



UNIVERSITAS INDONESIA

STUDI PENGARUH PENAMBAHAN FRAKSI VOLUM PENGUAT
MULTI WALL CARBON NANO TUBES (MWCNT) TERHADAP
KONDUKTIVITAS LISTRIK DAN SIFAT MEKANIS MATERIAL
PELAT BIPOLAR BERBASIS NANOKOMPOSIT MWCNT/PP

SKRIPSI

M. EKADITYA ALBAR
0806331683

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JANUARI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

STUDI PENGARUH PENAMBAHAN FRAKSI VOLUM PENGUAT
MULTI WALL CARBON NANO TUBES (MWCNT) TERHADAP
KONDUKTIVITAS LISTRIK DAN SIFAT MEKANIS MATERIAL
PELAT BIPOLAR BERBASIS NANOKOMPOSIT MWCNT/PP

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

M. EKADITYA ALBAR
0806331683

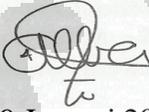
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JANUARI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : M.Ekaditya Albar

NPM : 0806331683

Tanda Tangan : 

Tanggal : 19 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : M.Ekaditya Albar
NPM : 0806331683
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi :

Studi Pengaruh Penambahan Fraksi Volum Penguat *Multi Wall Carbon Nano Tubes* (MWCNT) terhadap Konduktivitas Listrik dan Sifat Mekanis Material Pelat Bipolar Berbasis Nanokomposit MWCNT/PP

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. M. Chalid, S.Si., M.Sc. Eng. (.....)
Penguji 2 : Drs. Saeful Rohman, M.T. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 19 Januari 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-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.

Dalam proses penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa penulis mendapat dukungan yang sangat berharga dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang telah meridhai saya untuk menyelesaikan penulisan skripsi ini serta melancarkan segala urusan saya;
2. Kedua orang tua dan keluarga saya yang telah banyak memberikan dukungan materi dan moril kepada saya;
3. Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia Syahrial, M.Sc., selaku dosen pembimbing yang telah banyak menyediakan waktu, tenaga dan pemikiran dalam mengarahkan saya dalam melakukan penelitian dan penulisan skripsi ini;
4. Bapak Saeful Rohman dari Sentra Teknologi Polimer (STP) yang telah membantu dalam pemrosesan dan pengujian material;
5. Bapak Yurrohman dan Bapak Taufik dari Sentra Teknologi Polimer (STP) yang telah membantu dalam proses *hot pressing* dan pengujian tarik serta fleksural;
6. Saudari Fitri dari Sentra Teknologi Polimer (STP) yang telah membantu dalam proses pengamatan sampel hasil patahan fleksural dengan AFM;
7. Ibu Ir. Aniek S. Handayani, M.Si. dan Ibu Dede dari Laboratorium Kimia, Institut Teknologi Indonesia (ITI) yang telah membantu dalam pembuatan sampel dengan alat rheomix;
8. Ibu Dr. Ir. Verina J.Wargadalam, M.T. dan Bapak Harun dari Laboratorium *Fuel Cell*, P3TKEBT Kementerian ESDM yang telah membantu dalam penyediaan material PP-g-MA dan anti-oksidan;

9. Bapak Alfin dan Bapak Pujiyanto dari Laboratorium Afiliasi Kimia UI yang telah membantu proses pengujian FTIR;
10. Bapak Subhan dari Pusat Penelitian Fisika LIPI yang telah membantu proses pengujian konduktivitas listrik;
11. Bapak Ahmad Zakiyuddin dari Departemen Teknik Metalurgi dan Material yang telah membantu proses pengamatan sampel hasil patahan fleksural dengan SEM serta uji komposisi kimia dengan EDS;
12. Bapak Maman dari BATAN Serpong yang telah membantu proses pengamatan sampel *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT) dengan *High Resolution Scanning Electron Microscopy* (HR-SEM);
13. Para asisten Laboratorium Metalurgi Kimia, Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah membantu dalam proses persiapan sampel terutama Reyningtyas Putri;
14. Saudari Deagita Yolani, mahasiswa program studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA), Universitas Indonesia yang telah memberi masukan dalam proses analisa;
15. Teman-teman mahasiswa dan karyawan Departemen Teknik Metalurgi dan Material UI yang selalu memberikan dukungan dan perhatiannya kepada saya; dan
16. Bangkit Indriyana, sebagai pasangan, sahabat dan rekan suka dan duka dalam melaksanakan penelitian ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian dan penulisan skripsi ini. Saya menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat saya harapkan untuk perbaikan. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 19 Januari 2012

Penulis

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

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

Nama : M.Ekaditya Albar
NPM : 0806331683
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:

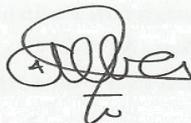
Studi Pengaruh Penambahan Fraksi Volum Penguat *Multi Wall Carbon Nano Tubes* (MWCNT) terhadap Konduktivitas Listrik dan Sifat Mekanis Material Pelat Bipolar Berbasis Nanokomposit MWCNT/PP

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 : 19 Januari 2012

Yang menyatakan,



(M.Ekaditya Albar)

ABSTRAK

Nama : M.Ekaditya Albar
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul :

Studi Pengaruh Penambahan Fraksi Volum Penguat *Multi Wall Carbon Nano Tubes* (MWCNT) terhadap Konduktivitas Listrik dan Sifat Mekanis Material Pelat Bipolar Berbasis Nanokomposit MWCNT/PP

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) adalah salah satu energi alternatif untuk menggantikan sumber energi fosil untuk aplikasi di industri otomotif. Pelat bipolar merupakan salah satu komponen penting di dalam PEMFC yang berfungsi untuk mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda ke katoda. Penelitian ini fokus terhadap masalah pemilihan material komposit dengan basis matriks polimer dan penguat karbon sebagai material pelat bipolar. Pembahasan utama dalam penelitian ini adalah menganalisa efek penambahan fraksi volum dari penguat *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT) dengan fraksi volum sebesar 0.1wt%, 0.5wt%, dan 1.0wt%. Karakterisasi yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi pengujian tarik, pengujian fleksural, pengujian kerapatan massa, pengujian porositas, pengujian konduktivitas listrik, analisa gugus fungsional dengan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), analisa komposisi kimia dengan menggunakan *Energy Dispersed Spectroscopy* (EDS) dan pengamatan permukaan patahan hasil pengujian fleksural dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Berdasarkan penelitian ini didapatkan hasil bahwa penambahan fraksi volum penguat MWCNT dapat meningkatkan kekuatan mekanis dan sifat-sifat fisiknya. Kekuatan tarik dan kekuatan tekuk meningkat hingga mencapai 10 MPa dan 32 MPa. Begitu pula dengan nilai konduktivitas listrik yang juga meningkat hingga mencapai 8.569 S/cm. Analisa permukaan patahan dengan SEM menunjukkan bahwa polimer membasahi dengan baik penguat karbon dan MWCNT.

Kata kunci:

Fuel cell, pelat bipolar, nanokomposit, *carbon nano tube*, PEMFC

ABSTRACT

Name : M.Ekaditya Albar
Study Program : Metallurgy and Material Science Engineering
Title :

Study of Influences of Addition Volume Fraction of Multi Wall Carbon Nano Tubes (MWCNT) Reinforcement to the Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Bipolar Plate Material Based on Nanocomposite MWCNT/PP

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) is one of alternative energy to replace fossil energy for automotive. Bipolar plate is one of the components in PEMFC constituted a 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 as bipolar plate material. The main discussion in this research is to analyse the addition of volume fraction of multi wall carbon nanotubes (MWCNT) reinforcement used from 0.1wt%, 0.5wt% to 1wt%. The material characterizations including tensile testing, flexural testing, density testing, porosity testing, electrical conductivity testing, functional groups analysis using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), chemical composition analysis using Energy Dispersed Spectroscopy (EDS) and observation of flexural fracture of bipolar plate using Scanning Electron Microscope (SEM). It is found that the effect of MWCNT addition has been increased both mechanical properties and physical properties. The tensile strength and flexural strength increased to 10 MPa and 32 MPa respectively while the electrical conductivity increased up to 8.569 S/cm. SEM analysis showed that polymer has been wetted well to carbon and MWCNT.

Key words:

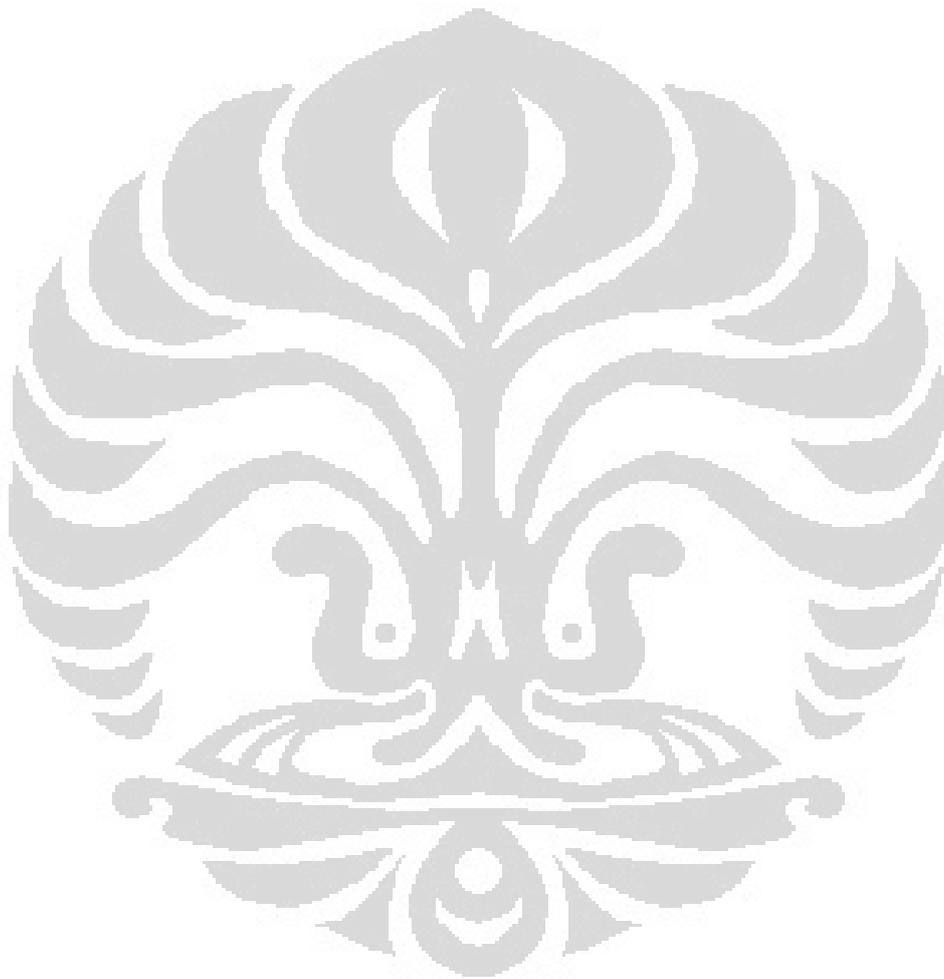
Fuel cell, bipolar plate, nanocomposite, carbon nano tube, PEMFC

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Permasalahan.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Hipotesis Penelitian.....	4
1.5. Ruang Lingkup Penelitian.....	4
1.6. Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Sel Bahan Bakar (<i>Fuel Cell</i>).....	7
2.2. <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i> (PEMFC).....	10
2.2.1. Keunggulan PEMFC.....	11
2.2.2. Keterbatasan PEMFC.....	11
2.2.3. Struktur PEMFC.....	12
2.3. Pelat Bipolar.....	13
2.4. Material Komposit.....	15
2.4.1. Sistem Material Komposit.....	16
2.4.2. Matriks Pada Komposit.....	16
2.4.3. Penguat (<i>Reinforcement</i>) Pada Komposit.....	17
2.4.4. Klasifikasi Material Komposit.....	18
2.5. Nano Komposit.....	19
2.6. Komposit Polimer Termoplastik.....	20
2.7. Polipropilen (PP).....	21
2.8. <i>Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride</i> (PP-g-MA).....	23
2.9. Serat Karbon.....	24
2.10. Grafit.....	25
2.11. Anti-oksidan.....	26
2.12. Karbon Hitam (Carbon Black).....	26
2.13. <i>Multiwall Carbon Nano Tube</i> (CNT).....	27

