi penguat karbon membuat nilai kekakuan komposit karbon semakin meningkat dan dibutuhkan tegangan yang lebih besar untuk mencapai titik luluhnya. Pertambahan panjang yang terjadi, menunjukkan kecenderungan yang semakin kecil, hingga titik luluh, walaupun perubahan nilainya tidak berpola<sup>[37]</sup>.

Pengaturan kecepatan penarikan pada pengujian tarik ini, yaitu sebesar 5 mm/menit. Karena komposit berbasis PP-karbon ini bersifat getas, maka proses pemuluran tidak jelas terlihat pada kurva tegangan-regangan dan spesimen langsung patah setelah beberapa saat melewati titik luluhnya. Dalam pengujian tarik ini diperoleh 2 parameter sifat mekanis penting dari pelat bipolar, yaitu nilai kekuatan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Strength/UTS*) dan nilai elongasi saat terjadinya perpatahan (*elongation at break*). Nilai kekuatan tarik maksimum

(*Ultimate Tensile Strength/UTS*) pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada grafik di bawah ini:

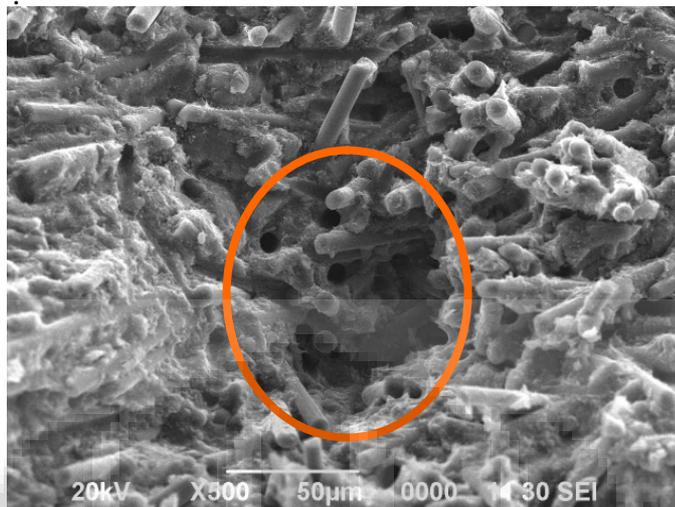


**Gambar 5.1.** Grafik Perbandingan Nilai *Ultimate Tensile Strength* Pelat Bipolar

Dari grafik tersebut di atas terlihat bahwa penambahan fraksi volume penguat CNT secara keseluruhan dapat meningkatkan nilai UTS pelat bipolar, walaupun pada F2 terjadi penurunan nilai UTS. Nilai UTS pelat bipolar tertinggi adalah sebesar 15,14 MPa pada F3 dengan penambahan fraksi volume penguat CNT sebesar 0,5 *wt%*. Secara umum dapat disimpulkan bahwa semakin meningkatnya penambahan fraksi volume penguat CNT maka nilai kekuatan mekanis pelat bipolar akan meningkat.

Penurunan nilai UTS pada F2 dapat disebabkan oleh lemahnya ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) antara matriks PP dengan penguat serat karbon sehingga menyebabkan banyaknya serat karbon yang terlepas atau tercabut dari matriks PP saat mengalami pembebanan mekanis seperti yang terlihat pada SEM micrograph (gambar 5.2). Kondisi ini dapat terjadi karena pembasahan yang kurang baik antara matriks PP dengan penguat karbon. Walaupun dalam komposit PP-karbon ini ditambahkan PP-g-MA sebagai *compatibilizer* namun peranan dari PP-g-MA ini masih sangat terbatas. Peran PP-g-MA hanya bersifat merekatkan

tanpa meningkatkan kemampuan *wetability* antara matriks polypropylene dengan *filler* karbon<sup>[37]</sup>.



**Gambar 5.2.** SEM Micrograph F2 Titik 1 Perbesaran 500x

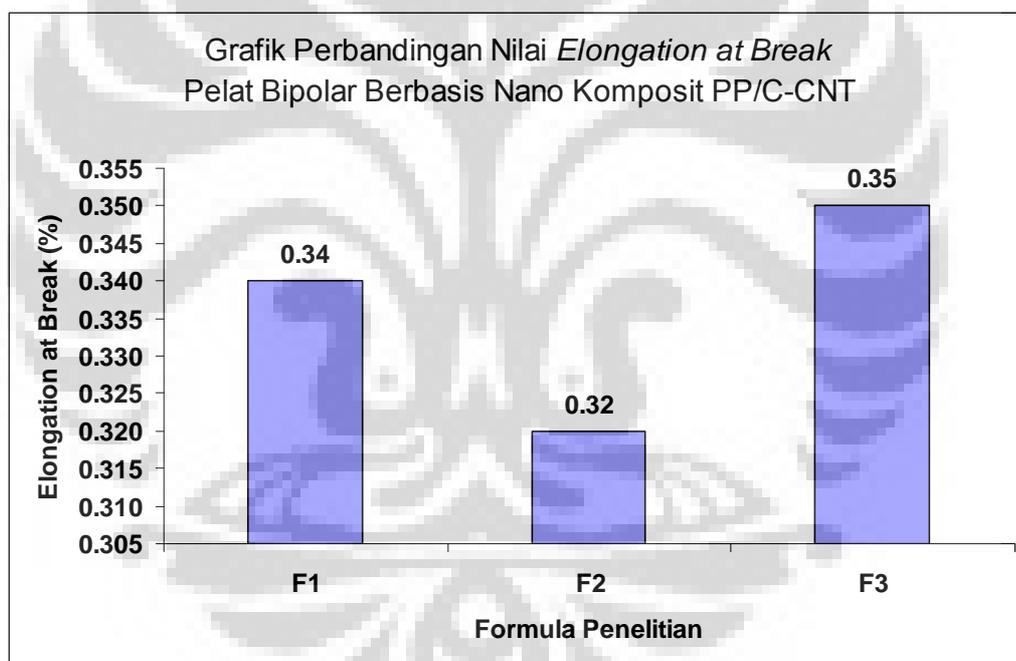
Faktor lain yang dapat mempengaruhi penurunan nilai UTS pada F2 ini adalah proses *rheomix* yang kurang sempurna. Pada proses *rheomix* seharusnya terjadi kontak yang sempurna antara matriks PP dengan penguat karbon. Kontak yang baik terjadi apabila seluruh bagian serat terbasahi oleh matriks. Pada dasarnya matriks PP bersifat nonpolar<sup>[37]</sup>. *Compatibilizer* PP-g-MA bekerja dengan cara, yaitu gugus *maleic anhydrite* (-MA) yang bersifat polar akan mengikat gugus -OH atau -ester dari *filler*, sedangkan gugus PP-g akan mengikat matriks PP<sup>[37]</sup>. Di sisi lain, karbon bersifat nonpolar. Selain itu, karena karbon tidak mempunyai gugus -OH maupun -ester, maka ikatan yang terjadi dengan PP hanyalah menempel antarmuka saja dan tidak sampai mengikat secara kimiawi. Peran PP-g-MA disini hanya bersifat merekatkan tanpa meningkatkan kemampuan pembasahan (*wetability*) antara matriks PP dengan *filler* karbon<sup>[37]</sup>. Pembasahan dapat terjadi apabila perbedaan energi permukaan antara pengisi dan matriks relatif kecil.

Data nilai UTS pelat bipolar berbasis komposit PP-karbon berdasarkan literatur dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



menunjukkan bahwa penambahan fraksi volume penguat CNT yang hanya berkisar antara 0,1 wt% hingga 0,5 wt% saja mampu meningkatkan nilai UTS komposit PP-karbon secara signifikan. Kondisi ini dapat terjadi karena CNT itu sendiri memiliki kekuatan tarik maksimum yang dapat mencapai hingga 13 GPa. Kemampuan CNT untuk meningkatkan kekuatan tarik pelat bipolar dapat terjadi karena CNT dalam ukuran skala nano yang sangat halus mampu terdispersi dan terdistribusi dengan cukup baik di dalam matriks PP. Hal ini akan menyebabkan transfer tegangan dapat terjadi secara optimal antara matriks PP dengan penguat CNT.

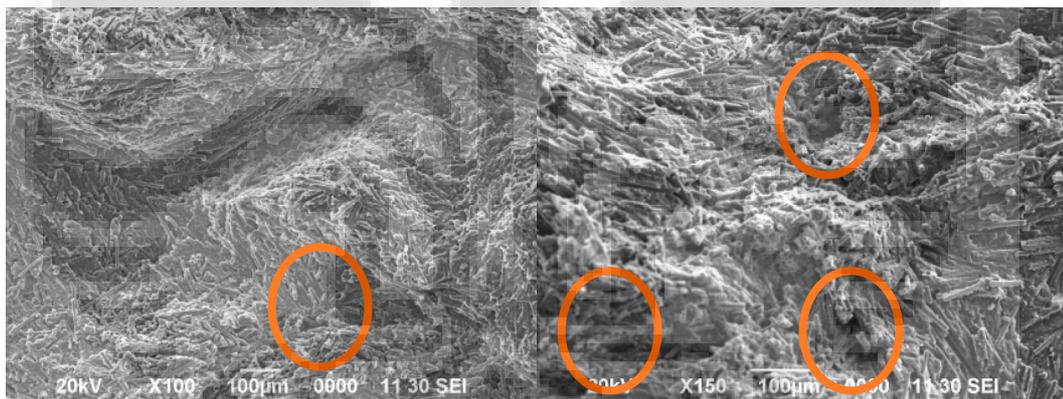
Sementara grafik yang menunjukkan perbandingan nilai elongasi saat perpatahan atau *Elongation at Break* dari sampel pelat bipolar untuk ketiga formulasi penelitian adalah sebagai berikut:



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 0,32% untuk F2 hingga 0,35% untuk F3. 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.

Pada dasarnya penambahan fraksi volume penguat karbon akan meningkatkan kekakuan dari komposit PP-karbon<sup>[37]</sup>. Namun hal ini juga berakibat pada meningkatnya nilai kegetasan dari komposit PP-karbon itu sendiri. Kegetasan ini dapat terjadi karena perpatahan (*fracture*) terjadi lebih awal sebagai akibat adanya rongga-rongga dalam komposit PP-karbon dan juga transfer tegangan yang kurang sempurna dari matriks PP menuju penguat karbon<sup>[37]</sup>. Ketika energi yang diterima matriks PP telah memungkinkan terjadinya retak, maka retak dengan cepat akan merambat sampai terjadinya perpatahan (*fracture*). Hal ini dikarenakan PP bersifat cukup getas. Jika terdapat retak maka perambatannya akan terjadi dengan sangat mudah. Penyebab getasnya komposit PP-karbon ini juga disebabkan karena di dalam komposit terdapat banyak rongga-rongga mikro (*micro-voids*), sehingga komposit menjadi rapuh. Rongga-rongga mikro (*micro-voids*) di dalam komposit dapat dilihat pada SEM *micrograph* berikut ini.

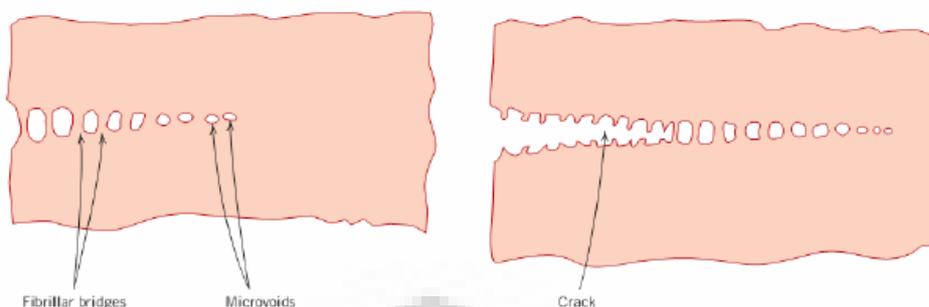


**Gambar 5.5.** SEM *Micrograph* yang Menunjukkan *Micro-Voids* Pelat Bipolar

Rongga-rongga mikro (*micro-voids*) tersebut dapat menjadi titik konsentrasi tegangan (*stress concentration*) ketika spesimen uji tarik mengalami pembebanan mekanis<sup>[52]</sup>. Hal ini tentu saja akan menyebabkan perpatahan (*fracture*) mudah terjadi pada komposit PP-karbon ini.

Suatu fenomena yang mendahului perpatahan pada beberapa polimer termoplastik adalah terbentuknya *craze*<sup>[37]</sup>. Kegagalan pada polimer terjadi melalui tahap *crazing*. Pada tahap ini terjadi pengembangan rongga-rongga mikro dan terhubung menjadi satu. Rongga-rongga mikro yang tergabung mulai

membentuk retak yang akhirnya menyebabkan perpatahan<sup>[52]</sup>. Gambar berikut ini menunjukkan gambaran skematik dari fenomena *craze*.



**Gambar 5.6.** Gambaran Skematik dari Fenomena *Craze*<sup>[37]</sup>

Terbentuknya rongga-rongga mikro dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya karena tingginya viskositas campuran sehingga kemampuan alirnya rendah dan ketika dicetak kepadatannya tidak merata, granula komposit hasil *crushing* menyerap moister karena bersifat higroskopis. Moister yang terperangkap ketika sampel dicetak membentuk *bubble* (gelembung-gelembung udara), gelembung-gelembung inilah yang menjadi awal terbentuknya rongga-rongga mikro<sup>[37]</sup>. Solusi untuk mencegah terbentuknya rongga adalah granula harus dikeringkan terlebih dahulu di dalam oven pada suhu 110 °C selama 24 jam sebelum dicetak agar kandungan moisturnya hilang<sup>[37]</sup>.