BAB 3	METODE PENELITIAN.....	30
3.1.	Diagram Alir.....	30
3.2.	Variabel Penelitian.....	31
3.2.1.	Variabel Bebas.....	32
3.2.2.	Variabel Terikat.....	32
3.2.3.	Variabel Terkontrol.....	33
3.3.	Formulasi dan Komposisi Material.....	33
3.4.	Material.....	34
3.4.1.	Polipropilen (PP).....	34
3.4.2.	<i>Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride</i> (PP-g-MA).....	35
3.4.3.	Serat Karbon	36
3.4.4.	Grafit	36
3.4.5.	Anti-Oksidan CN-CAT A215.....	37
3.4.6.	Karbon Hitam (<i>Carbon Black</i>).....	38
3.4.7.	<i>Multiwall Carbon Nano Tube</i> (MWCNT).....	38
3.5.	Peralatan.....	39
3.5.1.	Peralatan Preparasi Sampel Pengujian.....	39
3.5.2.	Peralatan Karakterisasi Sampel.....	40
3.6.	Prosedur Penelitian.....	42
3.6.1.	Penimbangan Bahan.....	42
3.6.2.	Pencampuran Panas (<i>Hot Blending</i>).....	42
3.6.3.	<i>Crushing</i> Hasil <i>Hot Blending</i>	47
3.6.4.	Pencetakan Panas dengan <i>Compression Moulding</i> ..	47
3.6.5.	Preparasi Spesimen Pengujian Tarik.....	49
3.6.6.	Preparasi Spesimen Pengujian Tekuk.....	49
3.6.7.	<i>Conditioning</i> Spesimen Pengujian Tarik dan Pengujian Tekuk.....	50
3.6.8.	Pengujian Tarik (<i>Tensile Testing</i>).....	50
3.6.9.	Pengujian Tekuk (<i>Flexural Testing</i>).....	51
3.6.10.	Pengujian Densitas dan Porositas.....	53
3.6.11.	Pengujian Konduktivitas Listrik Sampel dengan <i>Four Point Probe</i>	54
3.6.12.	Karakterisasi Patahan Tekuk dengan SEM dan EDS.....	56
3.6.13.	Karakterisasi Gugus Fungsi dengan FTIR.....	57
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	60
4.1.	Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT terhadap Konduktivitas Listrik Material Pelat Bipolar.....	60
4.2.	Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT terhadap Kekuatan Tarik dan % Elongasi Material Pelat Bipolar.....	66
4.3.	Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT terhadap Kekuatan Tekuk dan Modulus Kekakuan Material Pelat Bipolar.....	70
4.4.	Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT terhadap Nilai Densitas dan % Porositas Material Pelat Bipolar....	74

4.5. Analisa Permukaan Patahan Tekuk dan Komposisi Kimia Material Pelat Bipolar.....	79
4.6. Analisa Gugus Fungsi Material Pelat Bipolar.....	85
BAB 5 PENUTUP.....	88
5.1. Kesimpulan.....	88
5.2. Saran.....	89
DAFTAR PUSTAKA.....	91



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Perbedaan Jenis-Jenis <i>Fuel Cell</i>	9
Tabel 2.2. Komponen Utama Penyusun PEMFC.....	13
Tabel 2.3. Spesifikasi Material untuk Pelat Bipolar Ideal.....	15
Tabel 2.4. Karakteristik <i>Maleic Anhydride</i>	23
Tabel 2.5. Karakteristik <i>Carbon Nanotubes</i>	28
Tabel 3.1. Komposisi material pada setiap formulasi penelitian.....	34
Tabel 3.2. Sifat Polimer <i>Trilene HI10HO</i>	35
Tabel 3.3. Spesifikasi <i>Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride</i> (PP-g-MA).....	36
Tabel 3.4. Karakteristik Grafit.....	37
Tabel 3.5. Spesifikasi Anti-Oksidan CN-CAT B215.....	37
Tabel 3.6. Spesifikasi <i>Multiwall Carbon Nano Tube</i> (MWCNT).....	38
Tabel 3.7. Peralatan Preparasi Sampel Pengujian.....	39
Tabel 3.8. Peralatan Karakterisasi Sampel.....	41
Tabel 3.9. Parameter proses pencetakan panas (<i>hot pressing</i>).....	48
Tabel 3.10. Parameter proses pengondisian spesimen uji tarik dan uji tekuk.....	50
Tabel 3.11. Parameter Proses Pengujian Tarik.....	51
Tabel 4.1. Data Literatur Nilai Densitas Bahan.....	75
Tabel 4.2. Prediksi Nilai Densitas Pelat Bipolar Teoritis.....	76

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 2.1.	Skema <i>fuel cell</i> yang pertama kali digunakan oleh William Grove pada tahun 1893.....	7
Gambar 2.2.	Skema <i>Input</i> dan <i>Output Fuel Cell</i>	8
Gambar 2.3.	Skema Kerja PEMFC.....	10
Gambar 2.4.	Susunan PEMFC.....	12
Gambar 2.5.	Pelat Bipolar.....	14
Gambar 2.6.	Kekuatan Berbagai <i>Fiber Reinforcements</i>	18
Gambar 2.7.	Rumus Struktural Polipropilen.....	21
Gambar 2.8.	Jenis Isomerisme Stereo pada Polipropilen.....	22
Gambar 2.9.	Isomerisme Geometri pada Polipropilen.....	23
Gambar 2.10.	Struktur Molekul <i>Maleic Anhydride</i>	24
Gambar 2.11.	Proses Pembuatan Serat Karbon dari PAN dan <i>Pitch</i>	25
Gambar 2.12.	Gugus fungsi yang dimiliki karbon hitam.....	27
Gambar 2.13.	Perbandingan antara SWCNT (A) dan MWCNT (B).....	28
Gambar 3.1.	Diagram alir preparasi dan fabrikasi sampel pelat bipolar.....	30
Gambar 3.2.	Diagram alir karakterisasi dan pengujian sampel pelat bipolar.....	31
Gambar 3.3.	Skema metode <i>three-point bending test</i>	52
Gambar 3.4.	Komponen <i>scanning electron microscope</i> (a) dan interaksi <i>electron beam</i> dengan sampel (b).....	56
Gambar 3.5.	Skema Pengujian FTIR.....	58
Gambar 4.1.	Grafik Perbandingan Nilai Konduktivitas Listrik Material Pelat Bipolar.....	61
Gambar 4.2.	Grafik pengaruh konsentrasi <i>filler</i> terhadap konduktivitas komposit dengan matriks polimer.....	63
Gambar 4.3.	Skema <i>conductive paths</i> material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP pada matriks polimer dengan kristalinitas rendah (a), matriks polimer dengan kristalinitas tinggi (b) dan matriks polimer dengan kristalinitas medium sesuai pendekatan penelitian (c).....	64
Gambar 4.4.	Mekanisme <i>conductive paths</i> pada pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP pada (a) MWCNT yang terdistribusi secara seragam dan (b) MWCNT yang membentuk agregat.....	65
Gambar 4.5.	Grafik Perbandingan Nilai <i>Kekuatan Tarik</i> Material Pelat Bipolar.....	67
Gambar 4.6.	Grafik Perbandingan Nilai % Elongasi Material Pelat Bipolar.....	69
Gambar 4.7.	Pengaruh adanya <i>stress concentrator</i> terhadap aliran tegangan (a) tanpa <i>stress concentrator</i> dan (b) dengan adanya <i>stress concentrator</i>	70

Gambar 4.8.	Grafik Perbandingan Nilai Kekuatan Tekuk Material Pelat Bipolar.....	71
Gambar 4.9.	Grafik Perbandingan Nilai Modulus Elastisitas Material Pelat Bipolar.....	73
Gambar 4.10.	Grafik Perbandingan Nilai % Elongasi dan Modulus Kekakuan Material Pelat Bipolar.....	74
Gambar 4.11.	Grafik Perbandingan Nilai Densitas Material Pelat Bipolar.....	75
Gambar 4.12.	Grafik Perbandingan Nilai Densitas Material Pelat Bipolar secara Aktual dan Teoritis.....	76
Gambar 4.13.	Grafik Perbandingan Nilai % Porositas Material Pelat Bipolar.....	78
Gambar 4.14.	Permukaan patahan sampel F3 dengan menggunakan SEM (a) perbesaran 300x, (b) perbesaran 3.000x dan (c) perbesaran 10.000x.....	80
Gambar 4.15.	Morfologi dari MWCNT dengan alat HR-SEM (kiri) dan TEM (kanan).....	82
Gambar 4.16.	Hasil komposisi kimia material pelat bipolar dengan EDS pada seluruh area sampel.....	83
Gambar 4.17.	Hasil komposisi kimia material pelat bipolar dengan EDS pada fasa gelap.....	84
Gambar 4.18.	Hasil komposisi kimia material pelat bipolar dengan EDS pada titik terang.....	85
Gambar 4.19.	Hasil pengujian gugus fungsi dengan FTIR.....	86

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1** Jadwal Kegiatan Penelitian
- Lampiran 2** Formulasi dan Bahan Penelitian
- Lampiran 3** Hasil Pengujian Nilai Densitas dan Porositas
- Lampiran 4** Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik
- Lampiran 5** Hasil Pengujian Tekuk
- Lampiran 6** Hasil Pengujian Tarik
- Lampiran 7** Hasil Pengujian Komposisi Kimia dengan EDS
- Lampiran 8** Hasil Pengujian Gugus Fungsi dengan FTIR



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Ketergantungan masyarakat dunia terhadap energi dari bahan bakar fosil akan menjadi ancaman bagi kita sendiri. Hal ini dikarenakan sumber energi yang dijadikan tumpuan adalah sumber energi yang berasal dari fosil yang tersimpan di perut bumi dalam bentuk minyak bumi. Berbagai dampak negatif yang akan muncul apabila kita terus bergantung terhadap energi dari bahan bakar fosil adalah semakin menipisnya sumber-sumber minyak bumi jika tidak ditemukan sumber minyak yang baru dan meningkatnya polusi (CO₂) yang dihasilkan dari penggunaan energi dari bahan bakar fosil tersebut sehingga akan memicu efek rumah kaca. Oleh karena itu, perlu dibangun kepedulian masyarakat akan pentingnya energi dan terbatasnya sumber daya energi tersebut sehingga dapat memanfaatkannya secara efisien.

Selain penggunaan sumber daya energi secara efisien, 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 diantaranya 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*).

Berbagai pilihan sumber energi alternatif yang ada harus disesuaikan dengan kebutuhan dan sumber daya yang dimiliki oleh suatu negara. Namun, secara umum energi alternatif yang diinginkan adalah energi alternatif yang memenuhi kriteria-kriteria seperti: dapat digunakan berulang kali, ketersediaannya melimpah di alam, tidak berbahaya, aman, ramah lingkungan dan tidak menimbulkan berbagai penyakit. Untuk menemukan energi alternatif yang memenuhi semua kriteria tersebut tidaklah mudah. Dibutuhkan penelitian dan proses yang memakan waktu. Penelitian dan pengembangan teknologi ramah lingkungan terus diupayakan oleh berbagai negara di dunia, dan kini telah menghasilkan beberapa penemuan energi alternatif. Salah satu energi alternatif yang dapat memenuhi kriteria tersebut di atas adalah sel bahan bakar (*fuel cell*).

Sel bahan bakar (*fuel cell*) adalah pembangkit berupa sel bahan bakar yang menghasilkan listrik melalui proses elektrokimia dengan mengombinasikan gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2). Sel bahan bakar (*fuel cell*) menggunakan gas hidrogen (H_2) sebagai bahan bakarnya dan menghasilkan residu berupa uap air yang tidak mencemari udara. Gas hidrogen sendiri diperoleh dari berbagai cara yang cukup mudah dan murah, salah satunya dengan proses elektrolisis air.

1.2. Perumusan Permasalahan

Salah satu jenis *fuel cell* yang terus dikembangkan saat ini adalah jenis *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Pada proses pembuatan PEMFC, pelat bipolar merupakan salah satu bagian terpenting dari PEMFC yang memiliki biaya produksi tinggi. Pelat bipolar itu sendiri merupakan komponen utama dalam PEMFC yang berfungsi untuk mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda menuju katoda. Pelat bipolar ini berkontribusi sebesar 60% terhadap biaya produksi PEMFC dan berkontribusi sebesar 80% terhadap berat dari PEMFC^[1]. Dengan adanya permasalahan pada berat dan biaya produksi pelat bipolar dari PEMFC ini, maka perlu dilakukan penelitian agar pelat bipolar yang dihasilkan lebih ringan dan biaya produksi yang lebih murah. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mereduksi berat dan biaya fabrikasi pelat bipolar PEMFC adalah pengembangan material komposit berbasis matriks termoplastik^[2].

Salah satu alasan penggunaan material komposit berbasis matriks termoplastik ini adalah sifat material termoplastik yang ringan sehingga dapat mereduksi berat dari pelat bipolar PEMFC. Namun, masalah yang timbul dalam penggunaan material termoplastik sebagai matriks ini adalah nilai konduktivitas listrik yang rendah dan cenderung bersifat sebagai insulator listrik^[3]. Salah satu solusi untuk mengatasi adanya permasalahan tersebut adalah dengan menggunakan material penguat (*reinforcement*) yang dapat meningkatkan sifat konduktivitas listrik dari material pelat bipolar PEMFC. Selain dapat meningkatkan sifat konduktivitas listrik, adanya material penguat juga dapat meningkatkan sifat mekanis dari material pelat bipolar PEMFC.