Walaupun komposit PP-karbon ini bersifat getas, namun nilai kegetasan ini dapat direduksi dengan adanya penambahan fraksi volume penguat CNT. Dari grafik hasil pengujian nilai elongasi terlihat bahwa dengan peningkatan penambahan fraksi volume penguat CNT maka nilai elongasi akan meningkat dari 0,32% untuk F2 menjadi 0,35% untuk F3. Hal ini berarti bahwa penambahan fraksi volume penguat CNT mampu meningkatkan nilai keuletan dari pelat bipolar saat mengalami pembebanan mekanis hingga terjadinya perpatahan walaupun tidak terlalu signifikan.

Pelat bipolar yang telah mengalami pengujian tarik (*tensile testing*) tentu akan mengalami perpatahan pada akhir pengujian. Patahan pelat bipolar hasil pengujian tarik dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 5.7.** Patahan Pelat Bipolar Hasil Pengujian Tarik

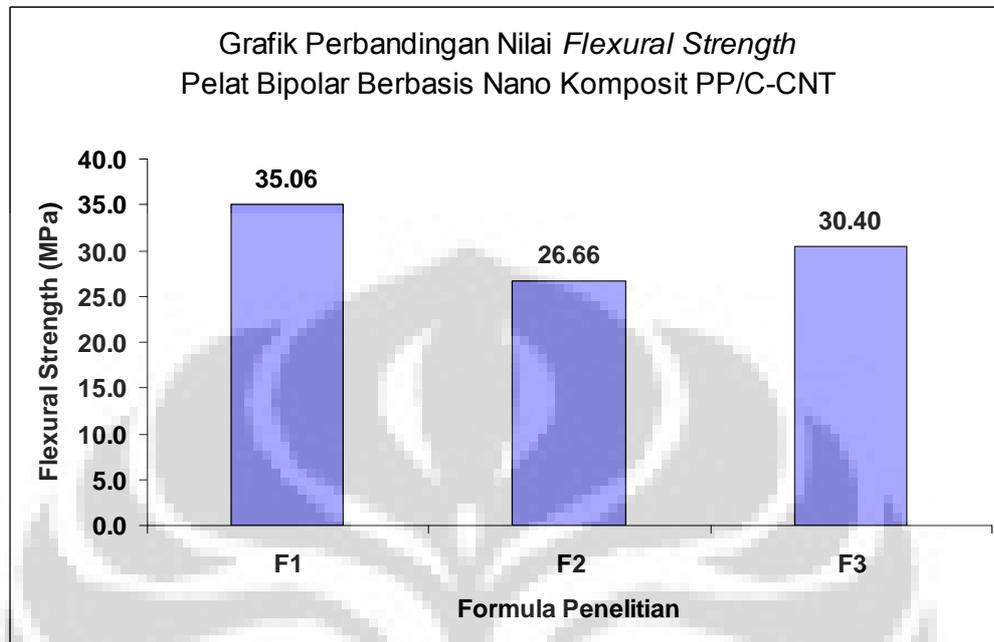
Perpatahan pelat bipolar hasil pengujian tarik untuk ketiga formula penelitian terjadi pada bagian tengah dari spesimen pengujian tarik. Melihat lokasi perpatahan hasil pengujian tarik dari pelat bipolar ini dapat dikatakan bahwa preparasi spesimen pengujian tarik sudah cukup baik sehingga menghasilkan data hasil pengujian tarik yang cukup representatif dan cukup valid.

## **5.2. Analisis Pengaruh Penambahan CNT Terhadap Hasil Pengujian Tekuk Pelat Bipolar**

Pengujian tekuk dilakukan yang dilakukan terhadap pelat bipolar bertujuan untuk mengetahui ketahanan pelat bipolar tersebut terhadap mekanisme pembebanan tekuk. Standarisasi pengujian tekuk untuk pelat bipolar ini adalah ASTM D790. Sebelum dilakukan pengujian tekuk maka spesimen terlebih dahulu akan dikondisikan dalam suatu lemari pengkondisian (*conditioning chamber*) pada temperatur  $23^{\circ}\text{C}$  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  $23,0^{\circ}\text{C}$  dan kelembaban relatif sebesar 55,5%.

Pengujian tekuk (*flexural testing*) yang dilakukan terhadap pelat bipolar ini akan menghasilkan dua parameter penting yang berhubungan dengan sifat mekanis dari pelat bipolar tersebut. Kedua parameter tersebut adalah nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) dan nilai modulus elastisitas tekuk (*modulus of elasticity*).

Nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) yang diperoleh dari hasil pengujian tekuk (*flexural testing*) spesimen pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian adalah dapat dilihat pada grafik di bawah ini:

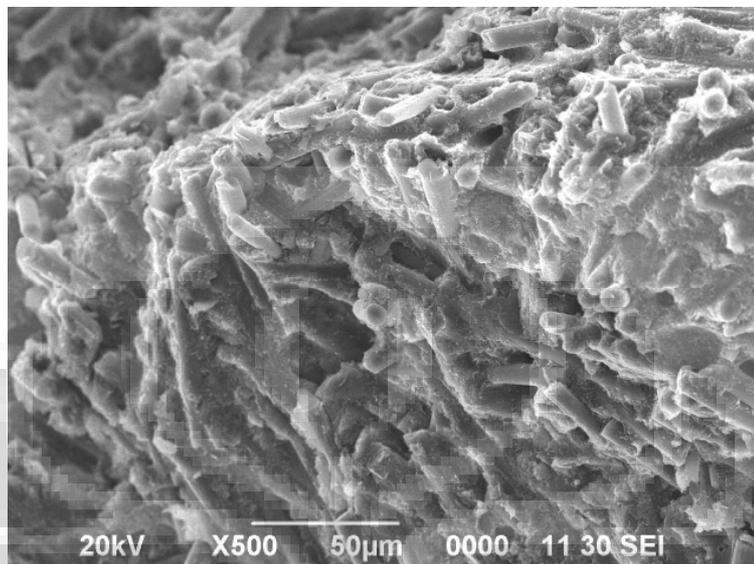


Gambar 5.8. Grafik Perbandingan Nilai Kekuatan Tekuk Pelat Bipolar

Dari grafik tersebut di atas dapat dilihat bahwa nilai kekuatan tekuk tertinggi pelat bipolar adalah sebesar 35,06 MPa untuk F1 dan nilai kekuatan tekuk terendah pelat bipolar adalah sebesar 26,66 MPa untuk F2. Dari data hasil pengujian terlihat bahwa penambahan fraksi volume penguat CNT mengakibatkan penurunan kekuatan tekuk pelat bipolar. Penurunan jelas terlihat ketika terjadi peningkatan fraksi volume penguat CNT dari 0,1 *wt%* pada F1 menjadi 0,25 *wt%* pada F2 di mana kekuatan tekuk menurun dari 35,06 MPa menjadi 26,66 MPa. Namun kekuatan tekuk pelat bipolar kembali meningkat pada penambahan fraksi volume penguat CNT dari 0,25 *wt%* pada F2 menjadi 0,5 *wt%* pada F3 di mana kekuatan tekuk meningkat dari 26,66 MPa menjadi 30,40 MPa.

Patahan hasil pengujian tekuk pelat bipolar selanjutnya akan dilakukan pengamatan terhadap morfologi patahan tekuk tersebut dengan menggunakan SEM. 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.

Nilai kekuatan tekuk pelat bipolar tertinggi adalah sebesar 35,06 MPa untuk F1. Tingginya nilai kekuatan tekuk pelat bipolar untuk F1 ini dapat dihubungkan dengan karakteristik morfologi patahan tekuk F1 seperti yang terlihat pada SEM *micrograph* di bawah ini:

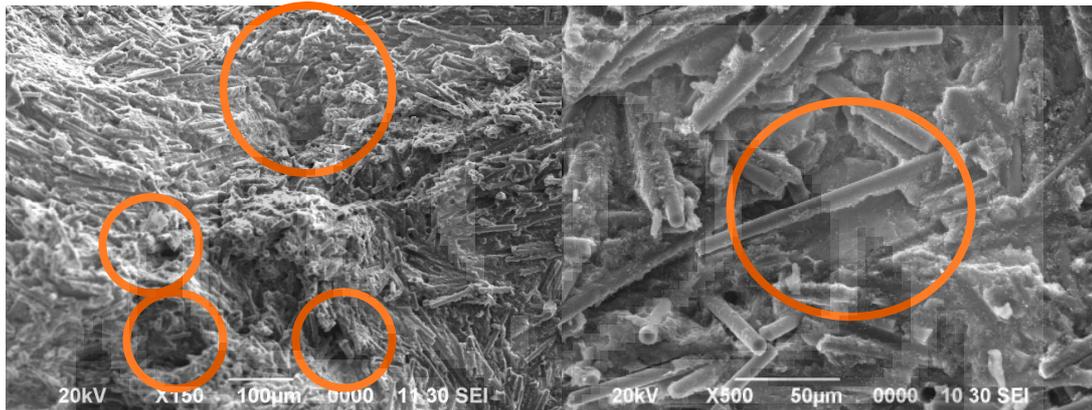


**Gambar 5.9.** SEM *Micrograph* Patahan Tekuk F1 Titik 3 Perbesaran 500x

Dari SEM *micrograph* tersebut di atas dapat dilihat bahwa matriks PP dapat menyelubungi dan mengikat serat karbon dengan cukup baik. Kondisi ini terjadi karena adanya *compactibilizer* PP-g-MA yang cukup baik dalam menjalankan perannya untuk menjembatani ikatan antara matriks PP dengan serat karbon. Pada gambar juga terlihat bahwa kontak antarmuka (*interfacial contact*) antara matriks PP dengan serat karbon juga cukup baik. Kondisi ini tentu saja akan membuat transfer tegangan dari matriks PP menuju serat karbon ketika komposit menerima pembebanan tekuk dapat berjalan dengan optimal sehingga secara otomatis nilai kekuatan tekuk untuk F1 ini juga cukup tinggi. Dari SEM *micrograph* tersebut juga terlihat bahwa serat karbon yang tercabut dari matriks PP saat mengalami pembebanan mekanis jumlahnya sedikit atau hampir tidak ada. Hal ini berarti bahwa kekuatan ikat antarmuka (*interfacial bonding*) antara matriks PP dan serat karbon cukup baik. Selain itu juga *microvoid* pada F1 ini jumlahnya masih cukup rendah dan tidak ditemukan adanya matriks PP yang menggumpal. Kondisi ini tentu saja membuat mekanisme perambatan retak pada

komposit ketika mengalami pembebanan mekanis dapat diminimalisasi sehingga membuat kekuatan tekuk dari F1 menjadi cukup tinggi di antara formula lainnya.

Sementara nilai kekuatan tekuk pelat bipolar terendah adalah sebesar 26,66 MPa untuk F2. Rendahnya nilai kekuatan tekuk pelat bipolar untuk F2 ini dapat dihubungkan dengan karakteristik morfologi patahan tekuk F2 seperti yang terlihat pada SEM *micrograph* di bawah ini:



**Gambar 5.10.** SEM *Micrograph* Patahan Tekuk F2 Titik 1 dan Titik 3

Dari SEM *micrograph* tersebut di atas terlihat bahwa morfologi patahan tekuk F2 ini memiliki banyak *microvoid* yang dapat mempercepat mekanisme perambatan retak ketika komposit mengalami pembebanan mekanis. Selain itu distribusi dari *microvoid* ini juga tersebar cukup merata di dalam struktur komposit. Kondisi ini tentu saja akan meningkatkan laju perambatan retak pada komposit. Pada SEM *micrograph* juga terlihat bahwa adanya gumpalan matriks PP. Hal ini berarti bahwa matriks PP tidak dapat terdispersi secara merata dan homogen pada saat mengalami proses pencampuran panas (*hot blending*). Gumpalan matriks PP ini terjadi sebagai akibat kuatnya daya ikat antar granula matriks PP sehingga energi mekanis dan energi panas yang diberikan pada proses *hot blending* kurang optimal untuk menurunkan daya ikat antara granula matriks PP sehingga matriks PP tidak terdispersi secara optimal. Adanya gumpalan matriks PP ini menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan (*stress concentration*) yang terpusat pada gumpalan matriks PP itu sendiri. Gumpalan matriks PP dengan diameter sekitar 60 mikron ini membuat tegangan tidak dapat ditransfer secara optimal dari matriks PP ke serat karbon sehingga menimbulkan konsentrasi

tegangan. Adanya konsentrasi tegangan ini merupakan awal pertumbuhan retak dan juga dapat meningkatkan laju penjalaran retak pada komposit. Kondisi ini tentu saja membuat kekuatan tekuk pada F2 ini cukup rendah.

Nilai kekuatan tekuk komposit PP-karbon dipengaruhi banyak hal, yaitu sebagai berikut<sup>[37]</sup>:

➤ Temperatur

Temperatur tinggi akan meningkatkan elongasi, tetapi menurunkan kuat tekuknya. Polimer akan berubah struktur molekulnya dari sifatnya yang kaku dan getas menjadi lunak dan *ductile* (*softening*).

➤ Orientasi molekul

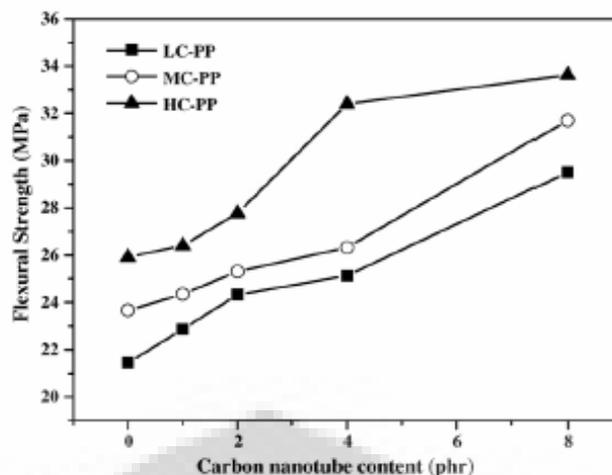
Hasil dari proses tertentu akan menentukan orientasi molekul. Proses *hot blending* dan *compression molding* akan memberikan orientasi molekul searah mesin (*machine direction*) yang sifatnya anisotropik di mana pada arah tersebut akan meningkatkan kuat tekuk dan menurunkan elongasinya. Pertimbangan aditif juga berpengaruh terhadap dispersi *filler* karbon.