Jenis-jenis material yang dapat digunakan sebagai penguat pada material pelat bipolar PEMFC antara lain serat karbon (*carbon fiber*), grafit, karbon hitam (*carbon black*) dan *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT). Material-material penguat yang digunakan tersebut memiliki konduktivitas dan sifat mekanis yang cukup baik sehingga dapat meningkatkan sifat-sifat dari material pelat bipolar PEMFC. Penggunaan MWCNT yang berukuran nano menjadikan material komposit ini tergolong material nanokomposit. Selain menggunakan berbagai penguat, material pelat bipolar PEMFC ini juga menggunakan beberapa aditif, seperti *polypropylene-grafted-maleated anhydrate* (PP-g-MA) dan anti oksidan CN-CAT A215, untuk meningkatkan performa dari material pelat bipolar. Penelitian ini akan mempelajari pengaruh penambahan fraksi volum penguat *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT) terhadap nilai konduktivitas listrik dan sifat mekanis dari nanokomposit untuk material pelat bipolar.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Menganalisa pengaruh penambahan fraksi volum penguat *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT) terhadap konduktivitas listrik dan sifat mekanis material pelat bipolar berbasis nanokomposit.
2. Mempelajari karakteristik dari material pelat bipolar berbasis nanokomposit yang difabrikasi dari kombinasi antara polipropilen (PP), *polypropylene-grafted-maleated anhydrate* (PP-g-MA), *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT), serat karbon, grafit, karbon hitam dan anti oksidan CN-CAT A215 apakah sudah mencapai target yang ditetapkan oleh *Department of Energy* (DOE) di Amerika Serikat tentang *fuel cell*^[2].
3. Menganalisa sifat-sifat fisik dan mekanis seperti konduktivitas listrik, kekuatan tarik, kekuatan tekuk, densitas, komposisi kimia, keberadaan gugus fungsi dan karakteristik patahan tekuk dari material pelat bipolar berbasis nanokomposit yang difabrikasi tersebut.

1.4. Hipotesis Penelitian

Penelitian-penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Shu-Hang Liao (2008) menunjukkan bahwa penambahan dan penyebaran *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT) yang baik dapat meningkatkan konduktivitas listrik, sifat mekanis dan stabilitas termal dari material pelat bipolar berbasis nano komposit MWCNT/PP^[3]. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Shu-Hang Liao ini juga menunjukkan bahwa adanya efek penambahan penguat grafit yang dapat meningkatkan sifat konduktivitas listrik dan kekuatan tekuk dari material pelat bipolar. Hasil yang diperoleh oleh Shu-Hang Liao ini juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Renato A. Antunes pada tahun 2010 dimana penggunaan berbagai jenis material penguat berbasis karbon (CNT, serat karbon, karbon hitam dan grafit) dapat mempengaruhi *electrical performance* dari pelat bipolar berbasis nanokomposit^[4-5]. Pada tahun 2010, Abi Gibran melakukan penelitian yang hampir sama dan mendapat kesimpulan bahwa penambahan fraksi volum penguat *carbon nano tubes* (CNT) dapat meningkatkan sifat mekanis dan sifat konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis nanokomposit PP/C-CNT^[6].

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka hipotesis dari penelitian ini adalah: “Penambahan fraksi volum penguat *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT) memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap peningkatan nilai konduktivitas listrik dan sifat mekanis dari material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP untuk aplikasi *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC)”.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

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

- a. Material-material yang digunakan dalam pembuatan material komposit pelat bipolar pada penelitian ini meliputi polipropilen (PP), *polypropylene-grafted-maleated anhydrate* (PP-g-MA), *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT), serat karbon, grafit, karbon hitam (*carbon black*) dan anti oksidan CN-CAT A215.

- b. Formulasi yang digunakan terdiri dari tiga formula, yaitu: F1, F2 dan F3 yang merupakan formulasi untuk variabel bebas dari fraksi volum penguat *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT) dengan besarnya masing-masing 0.1% wt, 0.5% wt dan 1% wt.
- c. Proses pencampuran dilakukan dengan metode pencampuran panas (*hot blending*) dengan temperatur proses 210°C dan waktu pencampuran awal 15 menit lalu dilanjutkan dengan pencampuran lanjutan selama 5 menit.
- d. Pembuatan sampel dilakukan dengan proses penekanan panas (*hot pressing*).
- e. Pembuatan dan pengujian sampel uji tarik dilakukan berdasarkan ASTM D3039 dan uji tekuk berdasarkan ASTM D790.
- f. Karakterisasi sampel meliputi pengujian konduktivitas listrik, kekuatan tarik, kekuatan tekuk, densitas, karakteristik patahan tekuk dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM), analisa komposisi kimia dengan alat *Energy Dispersed Spectroscopy* (EDS) dan analisa spektra infra merah gugus fungsi dengan menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).

1.6. Sistematika Penulisan

Skripsi ini terdiri dari lima bab, yaitu:

- **Bab 1 Pendahuluan**

Bab ini berisi latar belakang penelitian, perumusan permasalahan, tujuan penelitian, hipotesis penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

- **Bab 2 Tinjauan Pustaka**

Bab ini berisi studi literatur dan dasar teori yang berkaitan dengan penelitian ini.

- **Bab 3 Metode Penelitian**

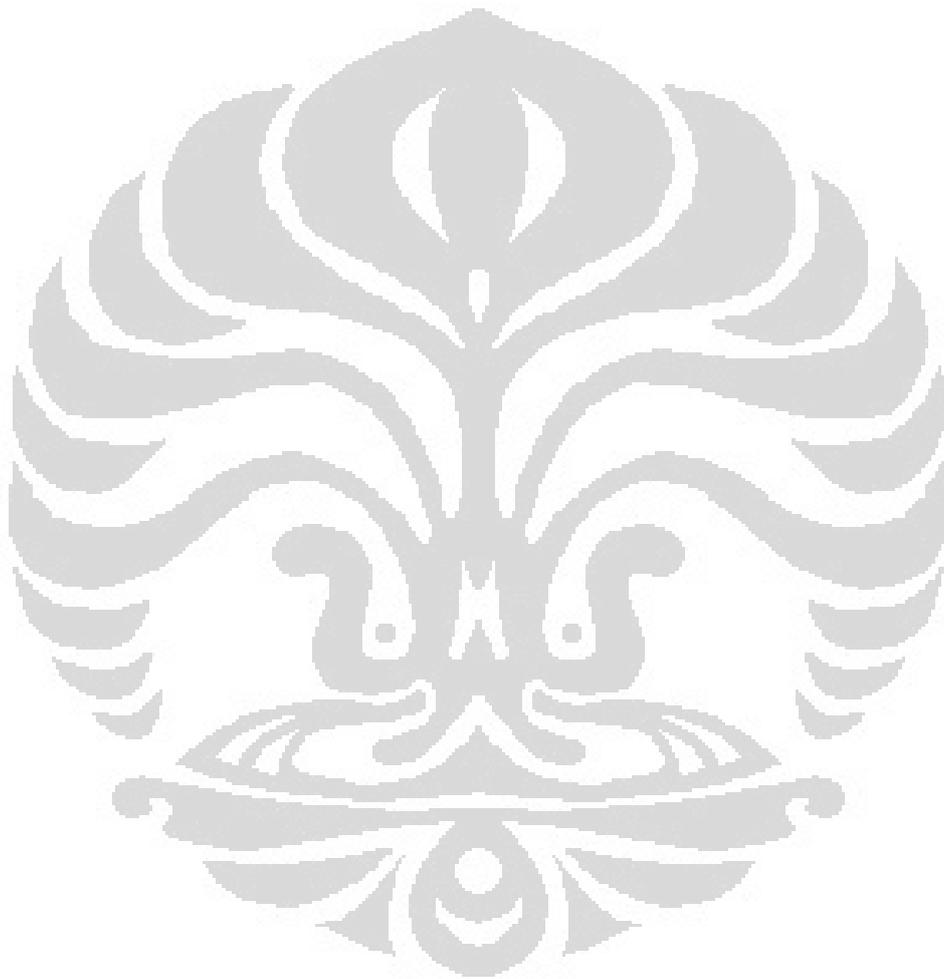
Bab ini berisi diagram alir penelitian, variabel penelitian, formulasi penelitian, komposisi material, spesifikasi dan karakteristik material, peralatan preparasi sampel pengujian, peralatan karakterisasi sampel dan prosedur penelitian secara detail.

- **Bab 4 Hasil dan Pembahasan**

Bab ini berisi data-data hasil penelitian beserta pembahasannya.

- **Bab 5 Penutup**

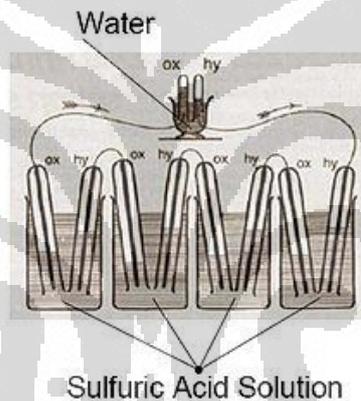
Bab ini berisi kesimpulan akhir berdasarkan pembahasan serta saran terhadap penelitian lanjutan.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sel Bahan Bakar (*Fuel Cell*)

Sel bahan bakar (*fuel cell*) adalah pembangkit berupa sel bahan bakar yang menghasilkan listrik melalui proses elektrokimia dengan mengombinasikan gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2)^[7]. Sel bahan bakar (*fuel cell*) sebenarnya sudah dikembangkan sejak tahun 1839 oleh William R. Grove dan kini sedang dikembangkan untuk mengatasi ketergantungan terhadap bahan bakar minyak yang semakin kritis^[8]. Sebagai suatu perangkat konversi energi, sel bahan bakar (*fuel cell*) merupakan salah satu perangkat energi alternatif yang cukup menjanjikan.



Gambar 2.1. Skema *fuel cell* yang pertama kali digunakan oleh William Grove pada tahun 1839^[9]

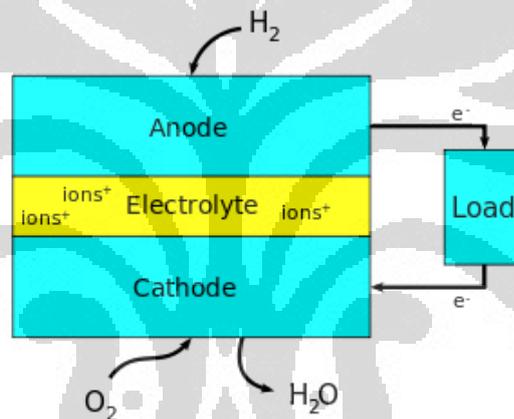
Prinsip kerja sel bahan bakar (*fuel cell*) merupakan kebalikan dari proses elektrolisis. Pada proses elektrolisis, energi listrik yang berasal dari *power supply* diubah menjadi reaksi kimia, sedangkan pada sel bahan bakar (*fuel cell*), kita mereaksikan gas hidrogen dengan gas oksigen sehingga menghasilkan energi listrik. Sel bahan bakar (*fuel cell*) menggunakan gas hidrogen (H_2) sebagai bahan bakarnya dan menghasilkan residu berupa uap air yang tidak mencemari udara. Gas hidrogen dapat berasal dari sinar matahari, sampah organik (*biomass*) ataupun dari angin^[10]. Sel bahan bakar (*fuel cell*) merupakan alat konversi energi yang dapat diisi ulang (*rechargeable*) dan juga dapat dibawa kemana-mana (*portable*)^[7]. 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.

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^[10]. Reaksi elektrokimia yang terjadi pada *fuel cell* dapat dirumuskan sebagai berikut^[7]:



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^[7]:



Gambar 2.2. Skema Input dan Output *Fuel Cell*^[7]

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^[11]:

- ❖ Bahan bakar lebih variatif (menggantikan bahan bakar fosil)
- ❖ Efisiensi energi yang cukup tinggi
- ❖ Ramah lingkungan (emisi rendah, tidak berisik, bebas emisi polutan udara)
- ❖ Hasil emisi berupa air yang tidak berbahaya
- ❖ Dapat dibawa-bawa (*portable*) fleksibel dan cukup tahan lama
- ❖ Dapat digunakan untuk beragam aplikasi penggunaan

Sel bahan bakar (*fuel cell*) memiliki banyak jenis dan spesifikasi. Berdasarkan jenis material yang diaplikasikan, jenis-jenis sel bahan bakar (*fuel cell*) dikenal dalam lima kategori^[10] yaitu *alkaline fuel cell* (AFC), *phosphoric acid fuel cell* (PAFC), *molten carbonate fuel cell* (MCFC), *solid oxide fuel cell* (SOFC), dan *polymer electrolyte fuel cell* (PEFC). Perbedaan dari jenis-jenis *fuel cell* tersebut dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

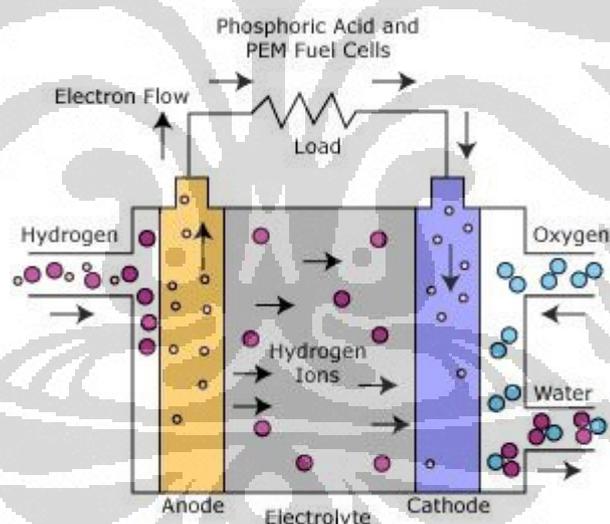
Tabel 2.1. Perbedaan Jenis-Jenis *Fuel Cell*^[12]

Parameter	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
<i>Electrolite</i>	<i>Perfluoro sulfonic acid</i>	<i>Aqueous solution of KOH soaked in a matrix</i>	<i>Phosphoric acid soaked in a matrix</i>	<i>Solution of Li₂CO₃, Na₂CO₃ and/or K₂CO₃ soaked in a matrix</i>	<i>Ytria stabilized zirconia</i>
<i>Operating Temperature</i>	50-100°C	90-100°C	150-200°C	600-700°C	700-1000°C
<i>Typical Stack Size</i>	<1kW-100kW	10-100kW	400kW	300kW-3MW	1kW-2MW
<i>Efficiency</i>	60% (<i>Transportation</i>) 30% (<i>Stationary</i>)	60%	40%	45-50%	60%
<i>Applications</i>	<i>Backup power</i> <i>Portable power</i> <i>Transportation</i> <i>Special vehicles</i>	<i>Military</i> <i>Space</i>	<i>Distributed generation</i>	<i>Electric utility</i>	<i>Auxiliary power</i>

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

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) atau juga dikenal sebagai *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)* adalah salah satu jenis sel bahan bakar yang terus dikembangkan untuk aplikasi transportasi, perangkat portabel, serta stasiun penghasil energi di masa depan karena memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan jenis sel bahan bakar lain. Aplikasi PEMFC saat ini dikhususkan pengembangannya dalam bidang transportasi untuk menggantikan bahan bakar minyak dan diesel.

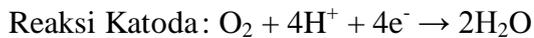
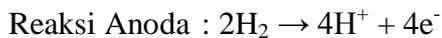
PEMFC merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang menggunakan membran pertukaran *solid state* untuk memisahkan elektrodanya. Membran ini pertama kali ditemukan oleh seorang ilmuwan yang bernama William Grubbs pada tahun 1959^[13]. Membran solid polimer yang berupa lapisan plastik tipis ini digunakan sebagai elektrolit dimana polimer ini *permeable* terhadap proton ketika jenuh dengan air namun tidak dapat menghantarkan elektron.



Gambar 2.3. Skema kerja PEMFC^[13]

PEMFC merupakan sumber energi alternatif yang sangat baik bila diaplikasikan pada alat transportasi, karena perangkatnya mudah didistribusikan dan mudah dibawa^[14]. Pada lima tahun terakhir, penelitian PEMFC mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Industri otomotif melakukan investasi melalui berbagai usaha dalam mengomersialisasikan PEMFC pada mobil dengan harapan mampu bersaing dengan kendaraan bermesin bakar internal^[15].

Mekanisme reaksi kimia yang terjadi pada satu sistem PEMFC adalah sebagai berikut^[7]:



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^[1]. Keunggulan yang dimiliki oleh PEMFC secara terperinci adalah sebagai berikut^[16]:

- ❖ PEMFC menggunakan elektrolit padat yang memberikan ketahanan yang baik terhadap gas.
- ❖ Suhu operasi PEMFC yang rendah ($< 100^\circ\text{C}$) 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

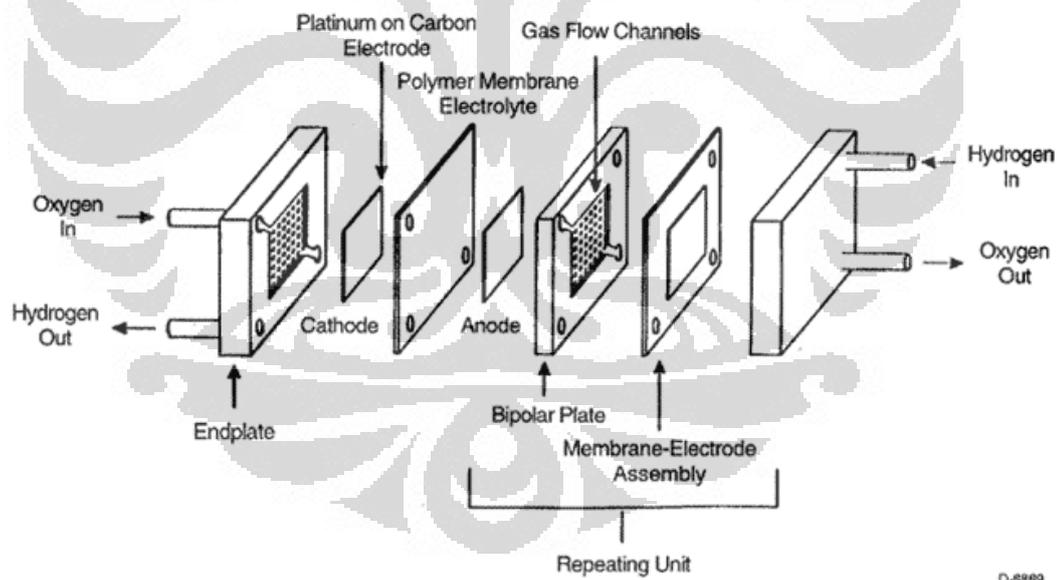
Secara umum biaya fabrikasi yang cukup tinggi untuk memproduksi *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) masih menjadi kendala utama untuk dapat memproduksi alat konversi energi alternatif ini. Oleh karena itu

diperlukan suatu inovasi dalam mendesain suatu proses fabrikasi dan pemilihan material yang tepat agar PEMFC ini dapat diproduksi dalam jumlah masal dengan harga cukup ekonomis. Sementara keterbatasan yang dimiliki oleh PEMFC adalah sebagai berikut^[12-13]:

- ❖ 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 2.4. Susunan PEMFC^[17]

Bagian-bagian penting dari *fuel cell* meliputi *Membrane Electrode Assembly* (MEA), *catalyst layer*, *gas diffusion layer* dan pelat bipolar^[3]. Material yang digunakan dan fungsi dari setiap komponen penyusun PEMFC dapat dilihat pada tabel di bawah ini^[18]:

Tabel 2.2. Komponen Utama Penyusun PEMFC^[18]

Komponen	Bahan Penyusun	Fungsi
<i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i>	Polimer solid dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda Kertas atau kain karbon berpori untuk <i>Gas Diffusion Layer (GDL)</i>	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.
<i>Catalyst Layer</i>	Lapisan serbuk platinum pada kain atau kertas karbon	Mempercepat proses reaksi yang terjadi (anoda atau katoda) di dalam <i>fuel cell</i> .
<i>Gas Diffusion Layer (GDL)</i>	GDL tersusun atas partikel karbon, pelarut alkohol dan <i>polytetrafluoroethylene (PTFE 60%)</i>	Penyangga lapisan katalis, sebagai distributor gas dan sebagai penghantar elektron.
Pelat Bipolar	Grafit, <i>stainless steel</i> , atau komposit polimer termoplastik	Mendistribusikan gas di bagian area aktif membran, mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda, membuang air keluar sel.

2.3. Pelat Bipolar

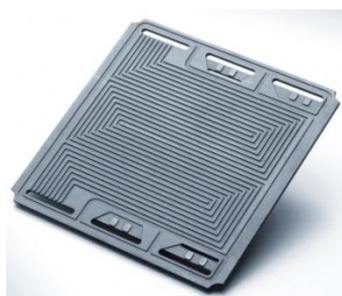
Pelat bipolar merupakan bagian yang memegang peranan utama dalam *fuel cell stacks*^[19]. Pelat bipolar itu sendiri merupakan komponen utama dalam

PEMFC yang berfungsi untuk mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda menuju katoda. Selain itu, pelat bipolar juga berfungsi untuk mengatur distribusi gas di dalam seluruh *cell*, mengatur manajemen residu air dari keseluruhan *cell*, memisahkan masing-masing *cell* di dalam sebuah *stack* dan membawa arus listrik dari *membrane electrode assemblies* (MEA)^[19].

Sebagai komponen utama dalam PEMFC, pelat bipolar berkontribusi sebesar 60% terhadap biaya produksi PEMFC dan berkontribusi sebesar 80% terhadap berat dari PEMFC^[1]. Dengan adanya permasalahan pada berat dan biaya produksi pelat bipolar dari PEMFC ini, maka perlu dilakukan penelitian agar pelat bipolar yang dihasilkan lebih ringan dan biaya produksi yang lebih murah.

Pelat bipolar ini berperan dalam mengumpulkan arus dari masing-masing *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang terletak di antara pelat anoda dan pelat katoda. Syarat utama material yang dapat dijadikan sebagai pelat bipolar adalah memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, kekuatan mekanis yang baik, ketahanan terhadap korosi yang baik dan ringan^[20-23].

Grafit murni merupakan material pertama yang digunakan sebagai pelat bipolar karena memiliki sifat konduktivitas termal dan listrik yang baik^[2]. Namun, adanya sifat getas dan proses fabrikasi yang memakan biaya yang besar menyebabkan penggunaan grafit murni sebagai material pelat bipolar menjadi tidak efisien^[24-25]. Beberapa jenis logam dan paduan seperti *stainless steel*^[26-28], aluminium^[29], nikel^[30], tembaga^[31], titanium^[32] dan baja karbon^[33] pernah digunakan sebagai material pelat bipolar. Penggunaan material logam dan paduan ini sebagai pelat bipolar belum dapat dimaksimalkan karena terkendala dengan massa yang terlalu besar dan kerentanan terhadap korosi (adanya lapisan oksida yang tidak konduktif) yang dapat menimbulkan masalah lain seperti munculnya gas beracun akibat produk korosi yang bereaksi dengan katalis^[2].



Gambar 2.5. Pelat Bipolar^[17]

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^[2]:

Tabel 2.3. Spesifikasi Material untuk Pelat Bipolar Ideal^[2]

Parameter	Standar Nilai
Berat	$< 0.4 \text{ Kg kW}^{-1}$
Kekuatan fleksural	$> 25 \text{ MPa}$
Fleksibilitas	3-5% <i>deflection</i> pada <i>mid-span</i>
Konduktivitas listrik	$> 100 \text{ S cm}^{-1}$
Konduktivitas termal	$> 10 \text{ W (mK)}^{-1}$
Permeabilitas gas	$< 2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ pada 80°C dan 3 atm
Ketahanan korosi	$< 1 \mu\text{Acm}^{-2}$

2.4. Material Komposit

Material komposit merupakan salah satu jenis material rekayasa yang terus berkembang dari masa ke masa. 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^[34]. 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^[34]. Dalam material komposit, proses kombinasi atau *mixing* yang terjadi antara dua jenis material tersebut hanya berlangsung secara fisik tanpa melibatkan reaksi kimia^[35].

Material komposit banyak dikembangkan sebagai material rekayasa karena memiliki beberapa 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^[34]:

- ❖ 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. Fraksi volum dari matriks dalam suatu komposit biasanya lebih besar dari pada fraksi volum fasa penguat. Namun, hal ini tidak menutup kemungkinan fasa matriks yang fraksi volumenya lebih rendah dibanding fraksi volum penguatnya. Kondisi ini biasanya ditemui pada sistem material komposit dimana matriksnya memiliki peranan utama sebagai pengikat (*binder*) dari fasa penguatnya. Fasa penguat (*reinforcement*) itu sendiri merupakan fasa *discontinuous* dalam komposit^[34].