➤ Derajat kristalisasi.

Umumnya, semakin tinggi derajat kristalisasi akan meningkatkan kekuatannya karena keteraturan yang dimiliki memudahkan proses transfer tegangannya. Derajat kristalisasinya dapat diketahui melalui pengujian DSC (*Differential Scanning Calorimetry*), tetapi tidak dilakukan pada penelitian ini.

Secara umum penambahan fraksi volume penguat CNT mulai dari 0,1 wt% untuk F1 sampai 0,5 wt% untuk F3 dapat meningkatkan kekuatan tekuk pelat bipolar yang berkisar antara 26,66 MPa sampai dengan 30,40 MPa. Semakin besar jumlah *filler* karbon yang ditambahkan dalam komposit PP-karbon maka akan membuat kekuatan tekuk karbon akan semakin rendah. Namun penambahan fraksi volume penguat CNT mampu membatasi penurunan kekuatan tekuk tersebut.

Penengaruh penambahan fraksi volume penguat CNT terhadap nilai kekuatan tekuk nano komposit PP/C-CNT berdasarkan data pada literatur dapat dilihat pada grafik di bawah ini:

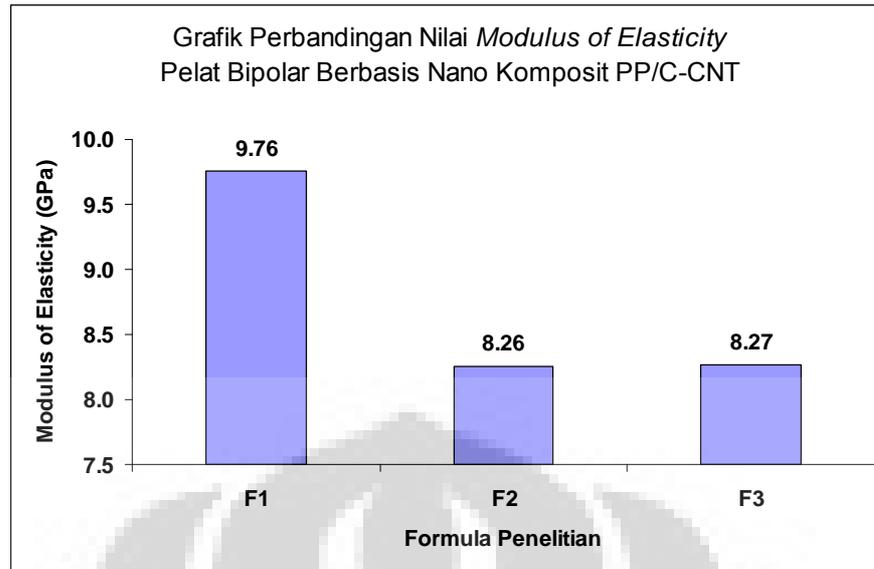


Gambar 5.11. Data Literatur Pengaruh CNT Terhadap Kuat Tekuk<sup>[53]</sup>

Dari data pada literatur terlihat bahwa penambahan CNT akan lebih optimal dan efektif jika ditambahkan pada nano komposit PP dengan derajat kristalinitas tinggi (HC). Penambahan CNT pada nano komposit PP dengan derajat kristalinitas rendah (LC) dapat meningkatkan kekuatan tekuk secara optimum pada konsentrasi 4 *phr* CNT. Sementara penambahan CNT dengan konsentrasi 4 *phr* pada PP dengan derajat kristalinitas tinggi (HC) dapat meningkatkan kekuatan tekuk hingga mencapai 33 MPa.

Pada penelitian ini CNT yang ditambahkan dalam nano komposit PP/karbon berkisar antara 0,1 *wt%* hingga 0,5 *wt%* dan mampu meningkatkan kekuatan tekuk hingga mencapai 30,40 MPa pada F3. Penambahan CNT dengan konsentrasi 0,1 *wt%* juga sudah dapat meningkatkan kekuatan tekuk hingga mencapai 26,66 MPa di mana nilai kekuatan tekuk ini sudah melampaui target nilai kekuatan tekuk pelat bipolar yang ditetapkan oleh DOE USA, yaitu sebesar minimal 25 MPa.

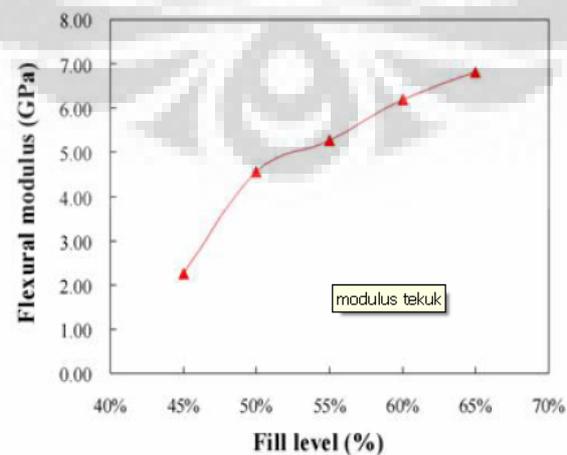
Selain kekuatan tekuk data lain yang diperoleh dari pengujian tekuk ini adalah modulus elastisitas tekuk. Grafik yang menunjukkan perbandingan nilai modulus elastisitas tekuk dari spesimen pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian adalah sebagai berikut:



**Gambar 5.12.** Grafik Perbandingan Modulus Elastisitas Tekuk Pelat Bipolar

Dari grafik tersebut di atas terlihat bahwa nilai modulus elastisitas tekuk tertinggi adalah sebesar 9,76 GPa untuk F1 dan modulus elastisitas tekuk terendah adalah sebesar 8,26 GPa untuk F2. Dari grafik terlihat bahwa terjadi penurunan modulus elastisitas tekuk yang cukup signifikan dari F1 menuju F2, yaitu dari 9,76 GPa menjadi 8,26 GPa. Sementara nilai modulus elastisitas tekuk relatif cukup konstan dari F2 menuju F3, yaitu berkisar antara 8,26 GPa dan 8,27 GPa.

Data nilai modulus elastisitas tekuk (*flexural modulus*) pelat bipolar berbasis komposit PP-karbon berdasarkan literatur dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



: Flexural modulus of 1:1:1 SG-4012/VCB/CF composites

**Gambar 5.13.** Literatur Grafik Modulus Tekuk Komposit PP-Karbon<sup>[8]</sup>

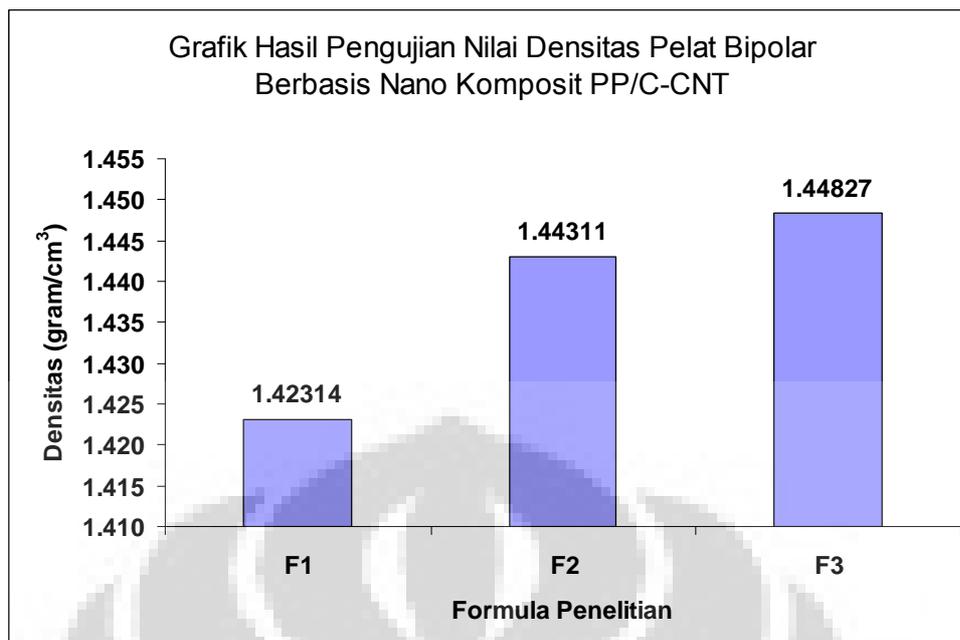
Data pada literatur menunjukkan bahwa peningkatan fraksi volume penguat karbon pada komposit PP-karbon akan meningkatkan modulus tekuk hingga mencapai level 7 GPa. Sementara data hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai modulus tekuk pelat bipolar berbasis penguat CNT ini berkisar antara 8,26 GPa hingga 9,76 GPa. Hal ini menunjukkan bahwa walaupun fraksi volume penguat CNT yang ditambahkan dalam komposit PP-karbon cukup rendah, yaitu berkisar antara 0,1 wt% sampai 0,5 wt% namun sudah dapat meningkatkan modulus tekuk komposit PP-karbon ke nilai yang jauh lebih tinggi. Jadi, dapat disimpulkan bahwa penambahan fraksi volume penguat CNT memiliki pengaruh yang cukup signifikan dalam meningkatkan modulus tekuk komposit PP-karbon ini.

### **5.3. Analisis Pengaruh Penambahan CNT Terhadap Nilai Densitas Pelat Bipolar**

Salah satu parameter penting yang menentukan tingkat keberhasilan dari penelitian ini adalah reduksi berat dari pelat bipolar. 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.

Untuk mendapatkan pelat bipolar dengan berat yang relatif ringan maka parameter yang dapat dijadikan tolak ukur adalah densitas atau kerapatan massa dari pelat bipolar itu sendiri. Secara umum parameter densitas berbanding lurus dengan parameter berat. Hal ini berarti bahwa semakin kecil nilai densitas suatu material maka berat atau massa dari material tersebut akan semakin kecil pula.

Hasil pengujian nilai densitas pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



**Gambar 5.14.** Grafik Hasil Pengujian Nilai Densitas Pelat Bipolar

Data literatur untuk nilai densitas setiap bahan yang digunakan untuk memfabrikasi pelat bipolar ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 5.1.** Data Literatur Nilai Densitas Bahan<sup>[54]</sup>

Bahan	Densitas (gram/cm <sup>3</sup> )
Polipropilena	0.9
Serat Karbon Fortafile 243	1.8
Grafit 4012	1.26 - 1.69
PP-g-MA	0.91
Anti Oksidan CN-CAT A215	0.85
CNT (Single Wall)	1.3 - 1.4

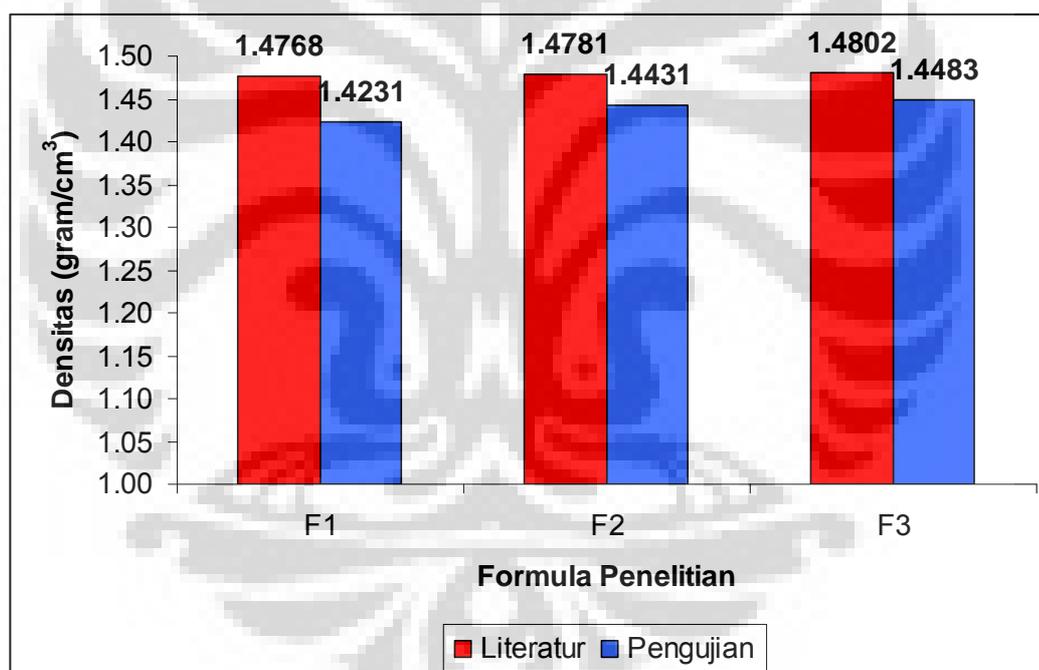
Komposisi berat dari setiap bahan yang digunakan untuk setiap formula penelitian telah ditentukan sebelumnya. Berdasarkan komposisi berat tersebut maka dapat ditentukan fraksi volume masing-masing bahan untuk setiap formula penelitian. Dengan diketahuinya nilai densitas dan fraksi volume dari masing-masing bahan maka dapat ditentukan prediksi nilai densitas dari pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian berdasarkan perhitungan hukum campuran atau

*rules of mixtures*<sup>[10]</sup>. Prediksi nilai densitas pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

**Tabel 5.2.** Prediksi Nilai Densitas Pelat Bipolar Berdasarkan Literatur

Formula Penelitian	Densitas (gram/cm <sup>3</sup> )
F1	1,4768
F2	1,4781
F3	1,4802

Perbandingan antara prediksi nilai densitas pelat bipolar berdasarkan literatur dengan nilai densitas aktual pelat bipolar berdasarkan hasil pengujian dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



**Gambar 5.15.** Grafik Perbandingan Nilai Densitas Pelat Bipolar

Berdasarkan grafik tersebut di atas maka dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya penambahan fraksi volume penguat CNT maka akan meningkatkan nilai densitas pelat bipolar dengan peningkatan yang tidak terlalu signifikan. Penambahan CNT yang memiliki densitas sekitar 1,3 – 1,4 gram/cm<sup>3</sup> mampu mereduksi densitas pelat bipolar yang didominasi oleh penguat serat karbon dengan densitas yang cukup tinggi, yaitu sekitar 1,8 gram/cm<sup>3</sup>. Reduksi densitas

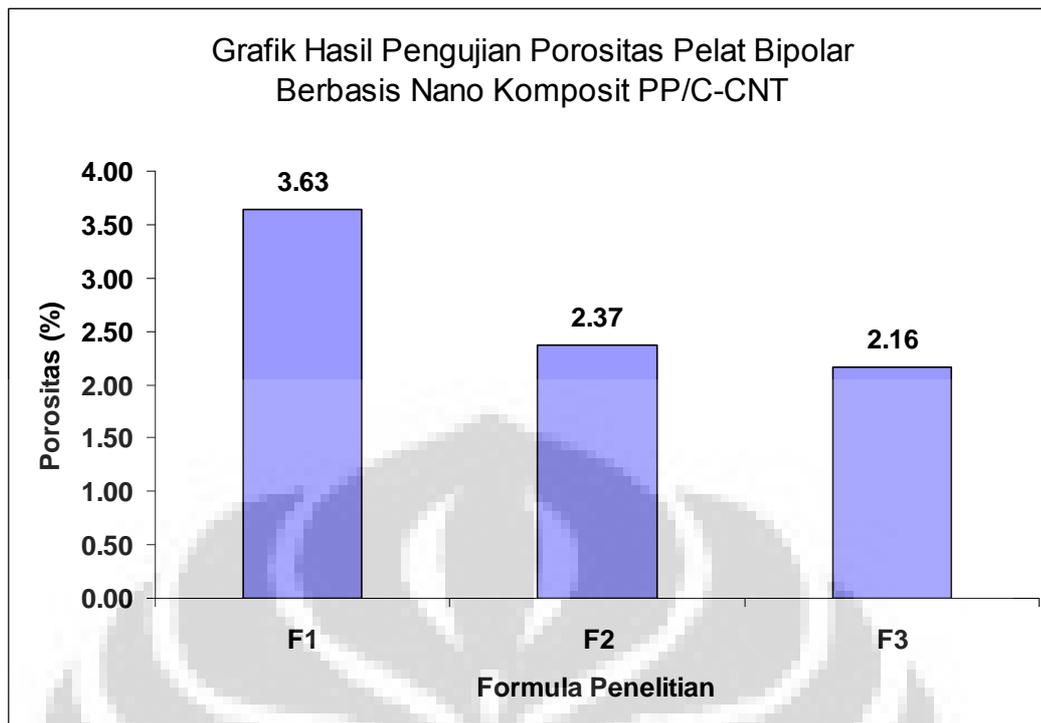
dari pelat bipolar ini juga dipengaruhi oleh komposisi bahan lainnya dalam pelat bipolar seperti matriks polipropilena, penguat grafit, antioksidan dan PP-g-MA.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai densitas pelat bipolar yang terendah adalah sebesar 1,4231 gram/cm<sup>3</sup> pada F1 dengan komposisi penguat CNT sebesar 0,1 wt%. Berdasarkan grafik di atas juga dapat dilihat bahwa nilai densitas pelat bipolar hasil pengujian selalu lebih rendah dari prediksi nilai densitas berdasarkan literatur. Hal ini menunjukkan bahwa reduksi densitas pelat bipolar pada penelitian ini dapat dilakukan dengan cukup optimal melalui berbagai macam modifikasi pada pemrosesan pelat bipolar seperti pada tahapan pencampuran panas (*hot blending*) dan pada tahapan pencetakan panas (*hot pressing*). Proses pencampuran panas dengan waktu pencampuran yang lebih lama, yaitu sekitar 15 menit per *batch* yang membuat pencampuran antara setiap bahan menjadi lebih homogen. Pada proses pencetakan panas dilakukan dengan kondisi penekanan (*compressing*) yang bersiklik yang membuat proses penyatuan antara setiap bahan dapat terjadi lebih optimal.

#### **5.4. Analisis Pengaruh Penambahan CNT Terhadap Nilai Porositas Pelat Bipolar**

Porositas merupakan salah satu parameter penting yang menentukan keberhasilan dari penelitian ini. Secara umum pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC 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.

Hasil pengujian porositas pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



**Gambar 5.16.** Grafik Hasil Pengujian Porositas Pelat Bipolar

Berdasarkan grafik tersebut di atas maka dapat dilihat bahwa peningkatan penambahan fraksi volume penguat CNT dapat menurunkan nilai porositas pelat bipolar secara signifikan. Nilai porositas terendah pelat bipolar adalah sebesar 2,16% pada formula penelitian F3 dengan penambahan fraksi volume penguat CNT sebesar 0,5 wt%. Peningkatan fraksi volume penguat CNT dari 0,1 wt% pada F1 menjadi 0,25 wt% pada F2 menyebabkan penurunan atau reduksi porositas pelat bipolar secara signifikan, yaitu dari 3,63% menjadi 2,37%. Sementara peningkatan fraksi volume CNT dari 0,25 wt% pada F2 menjadi 0,5 wt% pada F3 masih berpengaruh terhadap reduksi porositas pelat bipolar walaupun dengan laju reduksi yang tidak terlalu signifikan, yaitu dari 2,37% menjadi 2,16%.

Proses reduksi porositas pelat bipolar dapat berlangsung optimal karena adanya modifikasi dalam pemrosesan pelat bipolar terutama pada tahapan pencampuran panas dan tahapan penekanan panas. Proses pencampuran panas (*hot blending*) seluruh bahan dilakukan dalam waktu yang lebih lama, yaitu 15 menit per *batch* yang membuat pencampuran antara setiap bahan menjadi lebih homogen. Pada proses pencetakan panas dilakukan dengan kondisi penekanan

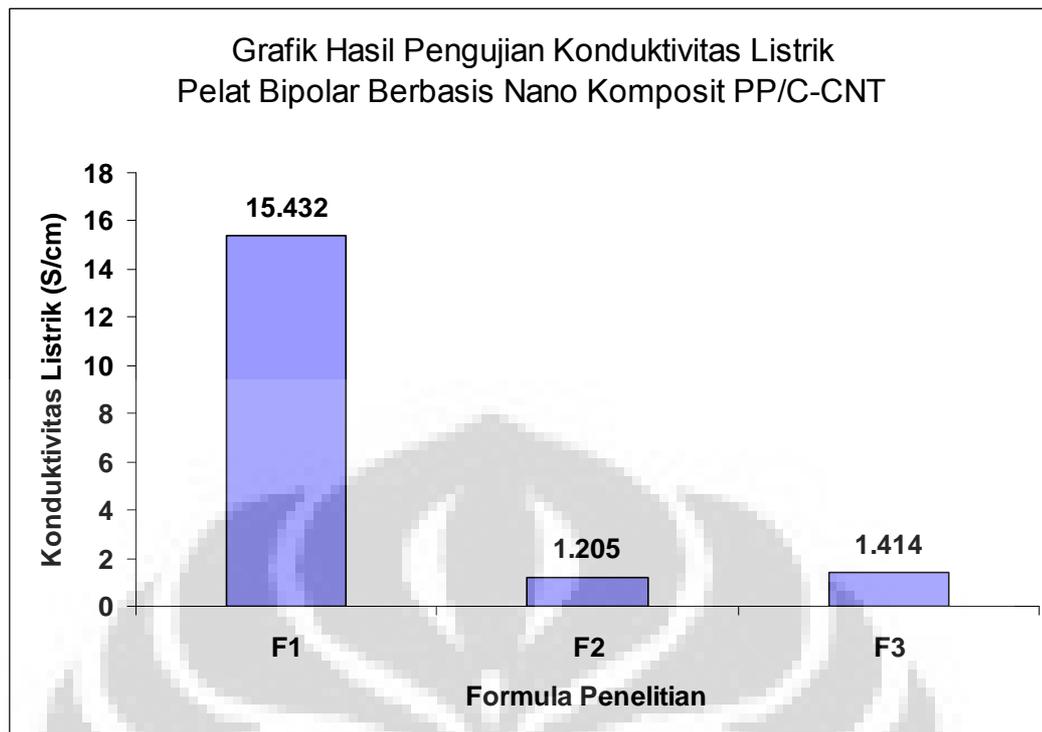
(*compressing*) yang bersiklik yang membuat proses penyatuan antara setiap bahan dapat terjadi lebih optimal. Secara umum nilai porositas yang diperoleh pada penelitian ini sudah mendekati target nilai porositas pelat bipolar PEMFC sesuai standar Departemen Energi Amerika Serikat, yaitu sebesar 2%.

### **5.5. Analisis Pengaruh Penambahan CNT Terhadap Nilai Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar**

Konduktivitas listrik merupakan parameter penting yang menjadi target dan kunci keberhasilan dari penelitian pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC dewasa ini. Pelat bipolar yang akan menjadi komponen utama dalam PEMFC harus bersifat konduktif atau dengan kata lain memiliki nilai konduktivitas listrik cukup tinggi. Hal ini mutlak diperlukan karena pelat bipolar harus mampu menghantarkan elektron dengan baik sehingga efisiensi kerja yang dimiliki oleh PEMFC menjadi optimal. Target nilai konduktivitas listrik yang harus dimiliki oleh pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC sesuai dengan yang ditetapkan oleh DOE USA adalah minimal 100 S/cm. Nilai konduktivitas listrik ini dapat dicapai dengan pemilihan material serta desain pemrosesan material yang tepat.

Salah satu fokus utama dari penelitian ini adalah mengetahui efektivitas dari penambahan fraksi volume penguat CNT terhadap peningkatan sifat konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis nano komposit PP/karbon. Pengujian nilai konduktivitas listrik yang dilakukan pada pelat bipolar tidak dilakukan secara langsung, melainkan dengan melakukan pengujian terhadap nilai tahanan jenis yang dimiliki oleh pelat bipolar tersebut. Nilai tahanan jenis berbanding terbalik dengan nilai konduktivitas listrik. Parameter penting yang harus diperhatikan dalam pengujian konduktivitas listrik ini adalah pengamplasan spesimen, pengukuran ketebalan spesimen dan memastikan bahwa spesimen pengujian konduktivitas listrik berada dalam kondisi rata (*flat*).

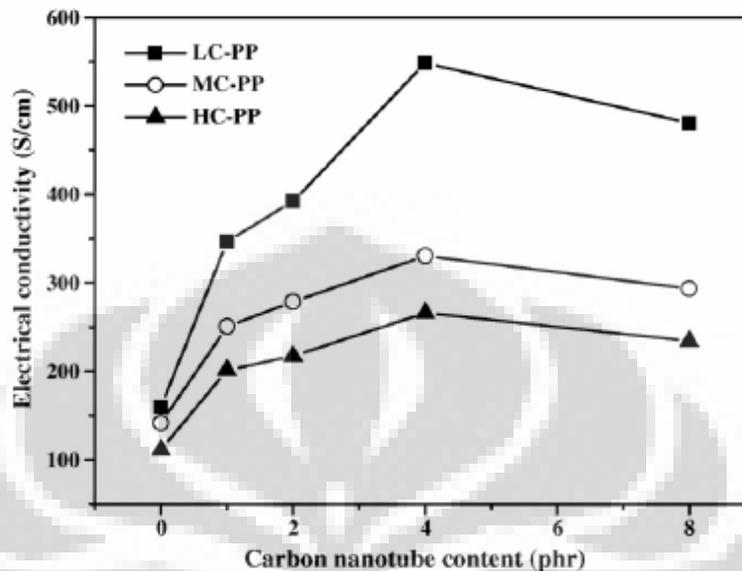
Nilai konduktivitas listrik yang diukur pada penelitian ini adalah nilai konduktivitas listrik pada arah *in-plane*. Data hasil pengujian nilai konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



**Gambar 5.17.** Grafik Perbandingan Nilai Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar

Dari grafik tersebut di atas dapat dilihat bahwa nilai konduktivitas listrik tertinggi adalah pada F1, yaitu sebesar 15,432 S/cm dan nilai konduktivitas listrik terendah adalah pada F2, yaitu sebesar 1,205 S/cm. Secara umum dapat dikatakan bahwa penambahan fraksi volume penguat CNT dapat meningkatkan nilai konduktivitas listrik komposit PP/karbon. Nilai konduktivitas listrik pelat bipolar pada penelitian ini masih di bawah target DOE USA yang mensyaratkan nilai konduktivitas minimum dari pelat bipolar adalah sebesar 100 S/cm. Hal ini wajar karena penguat CNT yang ditambahkan pada penelitian ini masih rendah, yaitu berkisar antara 0,1 wt% hingga 0,5 wt%. Namun penambahan CNT dengan konsentrasi 0,1 wt% hingga 0,5 wt% pada komposit PP/karbon ini sudah mampu meningkatkan nilai konduktivitas listrik pelat bipolar secara cukup signifikan, yaitu berkisar antara 1,205 S/cm hingga 15,432 S/cm. Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya dengan komposisi material hampir serupa namun tanpa penambahan CNT, nilai konduktivitas listrik yang dapat dicapai adalah sebesar 8,546 S/cm<sup>[37]</sup>.