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^[34]:

- ❖ Melindungi serat 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
- ❖ Menstabilkan proses pembekuan setelah proses manufaktur
- ❖ Memisahkan antara satu serat dengan serat lainnya
- ❖ Mencegah terjadinya perambatan retak (*crack propagation*) dari suatu serat ke serat lainnya

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^[34]:

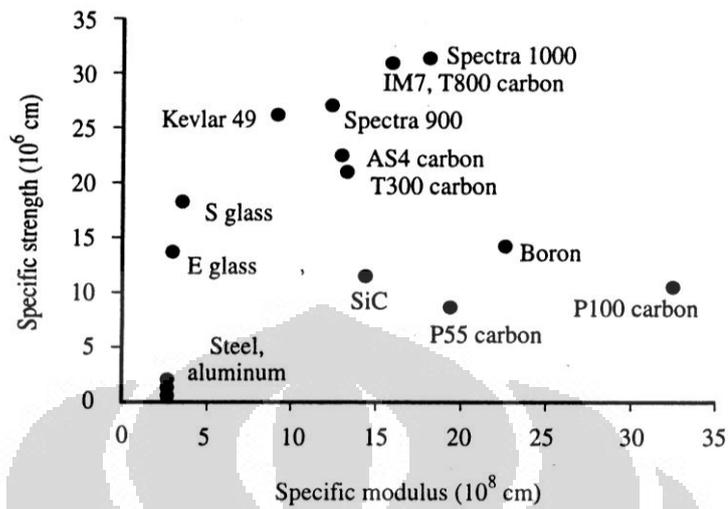
- ❖ Memiliki nilai keuletan (*ductility*) yang tinggi
- ❖ Memiliki nilai modulus elastisitas yang lebih rendah dari pada serat
- ❖ Mempunyai ikatan *interface* yang baik antara matriks dan serat
- ❖ Mampu membasahi serat (*wetability*) dengan baik

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 biasanya merupakan fasa dengan fraksi volum yang lebih rendah daripada fraksi volum 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^[34]:

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

Gambaran mengenai kekuatan berbagai *fibres reinforcement* dalam komposit adalah sebagai berikut^[36]:



Gambar 2.6. Kekuatan Berbagai *Fiber Reinforcements*^[36]

Persyaratan suatu material dapat dijadikan penguat (*reinforcement*) untuk material komposit adalah sebagai berikut^[34]:

- ❖ Memiliki diameter yang lebih kecil dari diameter *bulk* atau matriksnya.
- ❖ Memiliki kekuatan yang lebih tinggi dari *bulk* atau matriksnya

2.4.4. Klasifikasi Material Komposit

Sebagai suatu material rekayasa, material komposit memiliki beberapa parameter untuk mengklasifikasikannya. Klasifikasi dari material komposit adalah sebagai berikut:

- ❖ Material komposit berdasarkan sumber ketersediaannya
- ❖ Material komposit berdasarkan jenis penguat (*reinforcement*)
- ❖ Material komposit berdasarkan jenis matriksnya

Berdasarkan sumber ketersediaannya, material komposit dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu sebagai berikut^[34]:

- ❖ Komposit alam (*natural composite*)

Komposit alam (*natural composite*) merupakan material komposit yang komponen penyusunnya (biasanya seratnya) berasal dari alam^[34]. Contoh dari komposit alam antara lain kayu (tersusun atas selulosa sebagai penguat dan

lignin sebagai matriks) serta tulang manusia atau hewan, dimana protein dan kolagen berperan sebagai penguat dan *apatite* sebagai matriksnya.

❖ Komposit buatan (*artificial composite*)

Komposit buatan (*artificial composite*) adalah komposit yang dibuat atau disintesis oleh manusia melalui suatu proses *engineering*^[34]. Contoh komposit buatan adalah antara lain^[34] ban mobil, beton bertulang dan *fiber glass*.

Berdasarkan jenis penguatnya, material komposit dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu sebagai berikut^[34]:

- ❖ Komposit berpenguat partikel (berupa *large particle* atau *small particle*)
- ❖ Komposit berpenguat serat (berupa *continuous fibre* atau *discontinuous fibre*)
- ❖ Komposit berpenguat struktural (berupa *laminates* atau *sandwich panels*)

Berdasarkan jenis matriksnya, material komposit dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu sebagai berikut^[34]:

- ❖ *Metal Matrix Composite* (MMC): matriks berasal dari logam
- ❖ *Polymer Matrix Composite* (PMC): matriks berasal dari polimer
- ❖ *Ceramic Matrix Composite* (CMC): matriks berasal dari keramik

2.5. Nano Komposit

Kata “nano” berasal dari bahasa Yunani yang berarti *dwarf* atau kurcaci^[37]. Satuan nano berarti faktor pengali 10^{-9} dan dapat singkat sebagai *n*. Sebagai suatu istilah dalam dunia rekayasa material, 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 nanometer^[37]. Kombinasi material ini biasanya terdiri atas material induk yang berupa padatan anorganik yang mengandung komponen organik ataupun sebaliknya. Suatu material dapat dikatakan berada dalam struktur nano apabila salah satu dimensi ukurannya berada dalam skala nanometer seperti berikut ini^[38]:

- ❖ Nol dimensi (0D) contohnya partikel nano
- ❖ Satu dimensi (1D) contohnya *nanotubes*
- ❖ Dua dimensi (2D) contohnya *nanoscale film*

- ❖ Tiga dimensi (3D) contohnya *embedded network*.

2.6. Komposit Polimer Termoplastik

Komposit polimer merupakan suatu komposit yang menggunakan material polimer sebagai matriksnya. Keunggulan dari material polimer yang dijadikan sebagai matriks dalam komposit polimer adalah sebagai berikut^[3]:

- ❖ Harga yang relatif murah
- ❖ Memiliki fleksibilitas yang cukup tinggi
- ❖ Memiliki berat yang ringan
- ❖ Proses fabrikasi yang mudah

Klasifikasi material polimer dapat digolongkan menjadi empat^[39], yaitu:

- ❖ Berdasarkan asalnya (polimer alam dan polimer sintesis)
- ❖ Berdasarkan jumlah monomernya (homopolimer dan kopolimer)
- ❖ Berdasarkan struktur rantainya (rantai linear dan jaring silang)
- ❖ Berdasarkan respon terhadap panas

a. 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 polipropilen (PP), polietilena (PE), *Poly Vinyl Chloride* (PVC), polistirena (PS) dan lain sebagainya.

b. 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.

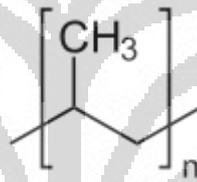
Selain beberapa keunggulan pemakaian material polimer sebagai matriks dari sistem komposit, terdapat beberapa keterbatasan yang dimiliki oleh polimer termoplastik sebagai matriks dalam komposit polimer diantaranya^[39]:

- ❖ Memiliki sifat *viscoelastic*
- ❖ Ketahanan terhadap pemuluran (*creep resistant*) yang rendah
- ❖ Memiliki stabilitas termal (*thermal stability*) yang rendah

- ❖ Rentan terhadap proses degradasi, contohnya terhadap sinar UV

2.7. Polipropilen (PP)

Polipropilen termasuk ke dalam jenis polimer termoplastik yang memiliki struktur rantai molekul linier. Polimer polipropilen ini diproduksi dengan cara proses polimerisasi dari monomer propilen. Proses polimerisasi adalah proses penyambungan unit-unit molekul kecil (*monomer*) menjadi molekul makro (*macromolecule*) dengan struktur rantai molekul yang sangat panjang^[39]. Hampir semua polipropilen komersial yang diproduksi saat ini merupakan polimer dengan susunan *isotactic* dan memiliki kristalinitas tingkat menengah di antara LDPE dan HDPE. Aplikasi dari polipropilen antara lain adalah untuk pengemasan, tekstil, alat tulis, berbagai tipe wadah, perlengkapan laboratorium, komponen otomotif, dan uang kertas polimer^[39].



Gambar 2.7. Rumus Struktural Polipropilen^[39]

Keunggulan yang dimiliki oleh polipropilen adalah sebagai berikut^[39]:

- ❖ Ringan dengan berat jenis antara 0.9 - 0.92 gram/cm³
- ❖ Memiliki kekuatan tekan dan kekuatan tarik yang tinggi
- ❖ Memiliki suhu operasional yang tinggi dengan titik leleh $\approx 160^\circ\text{C}$
- ❖ Memiliki ketahanan yang baik terhadap serangan alkali kuat, asam, pelarut organik dan *elektrostatic degreasing*
- ❖ Tidak beracun
- ❖ Mudah untuk diproduksi dan murah

Struktur dari polipropilen mengalami proses isomerisasi. Isomerisasi dari polimer dibagi menjadi dua, yaitu isomerisme stereo dan isomerisme geometrikal^[39]. Isomerisme stereo adalah isomerisme yang disebabkan oleh perbedaan lokasi atom-atom R atau gugus-gugus samping. Isomerisme stereo pada polipropilen dibagi menjadi tiga macam, yaitu:

❖ Isomer stereo *isotactic*

Isomer stereo *isotactic* adalah isomer yang atom-atom R atau gugus samping berada pada sisi yang sama dari rantai utama.

❖ Isomer stereo *syndiotactic*

Isomer stereo *syndiotactic* adalah isomer yang atom-atom R atau gugus samping berada pada sisi yang berselang-seling dari rantai utama.

❖ Isomer stereo *atactic*

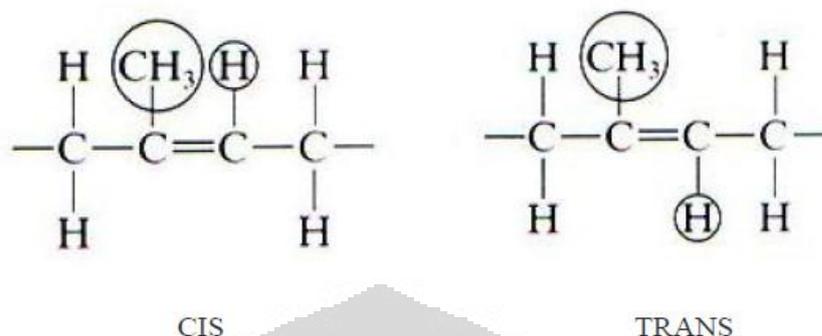
Isomer stereo *atactic* adalah isomer yang atom-atom R atau gugus samping berada pada sisi yang saling acak dari rantai utama.



Gambar 2.8. Jenis Isomerisme Stereo pada Polipropilen^[40]

Sedangkan isomer geometrikal adalah isomer yang disebabkan oleh perbedaan gugus R dan atom H terhadap posisi ikatan ganda pada rantai polimer. Isomer geometri dibagi menjadi dua macam, yaitu cis dan trans. Apabila gugus R dan atom H berada pada sisi yang sama dari rantai utama maka dinamakan cis. Sedangkan apabila gugus R dan atom H berada pada posisi yang bersilangan pada rantai utama disebut dengan trans^[41].

Isomer cis dan isomer trans dari polipropilen dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.9. Isomerisme Geometri pada Polipropilen^[41]

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

PP-g-MA merupakan polimer yang terbuat melalui proses kopolimerisasi antara polipropilen (PP) dengan *maleic anhydride*. Sifat-sifat dari *maleic anhydride* dapat dilihat pada di bawah ini:

Tabel 2.4. Karakteristik *Maleic Anhydride*^[13,42]

Sifat	Nilai
Berat molekul	98.06 gram/mol
Struktur molekul	C ₄ H ₂ O ₃
Wujud	Serpihan putih
Sifat	Higroskopis
Berat jenis	1.480 Kg/dm ³
Titik leleh	52.8°C
Titik didih	202°C

Secara teoritis, PP-g-MA memiliki sifat kompatibilitas yang baik terhadap *filler* atau dapat dikatakan memiliki derajat polaritas yang hampir sama dengan *filler*. Hal ini akan membuat matriks polimer dapat berikatan dengan baik dengan *filler*. Pada sistem komposit PP-*filler*, ikatan kovalen yang terjadi adalah antara gugus OH dari *filler* dengan gugus C=O pada *maleic anhydride* dari PP-g-MA^[13].

PP-g-MA merupakan sebuah *coupling agent* yang dapat mengubah energi permukaan dari suatu struktur nano sehingga dapat meningkatkan tingkat

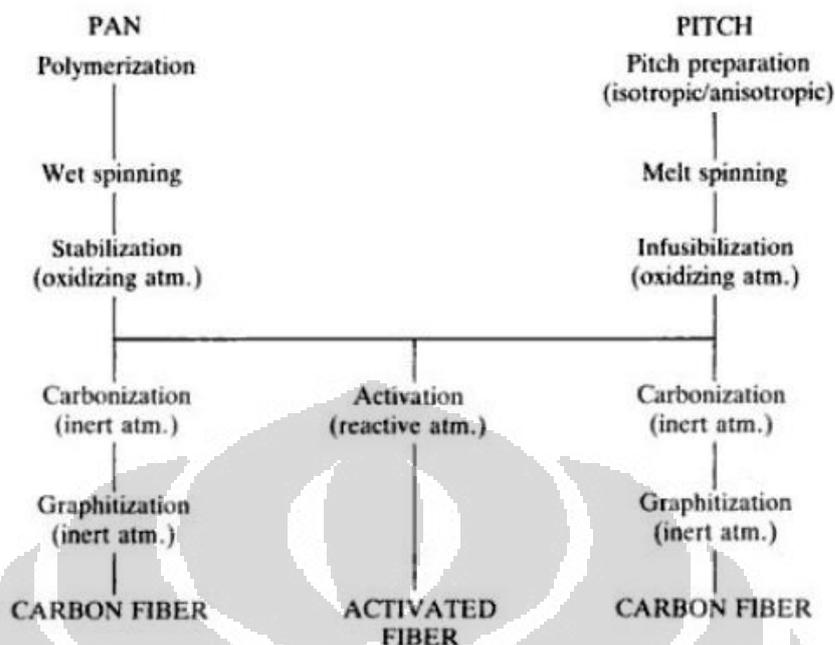
dispersinya di dalam matriks. PP-g-MA memiliki ikatan hidrogen yang kuat antara gugus hidroksil dari struktur nano dan gugus *maleic anhydride*. Contoh *coupling agent* lain yang juga bisa digunakan adalah *maleic anhydride grafted styrene-ethylene-butylenes-styrene* (MA-g-SEBS). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan *coupling agent* ini dapat meningkatkan sifat konduktivitas listrik dari material komposit^[2].