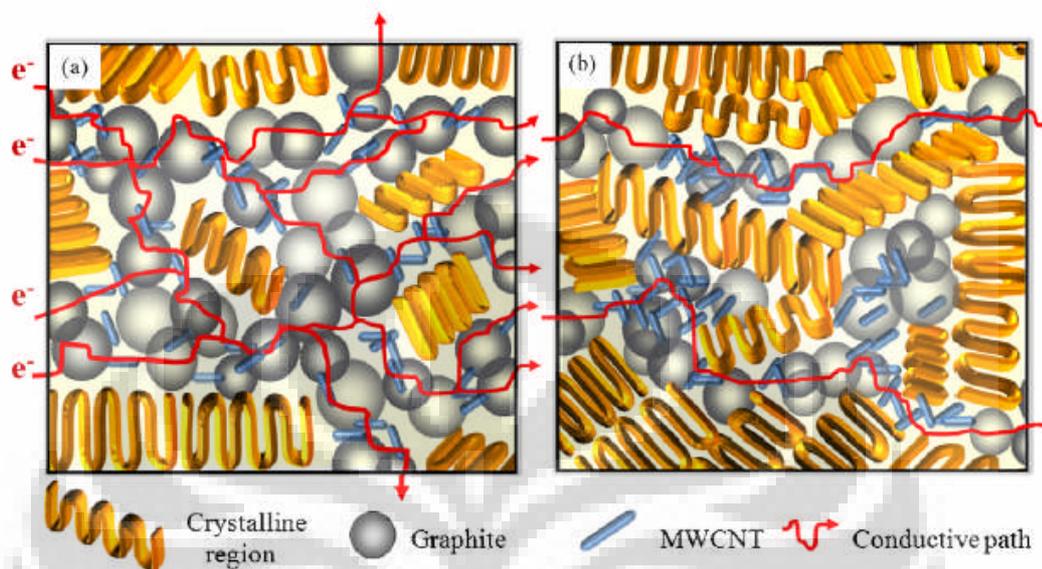
Data literatur yang menunjukkan efektivitas penambahan CNT terhadap sifat konduktivitas pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT ditunjukkan pada grafik di bawah ini:



**Gambar 5.18.** Data Literatur Efektivitas Penambahan CNT Pada Peningkatan Sifat Mekanis Pelat Bipolar Berbasis Nano Komposit PP/C-CNT<sup>[53]</sup>

Dari data literatur dapat dilihat bahwa penambahan CNT dapat meningkatkan konduktivitas listrik komposit PP/karbon secara lebih optimal pada komposit PP/karbon yang memiliki matriks PP dengan derajat kristanilitas rendah. Matriks PP dengan derajat kristanilitas rendah akan menghasilkan dispersi CNT yang lebih baik dalam struktur nano komposit PP/karbon. Derajat kristalinitas matriks PP yang rendah juga akan menghasilkan semakin banyaknya pembentukan lintasan elektron yang dibentuk oleh partikel konduktif seperti grafit ataupun serat karbon. Kondisi ini tentu saja akan membuat lintasan elektron semakin banyak sehingga elektron dapat dihantarkan dengan lebih optimal dan nilai konduktivitas listrik dapat meningkat secara lebih signifikan. Sementara pada nano komposit dengan matriks PP yang memiliki derajat kristanilitas tinggi akan membuat penambahan CNT menjadi tidak terlalu efektif pada peningkatan nilai konduktivitas listrik. Hal ini dikarenakan matriks PP dengan derajat kristalinitas tinggi akan membuat CNT yang ditambahkan cenderung beragregasi atau terkumpul pada titik-titik tertentu dan tidak terdispersi secara merata. Kondisi ini

juga akan membuat jalur lintasan elektron yang dibentuk oleh partikel konduktif jumlahnya menjadi berkurang sehingga nilai konduktivitas listrik juga tidak dapat ditingkatkan secara optimal. Model dari jalur lintasan elektron (*conductive path*) pada nano komposit PP/C-CNT dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 5.19.** Model *Conductive Path* pada Nano Komposit PP/C-CNT.

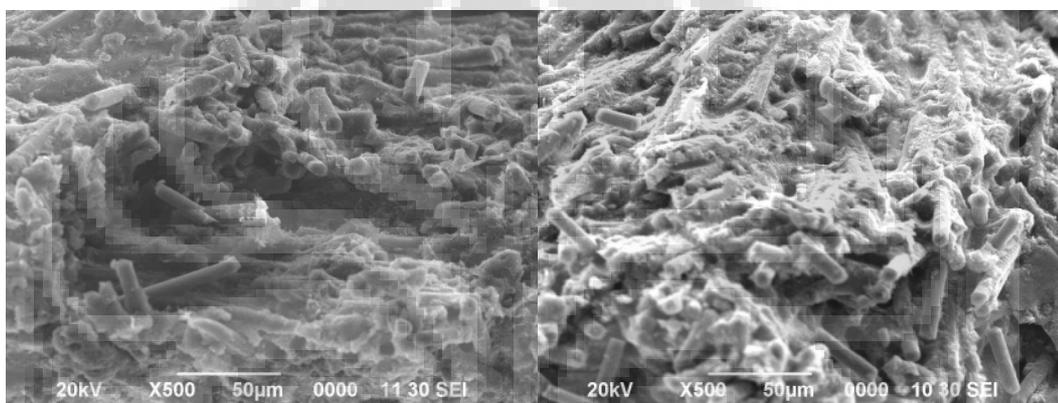
(a) Dispersi CNT yang Baik pada Matriks PP dengan Kristalinitas Rendah

(b) Agregasi CNT pada matriks PP dengan Kristalinitas Tinggi<sup>[53]</sup>

Secara umum penguat yang berperan dalam peningkatan konduktivitas listrik pelat bipolar dalam penelitian ini adalah grafit, serat karbon dan CNT. Pada pengujian awal nilai konduktivitas listrik bahan diketahui bahwa nilai konduktivitas listrik grafit adalah sebesar 27 S/cm. Konduktivitas listrik CNT sesuai dengan spesifikasi pabrikan adalah sebesar >100 S/cm. Serat karbon sebagai penguat utama yang ditambahkan dengan kadar 50 wt% tidak dapat diketahui nilai konduktivitas listrik aktualnya karena sifat serat karbon yang rapuh ini tidak memungkinkan untuk dilakukan pengujian konduktivitas listrik. Data konduktivitas listrik serat karbon yang digunakan adalah data literatur yang menyatakan bahwa nilai konduktivitas serat karbon adalah sebesar 598 S/cm<sup>[11]</sup>. Konduktivitas listrik bahan yang digunakan untuk memfabrikasi pelat bipolar secara teoritis dapat meningkatkan nilai konduktivitas listrik pelat bipolar. Namun SEM *micrograph* juga dapat dijadikan alat bantu (*tools*) untuk menganalisis

seberapa besar pengaruh dan efektivitas setiap bahan dalam meningkatkan sifat mekanis dari nano komposit PP/CNT.

Nilai konduktivitas listrik dari ketiga formula penelitian terdapat perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini kemungkinan dikarenakan oleh homogenitas campuran dari setiap bahan yang masih belum sempurna. Homogenitas *compound* yang seragam akan membuat transfer elektron dapat berjalan lebih optimal. Analisis mengenai nilai konduktivitas listrik ini dapat dijelaskan dengan bantuan SEM *micrograph* dari patahan tekuk pelat bipolar di bawah ini:



**Gambar 5.20.** SEM *Micrograph* F1 Titik 1 (Kiri) dan F2 Titik 2 (Kanan)

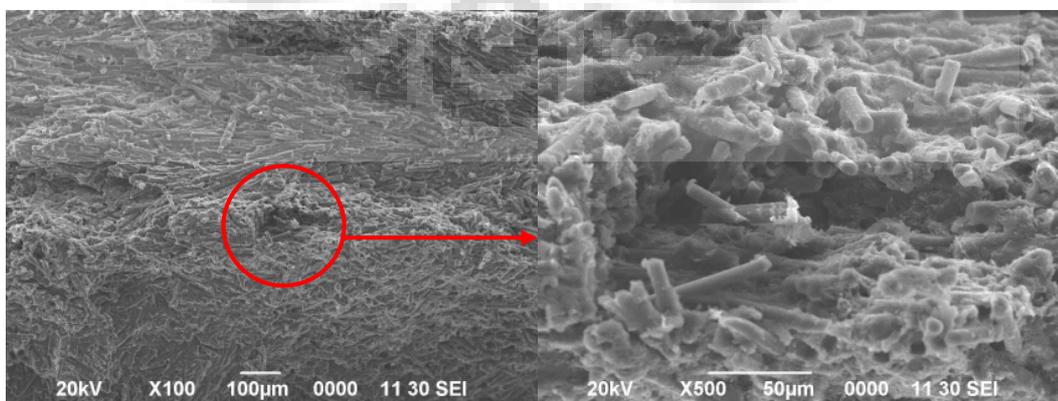
Dari SEM *micrograph* terlihat bahwa masih banyaknya rongga-rongga kecil (*microvoids*) pada struktur mikro pelat bipolar akan pembentukan *conductive path* yang berperan dalam menghantarkan elektron pada struktur mikro pelat bipolar. Dari SEM *micrograph* juga terlihat bahwa serat karbon sebagai penguat utama masih memiliki orientasi acak dengan tingkat keteraturan rendah. Kondisi ini membuat transfer elektron dari satu serat karbon menuju serat karbon lainnya tidak dapat berjalan optimal. Terlihat juga bahwa matriks PP menyelubungi serat karbon dengan tingkat dispersi cukup tinggi. Kondisi ini membuat kontak permukaan antara sesama serat karbon untuk membentuk suatu *conductive path* tidak dapat terjadi karena serat karbon yang terselubungi oleh matriks PP. Hal ini tentu saja membuat elektron tidak dapat dihantarkan dengan optimal sehingga membuat nilai konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis nano komposit PP/CNT ini belum dapat memenuhi target yang ditetapkan oleh DOE USA.

## 5.6. Analisis Karakteristik Morfologi Patahan Tekuk Pelat Bipolar dengan SEM

Morfologi patahan tekuk pelat bipolar dapat dianalisis dengan bantuan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil karakterisasi patahan tekuk pelat bipolar berupa SEM *micrograph*. Dari tiga formula penelitian yang ada, pengamatan morfologi patahan tekuk dengan SEM hanya dilakukan pada dua formula penelitian saja, yaitu F1 dan F2. Pemilihan F1 dan F2 ini dikarenakan F1 merupakan formula penelitian yang menunjukkan nilai tertinggi dalam pengujian sifat mekanis sementara F2 merupakan formula penelitian yang menunjukkan nilai terendah dalam pengujian sifat mekanis. Tujuan dari pemilihan ini adalah untuk membandingkan secara langsung morfologi patahan tekuk pelat bipolar di antara kedua formula penelitian yang memiliki kontradiksi yang cukup besar dalam hal sifat mekanisnya.

Karakterisasi patahan tekuk dengan SEM ini dilakukan pada tiga titik pengamatan yang berbeda untuk setiap formula penelitian. Pada setiap titik pengamatan dilakukan pengambilan SEM *micrograph* dengan tiga perbesaran yang berbeda mulai dari perbesaran 100x, 250x dan 500x. Pada setiap formula penelitian juga dilakukan pengambilan SEM *micrograph* untuk mengkarakterisasi keberadaan CNT pada struktur mikro pelat bipolar. Pengambilan SEM *micrograph* untuk mengkarakterisasi keberadaan CNT dilakukan dengan perbesaran cukup tinggi, yaitu sekitar 50,000x hingga perbesaran 75,000x.

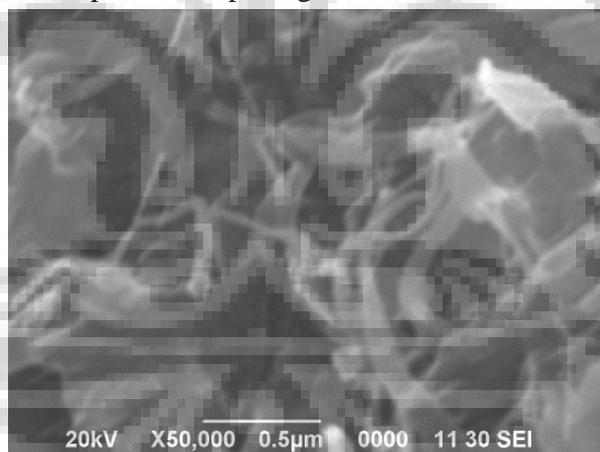
SEM *micrograph* untuk F1 pada titik pertama dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 5.21. SEM *Micrograph* F1 Pada Titik 1

Hasil pengamatan patahan tekuk F1 untuk titik 1 pada perbesaran 100x terlihat bahwa permukaan patahan tekuk membentuk suatu morfologi lembah. Pada perbesaran 500x terlihat adanya rongga (*void*) dengan bentuk memanjang sekitar 100  $\mu\text{m}$ . Pada perbesaran ini 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. Dari hasil pengamatan dapat terlihat bahwa matriks PP dengan bantuan PP-g-MA sebagai *coupling agent* dapat membasahi penguat serat karbon namun kekuatan ikat permukaan antara matriks PP dengan serat karbon tidak terlalu kuat. Hal ini akan berarti bahwa ketika pelat bipolar mengalami pembebanan mekanis seperti pembebanan tekuk maka transfer tegangan dari matriks PP ke penguat serat karbon tidak dapat berjalan secara efektif sehingga perpatahan mudah terjadi pada antarmuka matriks PP dan serat karbon.

SEM *micrograph* hasil karakterisasi keberadaan CNT pada struktur mikro pelat bipolar untuk F1 dapat dilihat pada gambar di bawah ini:

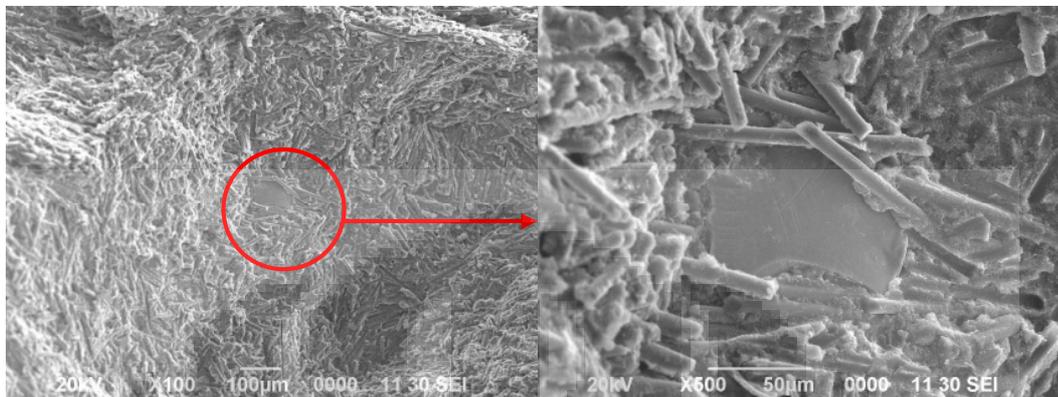


**Gambar 5.22.** SEM *Micrograph* CNT Pada F1 dengan Perbesaran 50,000x

Untuk mengkarakterisasi keberadaan CNT pada struktur mikro pelat bipolar dilakukan dengan mengarahkan detektor SEM pada bagian dasar lembah dari patahan tekuk pelat bipolar F1. Pengamatan dilakukan pada perbesaran 50,000x. Pada kondisi perbesaran ini terlihat morfologi struktur dari CNT dengan bentuk *closed spherical tube*. CNT yang teramati tidak berbentuk cukup sempurna.

CNT yang teramati tidak berada dalam bentuk tabung lurus namun berbentuk tabung melengkung.

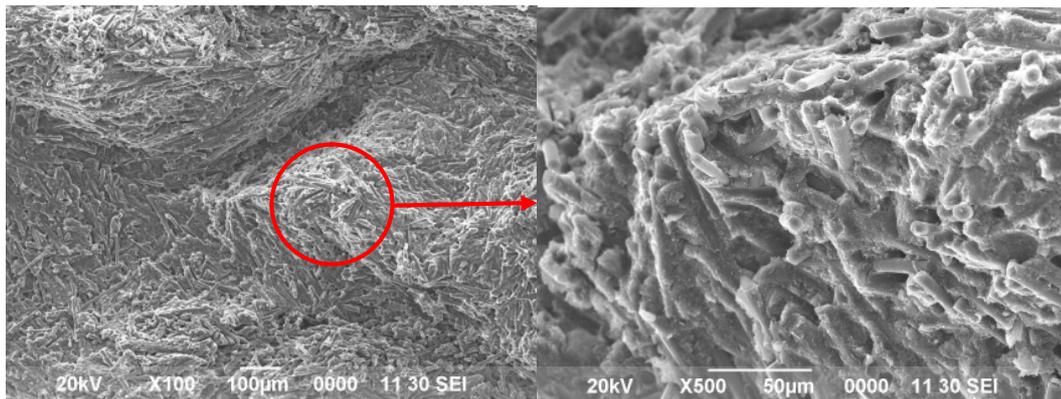
SEM *micrograph* untuk F1 pada titik kedua dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 5.23.** SEM *Micrograph* F1 Pada Titik 2

Pengamatan morfologi patahan tekuk F1 untuk titik 2 pada perbesaran 100x dan 500x terlihat adanya gumpalan matriks PP yang berbentuk tapal kuda dengan morfologi permukaan yang cukup datar. Gumpalan matriks PP ini memiliki diameter sekitar 75  $\mu\text{m}$ . Gumpalan matriks PP ini terbentuk sebagai akibat dari kurang maksimalnya proses pencampuran panas (*hot blending*) antara matriks PP dengan penguat serat karbon. Penggumpalan matriks PP ini menunjukkan bahwa pada proses pencampuran panas, matriks PP yang berbentuk granula pada awal proses tidak mengalami proses pendispersian secara efektif. Faktor lain yang dapat memicu terjadinya gumpalan matriks PP ini adalah daya ikat antara sesama rantai molekul PP yang cukup kuat sehingga pada saat proses pencampuran matriks PP dengan penguat serat karbon menyebabkan sejumlah matriks PP tidak dapat terdispersi dengan baik dalam struktur mikro komposit berbasis PP-karbon ini.

SEM *micrograph* untuk F1 pada titik ketiga dapat dilihat pada gambar di bawah ini:

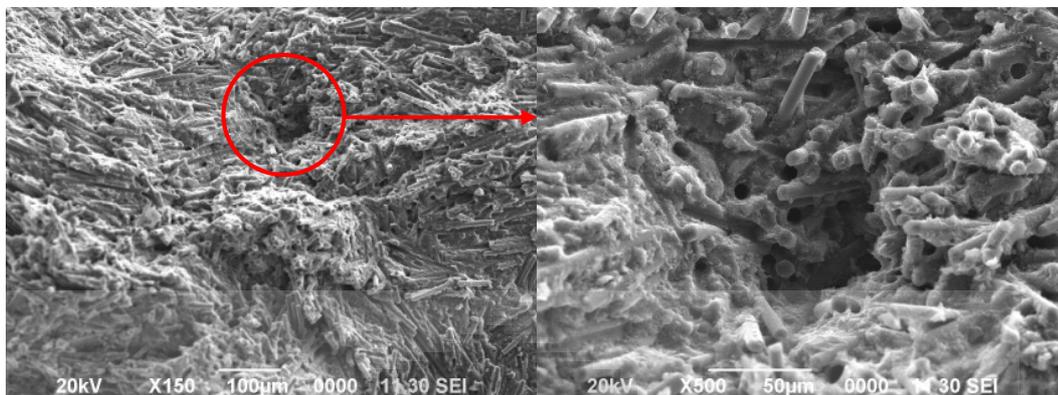


**Gambar 5.24.** SEM *Micrograph* F1 Pada Titik 3

Pengamatan morfologi patahan tekuk F1 pada titik 3 dengan perbesaran 100x terlihat adanya morfologi lembah dengan bentuk memanjang. Kondisi ini mengindikasikan adanya penjalaran retak yang cukup panjang ketika pelat bipolar mengalami pembebanan tekuk. Penjalaran retak atau propagasi retak ini dapat terjadi sebagai akibat menyatunya rongga-rongga mikro (*microvoids*) ketika pembebanan mekanis diaplikasikan. Sementara pada perbesaran 500x terlihat bahwa pembasahan matriks PP terhadap penguat serat karbon sudah cukup baik. Namun pada perbesaran 500x ini terlihat dengan jelas bahwa masih ada sejumlah serat karbon yang tercabut dari matriks PP. Hal ini mengindikasikan bahwa walaupun pembasahan antara matriks PP dengan serat karbon sudah cukup baik namun pembasahan tersebut hanya bersifat kontak permukaan saja dan tidak menghasilkan ikatan kimia antara matriks PP dengan serat karbon.

Secara keseluruhan morfologi patahan tekuk pelat bipolar untuk F1 sudah cukup baik. Hal ini terlihat pembasahan matriks PP yang sudah cukup baik terhadap penguat serat karbon serta jumlah dan distribusi rongga-rongga mikro (*microvoids*) yang cukup rendah dalam struktur mikro pelat bipolar. Cacat yang terdapat pada patahan tekuk pelat bipolar untuk F1 ini berupa adanya gumpalan matriks PP dengan kuantitas yang sedikit dan ukuran yang relatif kecil. Pada SEM micrograph juga termati bahwa tidak adanya kontak yang baik antara serat karbon sebagai penguat. Kondisi ini tentu saja membuat sifat konduktivitas listrik pelat bipolar masih cukup rendah karena tidak adanya struktur ikatan antara sesama serat karbon sebagai bahan konduktif yang dapat menghantarkan elektron.

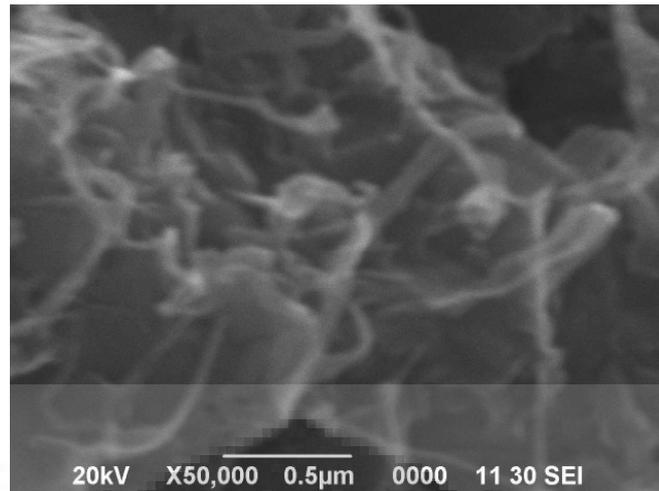
SEM *micrograph* untuk F2 pada titik pertama dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 5.25.** SEM *Micrograph* F2 Pada Titik 1

Pengamatan morfologi patahan tekuk F2 pada titik 1 dengan perbesaran 100x terlihat adanya rongga-rongga mikro (*microvoids*) dengan jumlah yang cukup banyak dan distribusi yang cukup merata. Selanjutnya detektor SEM diarahkan pada salah satu rongga dengan ukuran yang cukup besar dan pengamatan dilakukan pada perbesaran 500x. Pada SEM *micrograph* dengan perbesaran 500x ini terlihat adanya struktur menyerupai sarang lebah di mana pada daerah rongga (*void*) ini terdapat banyak serat karbon yang terlepas atau tercabut dari matriks PP. Banyaknya serat karbon yang tercabut ini membuat sifat mekanis pelat bipolar untuk F2 ini rendah. Hal ini berarti bahwa transfer tegangan tidak berjalan optimal karena serat karbon sebagai penguat dan penerima tegangan dari matriks PP sudah tercabut terlebih dahulu dari matriks PP. Hal ini merupakan akibat dari tidak adanya ikatan kimia antara matriks PP dengan serat karbon sehingga serat karbon dapat tercabut dengan mudah.

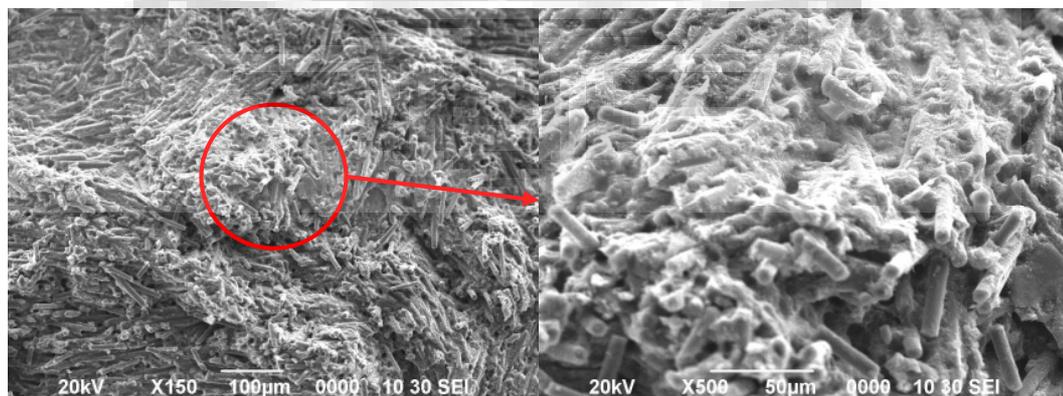
SEM *micrograph* hasil karakterisasi keberadaan CNT pada struktur mikro pelat bipolar untuk F2 dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 5.26.** SEM *Micrograph* CNT Pada F2 dengan Perbesaran 50,000x

Pada F2 untuk mengkarakterisasi keberadaan CNT pada struktur mikro pelat bipolar dilakukan dengan mengarahkan detektor SEM pada bagian dasar rongga-rongga mikro (*microvoids*) patahan tekuk pelat bipolar F2. Pengamatan dilakukan pada perbesaran 50,000x. Pada kondisi perbesaran ini terlihat morfologi struktur dari CNT dengan bentuk *closed spherical tube*. CNT yang teramati tidak terlalu jelas. Hasil pengamatan juga menunjukkan bahwa CNT tidak berbentuk cukup sempurna. CNT yang teramati tidak berada dalam bentuk tabung lurus namun berbentuk tabung melengkung yang terselubung di antara matriks PP dan penguat serat karbon.

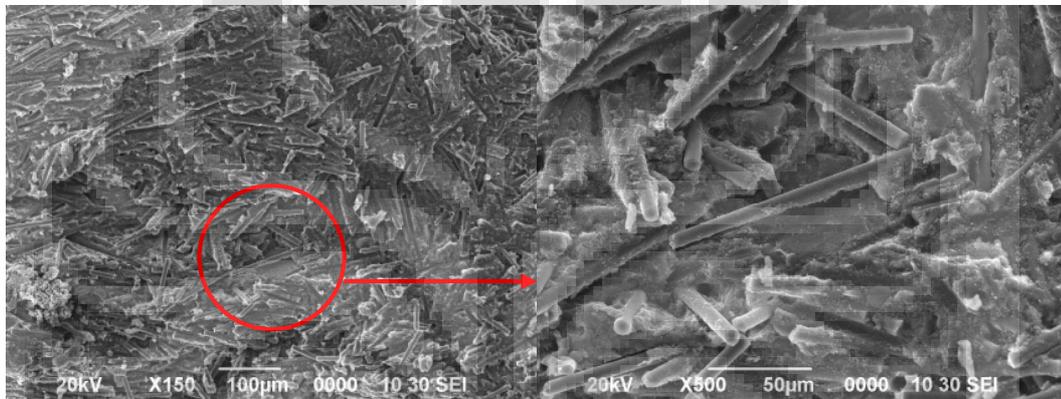
SEM *micrograph* untuk F2 pada titik kedua dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 5.27.** SEM *Micrograph* F2 Pada Titik 2

Pengamatan morfologi patahan tekuk F2 pada titik 2 dengan perbesaran 100x terlihat adanya gumpalan dari matriks PP serta banyaknya rongga-rongga mikro (*microvoids*). Pada perbesaran 500x 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. Orientasi dan susunan serat karbon cukup acak dan tidak terbentuk ikatan antara sesama serat karbon. Pada perbesaran ini juga terlihat adanya serat karbon yang tercabut dari matriks PP serta adanya gumpalan dari matriks PP dengan ukuran yang kecil.