Gambar 2.10. Struktur Molekul *Maleic Anhydride*^[13]

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 di dalam sistem komposit adalah untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Serat karbon dihasilkan dengan cara sintesis dari rayon, poliakrilonitril (PAN), dan *pitch* dengan menghilangkan hidrogen dan nitrogen dalam kondisi atmosfer inert^[13].



Gambar 2.11. Proses Pembuatan Serat Karbon dari PAN dan *Pitch*^[11]

Serat karbon merupakan sumber utama dari mekanisme penguatan dalam sistem material komposit polimer. Sifat-sifat unggul dari serat karbon, seperti kekerasan, *fracture toughness* dan kekuatan fleksural merupakan keuntungan penggunaan material ini sebagai penguat (*reinforcement*). Namun, hal lain yang harus dipertimbangkan adalah peningkatan *hydrogen permeation* seiring dengan peningkatan jumlah serat karbon. Oleh karena itu perlu dilakukan pengaturan komposisi yang ideal agar diperoleh kekuatan mekanis yang optimal dengan *hydrogen permeation* yang rendah^[2].

2.10. Grafit

Grafit merupakan bentuk alotrop dari karbon. 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^[43].

Grafit digolongkan menjadi dua jenis, yaitu grafit alami dan grafit sintetis. Derajat kristalinitas dari grafit alam biasanya lebih tinggi daripada grafit sintetis. Nilai derajat kristalinitas ini sangat berpengaruh terhadap nilai konduktivitas listriknya^[2]. Grafit sintetis 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^[13]. Namun demikian, sifat-sifat dari material grafit ini juga bergantung terhadap asal material grafit ini diekstrak. Oleh karena itu, partikel grafit dari China biasanya memiliki sifat konduktivitas listrik yang lebih rendah dibanding grafit sejenis yang diekstrak dari Brazil atau Canada^[2].

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 pengeboran. Partikel grafit sintetis berukuran 2 μm (bubuk) sampai dengan 2 cm (potongan-potongan) dengan kandungan 99% karbon^[13].

2.11. Anti-oksidan

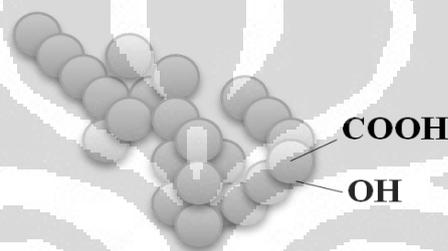
Anti-oksidan merupakan senyawa kimia yang digunakan untuk mencegah atau menghambat terjadinya reaksi oksidasi dari material plastik^[44]. Reaksi oksidasi pada material plastik itu sendiri dapat terjadi pada saat pembentukan resin, pemrosesan resin, penyimpanan resin, produk barang plastik disimpan dan saat digunakan. Reaksi oksidasi yang terjadi pada material polimer ini dapat mengakibatkan terjadi perubahan pada sifat polimer, yaitu^[44]:

- ❖ 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

2.12. Karbon Hitam (*Carbon Black*)

Karbon hitam merupakan pengisi (*filler*) dengan jumlah yang sedikit (minor) dalam proses fabrikasi pelat bipolar dengan sistem material komposit

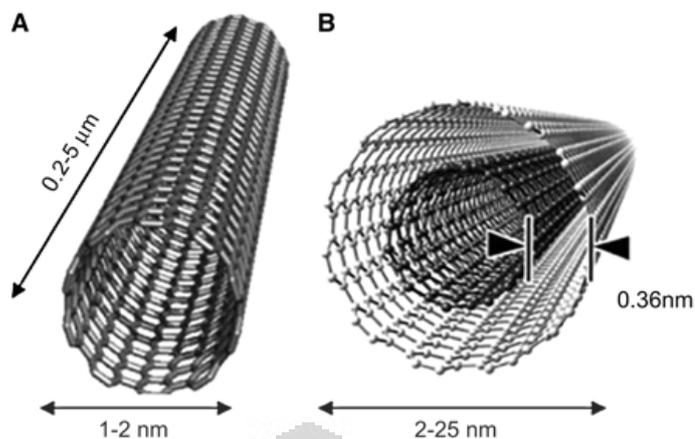
polimer. Keberadaan karbon hitam ini berguna untuk mengisi celah-celah (*voids*) yang terbentuk di antara partikel penguat lain seperti grafit sehingga dapat meningkatkan *conductive paths* dan konduktivitas listrik dari material komposit^[45]. Penelitian yang dilakukan oleh Mighri et al.^[46] menunjukkan bahwa jumlah karbon hitam yang maksimal dalam proses fabrikasi pelat bipolar dengan matriks polimer adalah sebesar 18 % vol. Penambahan karbon hitam yang semakin banyak dapat mengurangi kemampuan pembasahan karbon hitam dengan resin yang digunakan. Hal ini juga dapat menyebabkan kesulitan dalam proses *compounding* seperti terjadinya *die blockage*. Karbon hitam memiliki dua jenis gugus fungsi yang terdapat pada permukaannya, yaitu gugus hidroksil (OH) dan karboksil (COO⁻)^[46].



Gambar 2.12. Gugus fungsi yang dimiliki karbon hitam^[46]

2.13. *Multiwall Carbon Nano Tube* (MWCNT)

Carbon Nano Tubes (CNT) adalah alotrop karbon dengan struktur nano silinder^[47]. *Carbon Nano Tubes* (CNT) banyak digunakan dalam aplikasi bidang nanoteknologi, elektronik, optik, serta bidang-bidang ilmu material^[47]. CNT memiliki kekuatan yang luar biasa dan unik terutama dalam sifat elektrik dan memiliki tingkat efisiensi yang tinggi dalam hal konduktansi termal. Secara umum CNT dapat diklasifikasikan menjadi CNT berdinding tunggal (*Single Wall Carbon Nanotubes* / SWCNT) dan CNT berdinding multi (*Multi Wall Carbon Nanotubes* / MWCNT)^[47].



Gambar 2.13. Perbandingan antara SWCNT (A) dan MWCNT (B)^[48]

Multi-walled nanotubes (MWNT) terdiri dari lapisan gulung ganda dari grafit. Ada dua model MWNT, yaitu model *Russian Doll* dan *Parchment*. Pada *Russian Doll*, lembaran grafit tersusun dalam silinder konsentris. Pada *Parchment*, satu lembar grafit tergulung sendiri, menyerupai gulungan kertas. Jarak antar lapisan dalam MWNT mendekati jarak antara *graphene* dalam grafit sekitar 3.4 Å. *Double-walled carbon nanotubes* (DWNT) memiliki morfologi dan sifat yang mirip dengan SWNT tetapi ketahanan kimia lebih baik. DWNT diperoleh melalui reduksi larutan oksida dalam metana dan hidrogen. Karakteristik dari CNT dapat dilihat pada tabel di bawah ini^[47]:

Tabel 2.5. Karakteristik *Carbon Nano Tube*^[47]

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	-

Multiwall carbon nano tube (MWCNT) memiliki morfologi dan sifat yang hampir sama dengan *single wall carbon nano tube* (SWCNT). MWCNT merupakan sekumpulan SWCNT yang berkumpul pada satu sentral atau poros. Kedua material nano ini memiliki perbedaan pada kereaktifan bahan kimia dimana sifat kimia pada MWCNT jauh lebih reaktif. Hal ini sangat penting ketika

kita ingin melakukan fungsionalisasi (proses *grafting* terhadap fungsi kimia di permukaan *nano tube*) untuk memodifikasi suatu sifat dari *carbon nano tube*. Pada MWCNT, fungsionalisasi kovalen akan memutus ikatan rangkap C=C sehingga meninggalkan "holes" pada struktur *nano tube*. Adanya "holes" ini memungkinkan kita untuk memodifikasi sifat mekanis dan sifat elektrik dari material tersebut^[48].

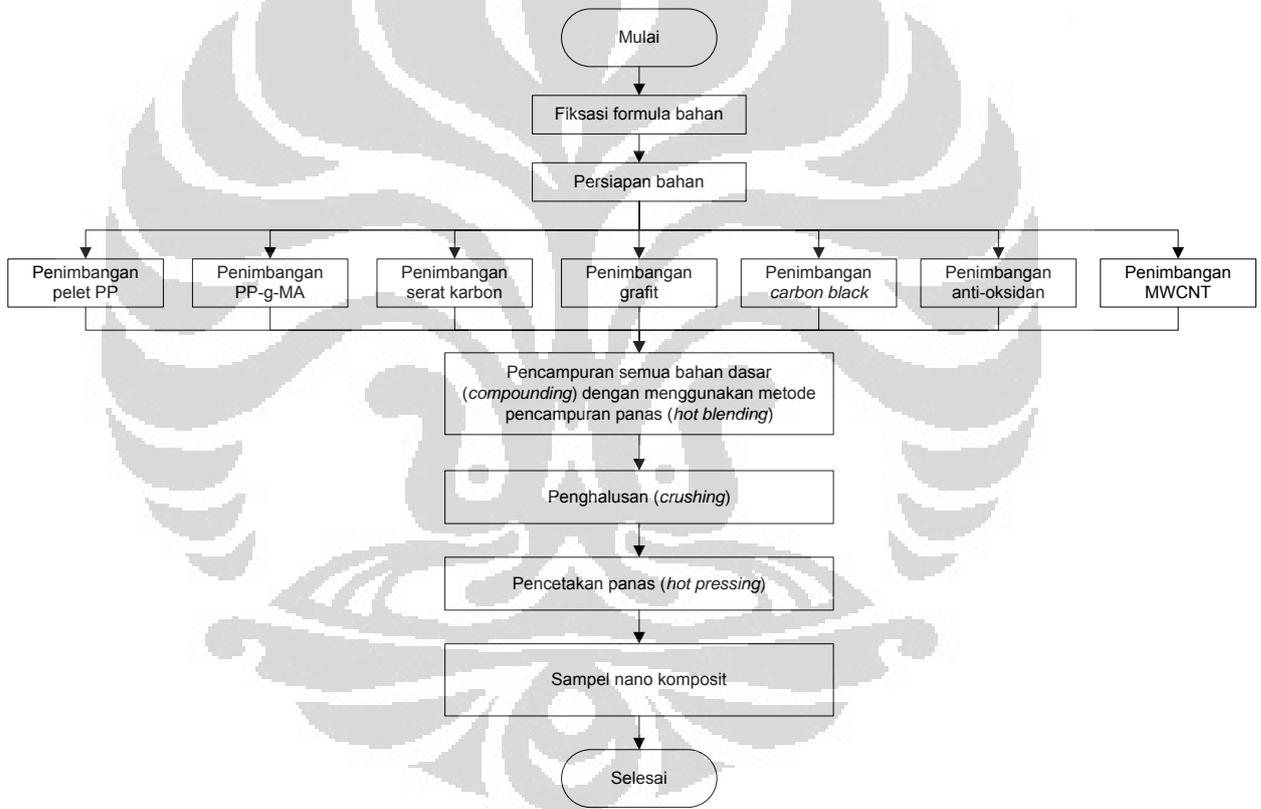
Sifat elektrik dari material SWCNT maupun MWCNT dipengaruhi oleh *helicity* atau diameter dari *nano tube* tersebut. Adanya ikatan antar karbon memungkinkan adanya transport elektron yang cukup sensitif terhadap kondisi di *boundary*^[48]. Kondisi ini menjadi semakin kompleks ketika material MWCNT memiliki dinding-dinding tambahan pada strukturnya. Para peneliti selama ini terus mempelajari sifat konduktivitas dari material CNT apakah bersifat *ballistic* atau *diffuse conductor*. Secara umum, *nano tube* yang memiliki efek *ballistic* merupakan konduktor terbaik setelah superkonduktor dan dapat digunakan dalam beberapa aplikasi elektronik. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa material MWCNT dapat memiliki efek *ballistic* di suhu ruang sehingga dapat digunakan sebagai pengganti material superkonduktor yang baru dapat beroperasi pada suhu yang sangat rendah ($\sim 7 - 180$ K)^[48].

Penggunaan MWCNT dalam penelitian ini dikarenakan material ini memiliki sifat *lower unit cost*, ketersediaannya lebih banyak dan proses pendispersiannya di dalam matriks polimer sedikit lebih mudah dibandingkan material SWCNT. Salah satu kendala dalam penggunaan SWCNT sebagai *filler* pada matriks polimer adalah kesulitan dalam proses *handling* dan pendispersian partikel SWCNT. Kesulitan dalam proses dispersi ini dikarenakan adanya kecenderungan dari material SWCNT untuk membentuk *ropes* (jaring-jaring tali) atau *bundles* (ikatan). Salah satu cara untuk mengatasi permasalahan dispersi ini adalah penggunaan *solvent* atau pelarut sebagai media pendispersi sebelum dilakukan penyemprotan atau *spray* ke serbuk polimer termoplastik. Adanya proses *treatment* khusus terhadap material SWCNT ini tentu saja membuat proses menjadi lebih panjang dan memakan waktu serta biaya lebih. Selain itu, material SWCNT ketersediaannya lebih sedikit dan lebih mahal dibandingkan material MWCNT.

BAB 3 METODE PENELITIAN

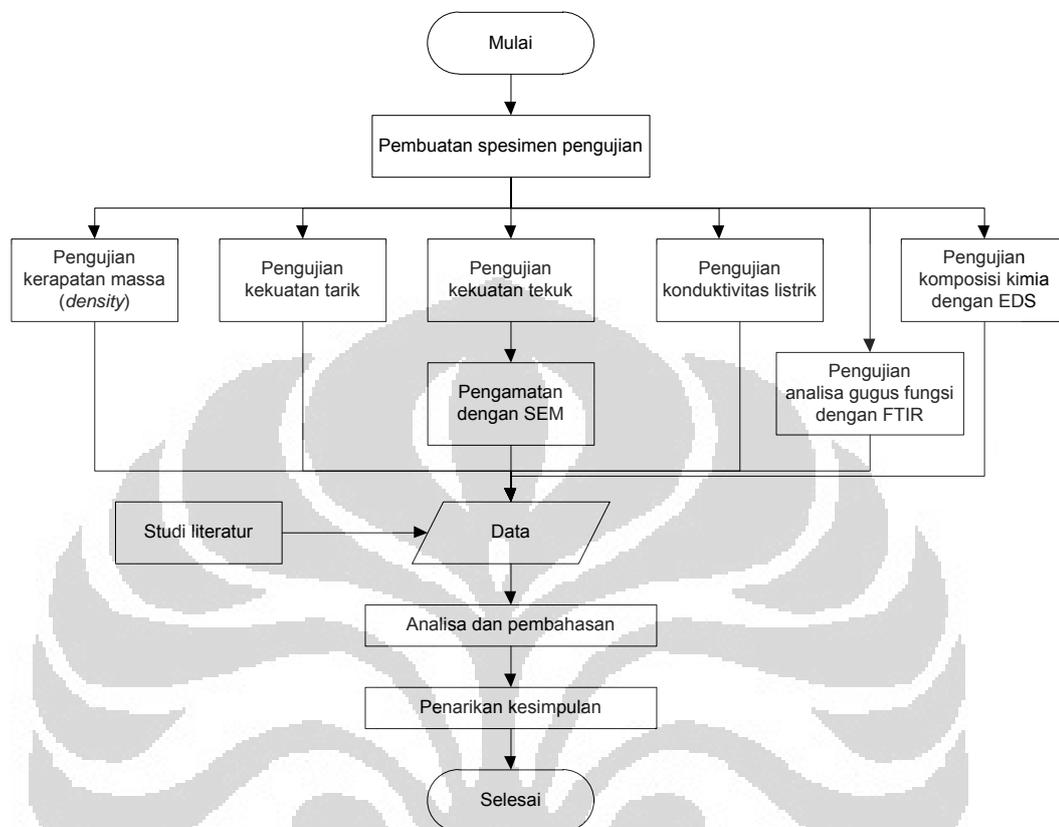
3.1. Diagram Alir

Dalam penelitian pengaruh penambahan fraksi volum penguat *multi wall carbon nano tube* (MWCNT) terhadap sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis material pelat bipolar berbasis nanokomposit, terdapat dua macam diagram alir penelitian, yaitu diagram alir preparasi dan fabrikasi material pelat bipolar serta diagram alir karakterisasi dan pengujian material pelat bipolar. Diagram alir preparasi dan fabrikasi material pelat bipolar ditunjukkan pada gambar berikut ini:



Gambar 3.1. Diagram alir preparasi dan fabrikasi material pelat bipolar

Sementara diagram alir karakterisasi dan pengujian material pelat bipolar berbasis nanokomposit adalah sebagai berikut:



Gambar 3.2. Diagram alir karakterisasi dan pengujian material pelat bipolar

3.2. Variabel Penelitian

Variabel penelitian didefinisikan sebagai segala sesuatu yang ditetapkan oleh seorang peneliti untuk dipelajari sehingga diperoleh informasi tentang hal tersebut, kemudian ditarik kesimpulannya^[49]. Variabel penelitian memiliki peran penting dalam suatu penelitian, yaitu untuk mempersiapkan alat dan metode pengumpulan data, untuk mempersiapkan metode analisa dan pengolahan data serta untuk pengujian hipotesis penelitian. Secara umum, variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas tiga macam variabel, yaitu variabel bebas, variabel terikat dan variabel terkontrol.

3.2.1. Variabel Bebas

Variabel bebas didefinisikan sebagai variabel penelitian yang mempengaruhi variabel terikat. Variabel ini dinamakan sebagai variabel bebas karena variabel ini bersifat bebas dalam mempengaruhi variabel penelitian lainnya^[49]. 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 baik. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah fraksi volum penguat material *multiwall carbon nano tube* (MWCNT).

3.2.2. Variabel Terikat

Variabel terikat dapat didefinisikan sebagai variabel penelitian yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat karena adanya variabel bebas^[49]. Variabel terikat dari penelitian ini terdiri atas tiga macam, yaitu sifat konduktivitas listrik pelat bipolar, sifat mekanis pelat bipolar dan sifat fisik pelat bipolar. Pengujian yang dilakukan untuk melihat pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- ❖ Pengujian konduktivitas listrik dengan metode *four-point probe* dilakukan untuk mengkarakterisasi sifat konduktivitas listrik material pelat bipolar.
- ❖ Pengujian tarik (*tensile testing*) dan pengujian tekuk (*flexural testing*) dilakukan untuk mengkarakterisasi sifat mekanis material pelat bipolar.
- ❖ Pengujian nilai densitas dilakukan untuk mengkarakterisasi sifat fisik material pelat bipolar.
- ❖ Pengujian nilai porositas dilakukan untuk mengkarakterisasi sifat fisik material pelat bipolar.
- ❖ Pengamatan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) terhadap patahan hasil pengujian tekuk digunakan sebagai alat bantu untuk menganalisis metode perpatahan material pelat bipolar saat mengalami pembebanan tekuk.
- ❖ Pengujian komposisi kimia dengan *Energy Dispersed Spectroscopy* (EDS) digunakan untuk mengetahui komposisi dan distribusi material dalam material pelat bipolar berbasis nanokomposit termoplastik ini.

- ❖ Pengujian dengan menggunakan alat *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk menganalisa spektra infra merah gugus fungsi material pelat bipolar.

3.2.3. Variabel Terkontrol

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^[49]. Variabel kontrol ini sering dipakai oleh peneliti dalam penelitian yang bersifat membandingkan melalui suatu penelitian eksperimental. Variabel kontrol yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- ❖ Fraksi volum matriks polipropilen (PP)
- ❖ Fraksi volum *Polypropylene-grafted-Maleated Anhydrate* (PP-g-MA)
- ❖ Fraksi volum antioksidan CN-CAT A215
- ❖ Fraksi volum penguat serat karbon
- ❖ Fraksi volum penguat grafit
- ❖ Fraksi volum penguat karbon hitam (*carbon black*)

3.3. Formulasi dan Komposisi Material

Formulasi penelitian dalam skripsi ini dilambangkan dengan huruf F, yang berarti formula. Dalam penelitian ini digunakan tiga macam formulasi penelitian, yaitu F1, F2 dan F3. Ketiga macam formulasi penelitian tersebut menggambarkan variasi kuantitas dari variabel yang digunakan, yaitu penambahan fraksi volum penguat material *Multi Wall Carbon Nano Tube* (MWCNT) dalam komposit termoplastik.

Komposisi dari setiap bahan yang digunakan berdasarkan masing-masing formula pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3.1. Komposisi material pada setiap formulasi penelitian

Jenis Bahan	Satuan	F1	F2	F3
Polipropilen (PP)	%	15	15	15
	gram	30	30	30
Serat Karbon	%	20	20	20
	gram	40	40	40
Grafit	%	28.9	28.5	28
	gram	57.8	57	56
Karbon Hitam	%	30	30	30
	gram	60	60	60
PP-g-MA	%	5	5	5
	gram	10	10	10
Anti Oksidan CN-CAT A215	%	1	1	1
	gram	2	2	2
MWCNT	%	0.1	0.5	1
	gram	0.2	1	2
Total	%	100	100	100
	gram	200	200	200

3.4. Material

Material atau bahan yang digunakan untuk memfabrikasi material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP ini terdiri atas tujuh macam bahan. Spesifikasi dari material atau bahan yang digunakan untuk memfabrikasi material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP adalah sebagai berikut:

3.4.1. Polipropilen (PP)

Fabrikasi material pelat bipolar berbasis komposit termoplastik menggunakan polimer termoplastik polipropilen (PP) sebagai matriksnya. Matriks polipropilen (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 polipropilen (PP) dalam fabrikasi material pelat bipolar ini juga berperan dalam

mempengaruhi sifat mekanis, sifat fisik dan sifat konduktivitas listrik dari material pelat bipolar secara umum.

Polipropilen (PP) yang digunakan dalam penelitian ini adalah *trilene* HI10HO yang merupakan polipropilen homopolimer. Produsen yang memproduksi polipropilen (PP) jenis adalah PT. Chandra Asri Petrochemical Tbk. Polipropilen yang digunakan dalam penelitian ini berwarna putih dan berbentuk butiran pelet. Konduktivitas listrik dari material polipropilen (PP) adalah sebesar 10^{-6} S/cm^[50]. Secara umum sifat dari polipropilen (PP) yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 3.2. Sifat Polimer *Trilene* HI10HO^[50]

Sifat	Nilai
<i>Melt Flow Rate</i> (gram/10min)	10
Berat Jenis (gram/cm ³)	0.903
Modulus Kelenturan (MPa)	1280
Kekuatan Tarik (MPa)	34
Elongasi (%)	13

3.4.2. *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 material 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 *compatibilizer* yang menjembatani ikatan antara matriks polipropilen (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 3.3. Spesifikasi *Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride (PP-g-MA)*^[13,42]

Sifat	Nilai
Berat molekul	98.06 gram/mol
Struktur molekul	C ₄ H ₂ O ₃
Wujud	Serpihan putih
Sifat	Higroskopis
Berat jenis	1.480 Kg/dm ³
Titik leleh	52.8°C
Titik didih	202°C

3.4.3. Serat Karbon

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 sifat konduktivitas listrik dari pelat bipolar. Serat karbon yang digunakan dalam penelitian ini berwarna hitam dan berbentuk seperti rambut halus. Nama dagang dari serat karbon yang digunakan adalah *chopped carbon fiber* dengan ukuran 2-20 mm. Serat karbon yang berasal dari daerah Zhejiang (China) ini memiliki kekuatan tekan sebesar 3.0 – 3.6 GPa^[51].

3.4.4. Grafit

Penggunaan grafit sebagai salah satu bahan dalam memfabrikasi material 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. Sifat dan karakteristik dari grafit dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3.4. Karakteristik Grafit^[13]

Sifat	Nilai
Komposisi kimia	C (98.5%), Ash (Max 1%)
Kerapatan	2 – 2.25 gr/cm ³
Titik lebur	4027 – 4427°C
Kapasitas panas	8.517 (25°C) J.mol ⁻¹ .K ⁻¹
Konduktivitas panas	200 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Kekerasan	1 -2 Mohs <i>scale</i>
Konduktivitas Listrik	670 – 680 S/cm
Warna	Hitam keabu-abuan
Struktur kristal	Heksagonal

3.4.5. Anti-Oksidan CN-CAT A215

Penggunaan anti-oksidan dalam proses fabrikasi material 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 3.5. Spesifikasi Anti-Oksidan CN-CAT B215^[13]

Parameter	Keterangan
Warna Serbuk	Putih
Komposisi	A 168 : 61.5% - 71.5% A1010 : Sisanya
TGA (100°C, 2 jam)	Maksimum 0.5%
<i>Transmittance</i>	
425 nm	Minimum 96%
500 nm	Minimum 98%

3.4.6. Karbon Hitam (*Carbon Black*)

Karbon hitam merupakan pengisi (*filler*) dengan jumlah yang sedikit (*minor*) dalam proses fabrikasi material pelat bipolar dengan sistem material komposit polimer. Keberadaan karbon hitam ini berguna untuk mengisi celah-celah (*voids*) yang terbentuk di antara partikel penguat lain seperti grafit sehingga dapat meningkatkan *conductive paths* dan konduktivitas listrik dari material komposit^[45]. Penambahan karbon hitam yang semakin banyak dapat mengurangi kemampuan pembasahan karbon hitam dengan resin yang digunakan. Hal ini juga dapat menyebabkan kesulitan dalam proses *compounding* seperti terjadinya *die blockage*. Karbon hitam memiliki konduktivitas listrik sebesar 4 S/cm, berat jenis 1.8 gr/cm³ dan *surface area* sebesar 237 m²/gr^[52].