SEM *micrograph* untuk F2 pada titik ketiga dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 5.28.** SEM *Micrograph* F2 Pada Titik 3

Pengamatan morfologi patahan tekuk F2 pada titik 3 dengan perbesaran 100x terlihat banyaknya serat karbon yang tercabut atau terlepas dari matriks PP. Pada perbesaran 500x jelas termati bahwa orientasi serat karbon di dalam komposit PP-karbon ini bersifat acak atau tidak teratur. Dapat diamati juga bahwa tidak adanya kontak atau hubungan yang cukup baik antara sesama serat karbon yang berdekatan. Pada perbesaran ini juga termati adanya gumpalan matriks PP dengan morfologi permukaan yang cukup datar dan ukuran diameter sekitar 50 µm.

Secara keseluruhan dapat dikatakan bahwa morfologi patahan tekuk pelat bipolar untuk F2 tidak terlalu baik. Kondisi ini dapat terlihat dari banyaknya rongga-rongga mikro (*microvoids*) dengan distribusi yang cukup merata, banyaknya serat karbon yang tercabut dari matriks PP, orientasi serat karbon yang sangat tidak teratur (acak) di dalam matriks PP serta tidak adanya kontak antara

sesama serat karbon yang berdekatan. Kondisi ini tentu saja membuat sifat mekanis dari pelat bipolar untuk F2 ini cukup rendah karena ketika pelat bipolar mengalami pembebanan mekanis maka transfer tegangan dari matriks PP menuju penguat serat karbon tidak berjalan optimal sehingga perpatahan mudah terjadi.

Sebagai perbandingan nilai hasil pengujian dan karakterisasi terhadap seluruh formula penelitian dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 5.3.** Kompilasi Hasil Pengujian dan Karakteristik Keseluruhan Formula

Parameter	Satuan	F1	F2	F3
<i>Ultimate Tensile Strength (UTS)</i>	MPa	15.54	14.21	15.14
<i>Elongation at Break</i>	%	0.34	0.32	0.35
Kekuatan Tekuk	MPa	35.06	26.66	30.40
Modulus Elastisitas	GPa	9.76	8.26	8.27
Densitas	gram/cm <sup>3</sup>	1.42	1.44	1.45
Porositas	%	3.63	2.37	2.16
Konduktivitas Listrik	S/cm	15.432	1.205	1.414

## BAB 6 KESIMPULAN

### VI.1. Kesimpulan

Berdasarkan data hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan maka dapat ditarik beberapa kesimpulan dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Penambahan fraksi volume penguat *carbon nanotube* (CNT) memiliki pengaruh yang cukup signifikan dalam meningkatkan sifat mekanis dan sifat konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis nano komposit PP/C-CNT.
2. Nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) tertinggi adalah sebesar 15,14 MPa untuk F3 (penambahan 0,5 wt% CNT) dan nilai UTS terendah adalah sebesar 14,21 MPa untuk F2 (penambahan 0,25 wt% CNT).
3. Nilai elongasi tertinggi adalah sebesar 0,35% untuk F3 (penambahan 0,5 wt% CNT) dan nilai elongasi terendah adalah sebesar 0,32% untuk F2 (penambahan 0,25 wt% CNT).
4. Nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) tertinggi adalah sebesar 35,06 MPa untuk F1 (penambahan 0,1 wt% CNT) dan nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) terendah adalah sebesar 26,66 MPa untuk F2 (penambahan 0,25 wt% CNT). Nilai kekuatan tekuk yang dimiliki oleh pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian sudah memenuhi target kekuatan tekuk yang harus dimiliki oleh pelat bipolar PEMFC sesuai dengan target DOE, yaitu sebesar 25 MPa.
5. Nilai modulus elastisitas tertinggi adalah sebesar 9,76 GPa untuk F1 (penambahan 0,1 wt% CNT) dan nilai modulus elastisitas terendah adalah sebesar 8,26 GPa untuk F2 (penambahan 0,25 wt% CNT).
6. Nilai densitas terendah adalah sebesar 1,423 gram/cm<sup>3</sup> untuk F1 (penambahan 0,1 wt% CNT) dan nilai densitas tertinggi adalah sebesar 1.448 gram/cm<sup>3</sup> untuk F3 (penambahan 0,5 wt% CNT).
7. Nilai porositas terendah adalah sebesar 2,16 % untuk F3 (penambahan 0,5 wt% CNT) dan nilai porositas tertinggi adalah sebesar 3,63% untuk F1 (penambahan 0,1 wt% CNT).

8. Nilai konduktivitas listrik *in-plane* tertinggi adalah sebesar 15,432 S/cm untuk F1 (penambahan 0,1 wt% CNT) dan nilai konduktivitas listrik *in-plane* terendah adalah sebesar 1,205 S/cm untuk F2 (penambahan 0,25 wt% CNT).
9. PP-g-MA yang berperan sebagai *compactibilizer* dalam nano komposit PP/C-CNT mampu meningkatkan kemampuan pembasahan (*wetability*) dari matriks PP terhadap penguat serat karbon namun masih belum dapat menjembatani ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) secara optimal.

## VI.2. Saran

Saran dan rekomendasi yang dapat diberikan oleh penulis untuk penelitian lanjutan mengenai pembuatan pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC ini adalah sebagai berikut:

1. Polipropilena (PP) yang dijadikan sebagai matriks dalam pembuatan komposit PP/karbon harus memiliki nilai derajat kristanilitas yang rendah sehingga mampu membentuk lebih banyak *conductive path* yang berperan sebagai jalur penghantar pergerakan elektron dalam komposit PP/karbon yang pada akhirnya akan meningkatkan nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar.
2. Fraksi volume penguat grafit yang digunakan dalam pembuatan komposit PP/karbon harus ditingkatkan sebagai partikel konduktif yang dapat membentuk *conductive path* sehingga dapat meningkatkan konduktivitas listrik pelat bipolar.
3. Diperlukan suatu perlakuan khusus (*special treatment*) terhadap partikel penguat grafit dan serat karbon sebelum dilakukan pencampuran panas (*hot blending*) sehingga dapat membentuk suatu jaringan karbon aktif saat pencampuran yang pada akhirnya dapat meningkatkan nilai konduktivitas listrik pelat bipolar.
4. Pengujian nilai konduktivitas aktual dari serat karbon perlu dilakukan untuk dapat merancang formula penelitian lebih baik lagi. Hambatan terbesar dalam pengujian nilai konduktivitas aktual dari serat karbon adalah tidak dapat dijepit pada *probes* karena sifat serat karbon yang sangat rapuh walaupun sudah dilakukan kompaksi. Oleh karena itu diperlukan metode *sintering*

tertentu untuk meningkatkan kekuatan ikat antara serat karbon sehingga dapat dilakukan pengujian nilai konduktivitas listrik aktual.

5. Diperlukan penambahan fraksi volume penguat karbon hitam (*carbon black*) dengan jumlah tidak terlalu besar untuk dapat menjembatani ikatan antara penguat serat karbon dengan penguat grafit serta sebagai partikel pengisi (*filler*) untuk dapat mengisi rongga-rongga mikro (*microvoids*) sehingga dapat mereduksi porositas dari pelat bipolar dan meningkatkan transfer tegangan dari matriks ke penguat karbon.
6. Waktu pencampuran panas (*hot blending*) selama 15 menit perlu dipertahankan untuk menghasilkan pencampuran yang optimal dengan tingkat distribusi dan dispersi seluruh partikel yang cukup tinggi di dalam *masterbatch*.
7. Spesimen pengujian konduktivitas listrik harus dilakukan preparasi terlebih dahulu sebelum dilakukan pengujian. Preparasi dilakukan dengan cara pengamplasan (*grinding*) dengan kertas amplas grade halus sehingga lapisan matriks PP yang terdapat pada permukaan pelat bipolar dapat terkikis secara optimal serta dihasilkan permukaan spesimen yang datar, rata dan halus. Selanjutnya spesimen dibilas dengan *acetone* untuk memastikan sisa partikel pengamplasan dan produk pengamplasan yang ada pada permukaan pelat bipolar dapat dibersihkan.
8. Pengujian konduktivitas listrik dapat dilakukan secara tidak langsung melalui perhitungan nilai tahanan jenis ( $\rho$ ) yang juga dapat diukur dengan instrumen LCR meter.
9. Pengujian konduktivitas listrik dengan instrumen LCR meter terlebih dahulu harus dilakukan pengamplasan terhadap penjepit spesimen yang terbuat dari bahan tembaga. Pengamplasan pada bagian ini penting untuk mengikis lapisan oksida yang terbentuk pada penjepit tembaga yang dapat mengurangi akurasi pengukuran.
10. Sebelum spesimen pengujian konduktivitas listrik dipasang pada penjepit spesimen terlebih dahulu spesimen harus dibungkus dengan kertas karbon untuk meningkatkan transfer muatan elektron dari bagian penjepit atau *probes* menuju ke spesimen uji.

11. Pengujian konduktivitas listrik dengan metode *four points probes* sebaiknya dilakukan minimal 5 titik untuk setiap spesimen agar dapat dianalisis kecenderungan distribusi dari persebaran data.
12. Spesimen pengujian konduktivitas listrik dengan metode *four points probes* sebaiknya dibuat setipis mungkin dengan ukuran ketebalan kurang dari 2 mm untuk mendapatkan hasil pengujian yang lebih akurat.
13. Alternatif pengujian nilai konduktivitas listrik pelat bipolar selain dengan instrumen LCR meter ataupun *four points probes* dapat dilakukan dengan menggunakan *electrometer* sesuai dengan standarisasi ASTM C611.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] <http://www.energi.lipi.go.id/utama.cgi?cetakartikel&1123717100> diakses pada 30/04/10
- [2] <http://id.shvoong.com/exact-sciences/physics/1837410-sumber-energi-alternatif/> diakses pada 30/04/10
- [3] <http://www.esdm.go.id/berita/geologi/42-geologi/3450-gas-biogenik-sumber-energi-alternatif-.html> diakses pada 30/04/10
- [4] <http://www.energi.lipi.go.id/utama.cgi?cetakartikel&1123717100> diakses pada 30/04/10
- [5] 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)
- [6] EG & G Services Parsons Inc, *Fuel Cell Handbook 7<sup>th</sup> Edition* (West Virginia: U.S. Departement of Energy, November 2004)
- [7] Zulfia, Anne. *Conductive Thermoplastic Composite Blends For Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells* (PEMFC). Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [8] 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, <http://etd.uwaterloo.ca/etd/y74wang2006.pdf> diakses pada 01/05/10.

[9] **Diktat Kuliah Material Polimer.** Dra. Sari Katili, M.S. dan Ir. Soemadi Agustinus. Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2008.

[10] **Diktat Kuliah Material Komposit.** Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M.Sc., Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2009.

[11] Bimanyu, Taufik Arya. “*Pengaruh Penambahan Tembaga Terhadap Sifat Mekanik Dan Konduktivitas Pelat Bipolar Komposit PP/C-Cu*”. 2009.

[12] 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/> diakses pada 22/08/10.

[13] 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> diakses pada 22/08/10.

[14] M. J. Ajersch dan M. W. Fowler, *Fuel Cell Science, Engineering and Technology* (2003)

[15] [http://www.vok.lth.se/~eep/eep-test/files/pdf/Fuel\\_Cell\\_Energy\\_Gases](http://www.vok.lth.se/~eep/eep-test/files/pdf/Fuel_Cell_Energy_Gases) diakses pada 23/08/10.

[16] K.S. Dhathathreyan and N. Rajalakshmi, *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, Journal of fuel cell.*

[17] H<sub>2</sub> & Fuel Cell Science & Technology Education. High Schools in New South Wales. <http://www.fuelcells.org.au/Fuel-Cell-Education-NSW-Australia.html>. diakses pada 23/08/10.

- [18] <http://journal.uui.ac.id/index.php/Teknoin/article/view/136/99> diakses pada 14/09/10.
- [19] D. P. Davies, et al., “Bipolar plate materials for solid polymer fuel cells”, *Journal of Applied Electrochemistry* (2000), 30.  
<http://www.springerlink.com/content/j38103237826366h/fulltext.pdf> diakses pada 16/09/10.
- [20] D. Hull and T.W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*, 2<sup>nd</sup> ed., Cambridge University Press, New York, 1996.
- [21] **Diktat Kuliah Teknologi Komposit.** Prof.Dr.Ir.Anne Zulfia, M.Sc., Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2010.
- [22] **Diktat Kuliah Material Mutahir.** Dr.Ir.Akhmad Herman Yuwono, M.Phil.Eng. Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok. 2008.
- [23] <http://id.wikipedia.org/wiki/Polipropilena> diakses pada 12/11/10.
- [24] <http://journal.uui.ac.id/index.php/Teknoin/article/view/136/99> diakses pada 12/11/10
- [25] Kirk Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4<sup>th</sup> edition Vol 6 (New York: John Wiley 1995)
- [26] D. Hull dan T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials 2<sup>nd</sup> Edition* (Cambridge: Cambridge University Press, 1996), hlm. 134 – 135, 154.
- [27] <http://id.wikipedia.org/wiki/Grafit> diakses pada 12/11/10

[28] **Diktat Kuliah Material Aditif.** Mochamad Chalid,S.Si.,M.Sc.Eng., Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2010.

[29] <http://id.wikipedia.org/wiki/carbonnanotubes> diakses pada 12/11/10

[30] Sugiyono (2007). Statistik untuk Penelitian, Jakarta, Alfabeta.

[31] <http://adityasetyawan.files.wordpress.com/2009/01/variable-penelitian-dan-definisi-operasional-variable2.pdf> diakses pada 28/08/10

[32] Moh nazir, Ph.d. Metode Penelitian, Penerbit Ghalia Indonesia, Jakarta, 2005.

[33] The Polyolefin Company. *Product Specification PP COSMOPLENE AH561.* <http://www.tpc.com.sg/>.

[34] <http://en.wikipedia.org/carbon-nano-tube.html> diakses pada 23/08/10

[35] Spesifikasi CNT. <http://www.timesnano.com/product/single-wall-carbon-nano-tube/specification.html>. diakses pada 24/08/10.

[36] **Standar Operasional dan Prosedur (SOP) Preparasi Sampel Pengujian Konduktivitas Listrik Bahan.** Laboratorium Listrik dan Kemagnetan. Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN). Serpong. 2009.

[37] Suharjanto, Yoghi. “*Komposit Konduktif PP/PP-g-MA/Karbon Untuk Aplikasi Pelat Bipolar Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells*”. 2009.

[38] **Standar Operasional dan Prosedur (SOP) Pengujian Konduktivitas Listrik Bahan dengan Instrumen LCR Meter.** Laboratorium Listrik dan Kemagnetan. Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN). Serpong. 2009.

- [39] [http://www.df.uba.ar/users/sgil/labo5\\_uba/guias/four\\_point\\_resi\\_ajp2k3.pdf](http://www.df.uba.ar/users/sgil/labo5_uba/guias/four_point_resi_ajp2k3.pdf)  
diakses pada 22/08/10.
- [40] **Buku Petunjuk Penggunaan Instrumen Four Point Probe**. Laboratorium Fuel Cells. Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). Serpong. 2008.
- [41] **Standar Operasional dan Prosedur (SOP) Penimbangan Zat**. Laboratorium Metalurgi Kimia. Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI. Depok. 2007.
- [42] **Buku Pedoman Praktikum Kimia Dasar 2009**. Laboratorium Metalurgi Kimia. Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI. Depok. 2009.
- [43] **Diktat Kuliah Mesin-Mesin Olah Plastik**. Dr.Ir.Dedi Priadi,DEA dan Ir. Soemadi Agustinus. Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok. 2009.
- [44] Abdillah, Nur Himawan. “*Pembuatan Komposit Pelat Bipolar Dengan Matriks Polipropilena Dengan Penguat Karbon dan Aditif Polivinylidene Fluoride (PVDF)*”. 2008.
- [45] **Standar Operasional dan Prosedur (SOP) Penggunaan Rheomix Haake 3000 dan Rheocord 90**. Laboratorium Pemrosesan Polimer. PT. Pertamina Laboratory and Technical Services. Pulogadung. 2008.
- [46] **Standar Operasional dan Prosedur (SOP) COLLIN P300P Hydraulic Hot Pressing**. Unit Preparasi Spesimen. Sentra Teknologi Polimer (STP) – Balai Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). Serpong. 2007.

[47] Adam, Hatta. “*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*”. 2008.

[48] **Diktat Praktikum Karakterisasi Material 1**. Laboratorium Metalurgi Fisik. Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok. 2009.

[49] **Hands Out Kuliah Karakterisasi Material 1 : Pengujian Mekanis**. Ir.Rahmat Saptono,M.Sc.Tech. Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok. 2009.

[50] **Hands Out Kuliah Karakterisasi Material 2 : Scanning Electron Microscope**. Dwi Marta Nurjaya,S.T.,M.T. Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok. 2010.

[51] **Hands Out Kuliah Karakterisasi Material 2 : Spectroscopy**. Dwi Marta Nurjaya,S.T.,M.T. Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok. 2010.

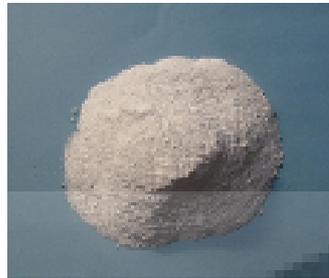
[52] **Hands Out Kuliah Mekanika Perpatahan**. Prof.Dr.Ir.Anne Zulfia,M.Sc. Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok. 2010.

[53] Shu-Hang Liao. Preparation and properties of carbon nanotube/polypropylene nanocomposite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 185 (2008) 1225–1232

[54] Gibran, Abi. Proposal Tugas Akhir : Studi Pengaruh Penambahan Fraksi Volume Penguat CNT Terhadap Sifat Mekanis dan Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar Berbasis Nano Komposit PP/C-CNT. Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok. 2010.



Lampiran 1  
Foto Bahan yang Digunakan



**Anti Oksidan**



**CNT**



**Karbon Serat**



**Tembaga**



**Grafit**



**Polypropylene**



**PP-g-MA**



**Seluruh Bahan**

Lampiran 2  
Formulasi Penelitian

Jenis Bahan	Satuan	F1	F2	F3
Polipropilena (PP)	%wt	13.9	13.75	13.5
	gram	69.5	68.75	67.5
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	0.1	0.25	0.5
	gram	0.5	1.25	2.5
<b>Total</b>	%wt	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
	<b>gram</b>	<b>500</b>	<b>500</b>	<b>500</b>

Lampiran 3  
 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Aktual Bahan  
 dengan *Four Point Probes* di P2F LIPI



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

Laporan Hasil Pengujian Material

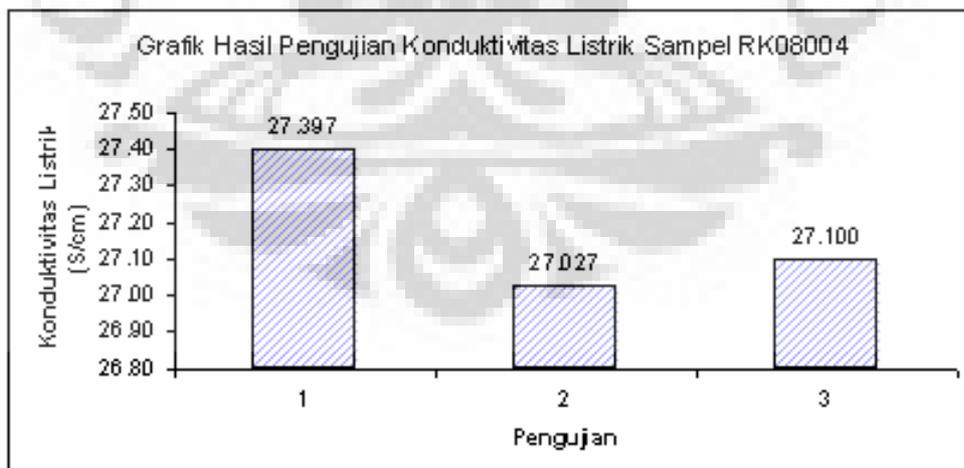
Metode Pengujian	: Four Point Probe	Operator	: Subhan
Nomor Sampel	: RK08004	Pemohon	: Abi Gibran
Jenis Sampel	: Grafit	Instansi	: FTUI
Jumlah Sampel	: 1 Unit	Keterangan	: Tugas Akhir
Preparasi Sampel	: Pressing	Laporan Pengujian	: OK

Pengukuran Dimensi Spesimen:

Parameter	Ketebalan	Diameter	Luas Kontak
Simbol	t	D	A
Nilai	2.30	25.00	491.07
Satuan	mm	mm	mm <sup>2</sup>

Pengukuran Nilai Resistansi dan Konduktivitas Spesimen:

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



## Lampiran 4

### 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**  
Dody Andri Winarto  
SENTRA TEKNOLOGI POLIMER

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 PUSPIPEK – 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 5

### Hasil Perhitungan Nilai Densitas

**Pengolahan Data Hasil Pengujian Densitas dan Porositas  
Pelat Bipolar Berbasis Nano Komposit PP/C-CNT  
Abi Gibran**

#### Pengujian Densitas

**Perhitungan Densitas Air ( $\rho$  air)**

Volume Air =  $V_{air} = 1000 \text{ ml} = 1 \text{ liter} = 1000 \text{ cm}^3$

Massa Beaker Glass =  $M_{beaker} = 330.45 \text{ gram}$

Massa Air + Beaker =  $M_{total} = 1316.03 \text{ gram}$

Massa Air =  $M_{air} = M_{total} - M_{beaker} = 1316.03 - 330.45 = 985.58 \text{ gram}$

Densitas Air =  $\rho_{air} = M_{air}/V_{air} = 985.58/1000 = 0.98558 \text{ gram/cm}^3$

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

Parameter	Massa Sampel di Udara	Massa Sampel di Air	Densitas Air	Densitas Sampel	Densitas Sampel Rata-Rata	
Simbol	$M_u$	$M_a$	$\rho_{air}$	$\rho_{sampel}$	$\rho_{sampel \text{ rata-rata}}$	
Satuan	gram	gram	gram/cm <sup>3</sup>	gram/cm <sup>3</sup>	gram/cm <sup>3</sup>	
F1	F1A	7.89	5.68	0.98558	1.36905	1.42314
	F1B	8.54	5.89	0.98558	1.42901	
	F1C	8.39	5.62	0.98558	1.47136	
F2	F2A	9.47	6.69	0.98558	1.39513	1.44311
	F2B	8.98	5.98	0.98558	1.48002	
	F2C	8.72	5.91	0.98558	1.45419	
F3	F3A	9.12	5.93	0.98558	1.51577	1.44827
	F3B	9.01	6.32	0.98558	1.40508	
	F3C	8.77	6.07	0.98558	1.42398	

## Lampiran 6

### Hasil Perhitungan Nilai Porositas

Pengolahan Data Hasil Pengujian Densitas dan Porositas  
Pelat Bipolar Berbasis Nano Komposit PP/C-CNT

Abi Gibran

#### PENGUJIAN POROSITAS

##### Rumus

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

Nilai  $\rho_{teoritis}$

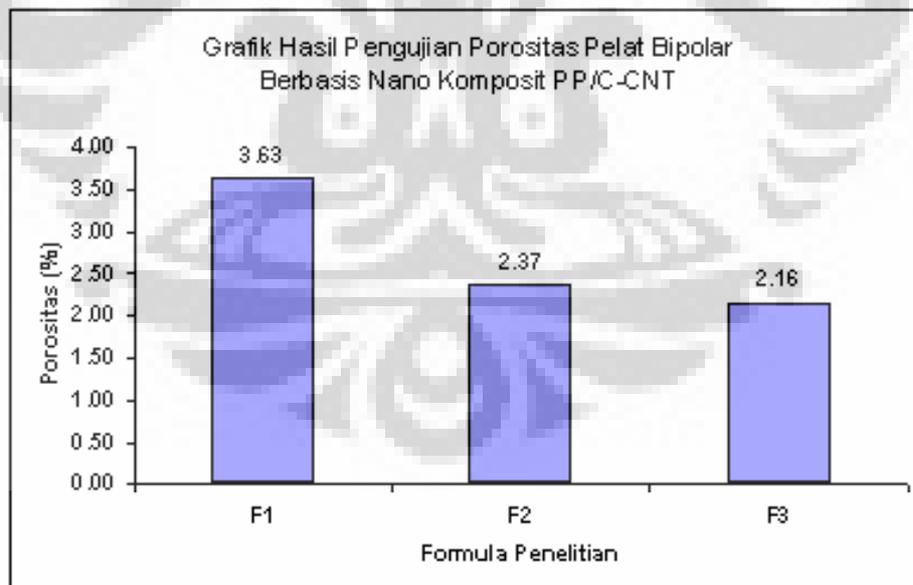
Formulasi	$\rho_{teoritis}$	Satuan
F1	1.4768	gram/cm <sup>3</sup>
F2	1.4781	gram/cm <sup>3</sup>
F3	1.4802	gram/cm <sup>3</sup>

Nilai  $\rho_{percobaan}$

Formulasi	$\rho_{percobaan}$	Satuan
F1	1.42314	gram/cm <sup>3</sup>
F2	1.44311	gram/cm <sup>3</sup>
F3	1.44827	gram/cm <sup>3</sup>

##### POROSITAS

Formulasi	Porositas	Satuan
F1	3.63	%
F2	2.37	%
F3	2.16	%



Lampiran 7  
 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar  
 dengan *Four Point Probes* di P2F LIPI



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

Laporan Hasil Pengujian Material

Metode Pengujian	: <i>Four Point Probe</i>	Operator	: Subhan
Jenis Sampel	: F1 PP/C-CNT	Pemohon	: Abi Gibran
	: F2 PP/C-CNT	Instansi	: Dept.Metalurgi FTUI
	: F3 PP/C-CNT	Preparasi Sampel	: -
Jumlah Sampel	: 3 Unit	Keterangan	: Penelitian S1

Pengukuran Dimensi Spesimen:

Parameter	Ketebalan	
	Nilai	Satuan
Sampel		
F1	2.20	mm
F2	2.40	mm
F3	2.25	mm

Pengukuran Nilai Resistansi dan Konduktivitas Spesimen:

Percobaan	Resistansi	Satuan	Konduktivitas	Satuan
F1	0.0648	$\Omega\text{cm}$	15.432	$\text{S/cm}$
F2	0.8300	$\Omega\text{cm}$	1.205	$\text{S/cm}$
F3	0.7070	$\Omega\text{cm}$	1.414	$\text{S/cm}$