3.4.7. *Multiwall Carbon Nano Tube* (MWCNT)

Penggunaan *Multi Wall Carbon Nano Tube* (MWCNT) dalam fabrikasi material pelat bipolar berbasis komposit termoplastik ini didasarkan atas sifat dari MWCNT yang memiliki nilai konduktivitas listrik dan sifat mekanis yang baik. Spesifikasi dari *Multi Wall Carbon Nano Tube* (MWCNT) yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3.6. Spesifikasi *Multiwall Carbon Nano Tube* (MWCNT)^[53]

Parameter	Keterangan
Nama Produk	HDPlas MWCNTs
Diameter luar	13-18 nm
Diameter dalam	4 nm
Panjang	1-12 μ m
Kemurnian MWCNT	> 99 wt%
Kandungan Ash	0 wt%
<i>Specific Surface Area</i>	> 233 m ² /gram
Konduktivitas listrik	> 100 S/cm
<i>Plasma Process Gas</i>	Argon
Kondisi	<i>Non Functionalized</i>

Ukuran partikel *Multi Wall Carbon Nano Tube* (MWCNT) dalam skala nano membuat luas permukaan secara keseluruhan dari partikel MWCNT cukup besar. Hal ini dapat meningkatkan kontak permukaan baik antara partikel MWCNT maupun antara partikel MWCNT dengan penguat lainnya dalam sistem nanokomposit ini.

3.5. 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:

3.5.1. Peralatan Preparasi Sampel Pengujian

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

Tabel 3.7. Peralatan Preparasi Sampel Pengujian

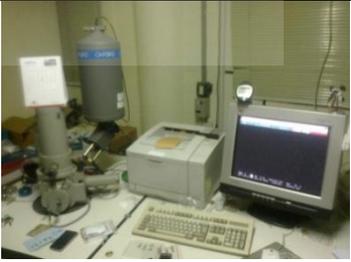
Nama Alat	Spesifikasi	Foto Alat
Neraca Massa Digital	Timbangan Digital Kapasitas 200 gr Ketelitian : 0.001 gr Lab.Metalurgi Kimia DTMM FTUI	
Neraca Massa Digital	Timbangan Digital Kapasitas 500 gr Ketelitian : 0.01 gr Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK	

<i>Hot Blender</i>	Rheomix Haake PolyDrive Kapasitas : 50 gr Lab.Teknik Kimia Institut Teknologi Indonesia (ITI)	
<i>Crusher</i>	KPi Crusher Tipe KF-808-B HP-3 Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK	
<i>Hot Pressing Machine</i>	Collin Hot Press Presse 300P Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK	
<i>Conditioning Chamber</i>	Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK	

3.5.2. Peralatan Karakterisasi Sampel

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

Tabel 3.8. Peralatan Karakterisasi Sampel

Nama Alat	Spesifikasi	Foto Alat
<p><i>Four Point Probe Electrical Conductivity Instrument</i></p>	<p>Lab.Fuel Cell Pusat Penelitian Fisika LIPI Kawasan PUSPIPTEK</p>	
<p><i>Tensile Tester dan Flexural Tester</i></p>	<p>Shimadzu Universal Testing Machine AGS-100kNG ASTM D3039 (Uji Tarik) ASTM D790 (Uji Tekuk) Sentra Teknologi Polimer (STP) – PUSPIPTEK</p>	
<p><i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i></p>	<p>IR Prestige – 21 Lab.Afiliasi Kimia Departemen Kimia MIPA Universitas Indonesia</p>	
<p><i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i></p>	<p>LEO 420 Lab.Uji Mekanik DTMM FTUI</p>	

3.6. Prosedur Penelitian

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:

3.6.1. Penimbangan Bahan

Penimbangan bahan dilakukan untuk mendapatkan kuantitas yang tepat dari setiap bahan yang akan digunakan untuk memfabrikasi material 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^[54]:

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.
7. Setelah selesai menimbang, matikan kembali timbangan melalui tombol OFF

3.6.2. Pencampuran Panas (*Hot Blending*)

Pencampuran panas (*hot blending*) bahan dilakukan terhadap seluruh bahan dengan menggunakan alat Rheomix Haake PolyDrive. Mesin Rheomix HAAKE 3000 sendiri merupakan suatu *hot mixer* internal yang mampu mencampurkan beberapa jenis zat yang berbeda dengan cara melelehkan dan mencampurkannya^[55]. Mesin ini menggunakan dua buah *screw* yang berputar

secara berlawanan di dalam suatu *chamber* yang memiliki kapasitas penuh 50 gram. Mesin Rheomix Haake PolyDrive ini terdiri dari tiga pelat di mana pelat pertama yang stasioner, dan pelat kedua serta pelat ketiga yang dapat dilepas^[55]. Pada mesin ini, *chamber* pencampuran berada pada pelat kedua yang dapat dibersihkan untuk mendapat *master batch* hasil proses *hot blending*. Adapun kondisi operasi yang digunakan pada proses pencampuran panas (*hot blending*) ini adalah:

- ❖ Temperatur : 210°C
- ❖ Deviasi : 0
- ❖ Waktu : 15 menit (*mixing* pertama) dan 5 menit (*mixing* kedua)

Tahapan pencampuran panas (*hot blending*) yang dilakukan dalam penelitian ini dengan menggunakan mesin Rheomix Haake PolyDrive adalah sebagai berikut^[56]:

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*
 - Buka *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 210°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 210°C dan kemudian tekan *enter*.
 - Tekan pada posisi *zone 2* dan tulis suhu operasi yang kita atur, yaitu sebesar 210°C dan kemudian tekan *enter*.
 - Tekan pada posisi *zone 3* dan tulis suhu operasi yang kita atur, yaitu sebesar 210°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 pada *loading tray* ke dalam *chamber* melalui *loading clute* secara perlahan sehingga tidak ada material yang tumpah ataupun tercecer. Jangan lupa untuk memasukan *multi wall carbon nanotube* (MWCNT) 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 clute* dari *chamber* dan proses *blending* akan berjalan sesuai dengan waktu dan parameter proses yang telah kita atur.
 17. 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.
 18. Naikkan "*Floating Chamber*" sampai pada posisi di mana *pin* akan mengunci. Kemudian "OFF" kan *power heater* pada *gear box*.
 19. 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*.
 20. 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.
 21. Bersihkan rotor, keluarkan seluruh material hasil proses *blending* yang melekat pada rotor, taruh seluruh material dari rotor tersebut pada wadah *stainless steel* di bawahnya.
 22. 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.

23. Untuk melaksanakan *blending* dengan formulasi berikutnya maka dapat dilakukan dengan mengikuti petunjuk mulai dari langkah ke-12.
24. 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.

3.6.3. *Crushing Hasil Hot Blending*

Karakteristik produk hasil pencampuran panas (*hot blending*) yang dilakukan dengan Rheomix Haake PolyDrive berbentuk gumpalan padat atau bongkahan yang cukup keras. Kondisi sampel dalam bentuk bongkahan tentu saja akan sangat sulit 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*). Produk hasil proses *crushing* ini berbentuk granula dengan berbagai variasi ukuran. Adapun tahapan kerja proses *crushing* bahan ini adalah sebagai berikut:

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*.

3.6.4. *Pencetakan Panas 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 dengan diameter pelat 14 cm serta ketebalan 4 mm untuk pegujian tekuk dan 2 mm untuk pengujian tarik.

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

Tabel 3.9. 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

Adapun tahapan dan prosedur proses pencetakan panas (*hot pressing*) adalah sebagai berikut^[57]:

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 100 gram untuk setiap formula
7. 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
8. Cetakan (*dies*) selanjutnya diletakkan ke dalam mesin *hot pressing*
9. Selanjutnya proses dilakukan secara otomatis oleh mesin *hot pressing*

10. Proses penekanan panas dimulai dengan pemanasan cetakan hingga mencapai batas toleransi temperatur proses awal
11. Setelah cetakan mencapai temperatur proses awal, maka cetakan akan naik ke *platform* bagian atas dan mengalami penekanan dengan tekanan proses yang telah diatur sebelumnya
12. Setelah 45 menit, maka cetakan akan kembali turun dari *platform* bagian atas dan proses selesai
13. Selanjutnya cetakan diambil dan dibongkar untuk mendapatkan pelat hasil proses penekanan panas (*hot pressing*)

3.6.5. 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*). Ukuran sampel uji tarik ($w \times l \times t$) yaitu $10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ^[58].

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

3.6.6. 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. Ukuran sampel uji tekuk ($w \times l \times t$) yaitu 10 mm x 100 mm x 4 mm^[59].

3.6.7. *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 polipropilen mengalami relaksasi tegangan karena adanya kristalisasi sekunder setelah pemanasan baik pada saat tahapan pencampuran panas (*hot blending*) maupun pada tahapan pencetakan panas (*hot pressing*)^[57]. Proses pengkondisian spesimen pengujian tarik dan spesimen pengujian tekuk ini dilakukan dalam suatu *conditioning chamber* dengan parameter proses sebagai berikut:

Tabel 3.10. Parameter proses pengondisian spesimen uji tarik dan uji tekuk

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

3.6.8. 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 luluh (*yield strength*), modulus luluh (*yield modulus*), elongasi dan lain sebagainya^[60]. Secara umum tujuan utama dilakukannya pengujian tarik terhadap suatu material adalah untuk menganalisa respon atau perilaku material pada saat mengalami pembebanan mekanis.

Pengujian tarik terhadap material pelat bipolar berbasis nanokomposit ini dilakukan berdasarkan standar pengujian ASTM D3039 (*Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*).

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 material pelat bipolar ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3.11. Parameter Proses Pengujian Tarik

Parameter	Nilai
Temperatur Pengujian	23°C
Kelembaban Udara	62%

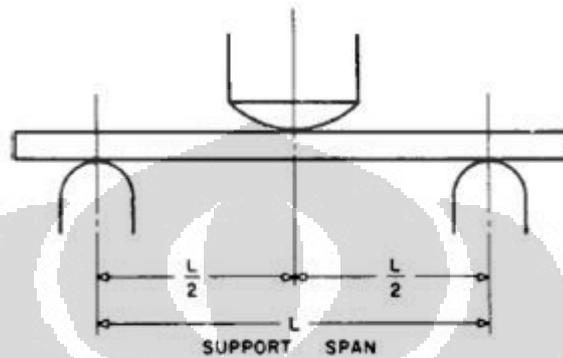
Adapun prosedur atau tahapan proses pengujian tarik (*tensile testing*) yang dilakukan pada material pelat bipolar ini adalah sebagai berikut^[58]:

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.

3.6.9. Pengujian Tekuk (*Flexural Testing*)

Pengujian tekuk dilakukan untuk mengetahui ketahanan suatu material terhadap mekanisme pembebanan tekuk. 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 3.3 Skema Metode *Three-Point Bending Test*^[59]

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 (*Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*) yang mengatur mengenai standar pengujian kelenturan untuk material plastik.

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. Adapun prosedur atau tahapan pengujian tekuk yang dilakukan pada material pelat bipolar ini adalah sebagai berikut^[59]:

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.

3.6.10. Pengujian Densitas dan Porositas

Pengujian densitas 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 Metalurgi Kimia, Universitas Indonesia. Adapun prosedur atau tahapan kerja pengujian densitas dan porositas yang dilakukan terhadap pelat bipolar adalah sebagai berikut^[6]:

1. Menyiapkan sampel pelat bipolar yang akan diuji nilai densitasnya.
2. Menyiapkan timbangan digital, *beaker glass* ukuran 100 ml, kawat dan aquades.
3. Menimbang dan mencatat massa sampel di udara (M_u).
4. Menimbang berat air sebesar 50 ml di dalam *beaker glass* 100 ml untuk mencari nilai kerapatan massa air yang nantinya akan digunakan untuk pengujian kerapatan massa dan porositas (ρ air).
5. Menimbang massa kawat di dalam air.
6. Menimbang massa sampel di dalam air dengan cara memasukkan sampel yang telah dililitkan dengan kawat ke dalam *beaker glass* yang terisi air hingga seluruh permukaan sampel tercelup oleh air dan berada dalam keadaan setimbang dan angka tidak berubah-ubah.
7. Ulangi langkah diatas untuk formula yang lain.

Dari hasil penimbangan tersebut maka massa sampel di air (M_a) adalah massa sampel di air dikurangi dengan massa kawat di air. Sedangkan nilai kerapatan massa sampel bisa diperoleh dari persamaan berikut^[61]:

$$\text{Densitas sampel} = \rho_{\text{sampel}} = \frac{M_u}{M_a} \rho_{\text{air}} \quad (3.1)$$

Sementara untuk menghitung nilai porositas hasil percobaan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut^[61]:

$$\% \text{ Porositas} = \frac{\rho_{\text{teoritis}} - \rho_{\text{percobaan}}}{\rho_{\text{teoritis}}} \times 100\% \quad (3.2)$$

Dimana:

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

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

Nilai densitas teoritis dari sampel material pelat bipolar ini dapat dihitung dengan menggunakan rumus hukum campuran komposit sebagai berikut^[34]:

$$\rho_{\text{komposit}} = (Vf_{\text{matriks}} \cdot \rho_{\text{matriks}}) + (Vf_{\text{penguat}} \cdot \rho_{\text{penguat}}) \quad (3.3)$$

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

Prinsip pengujian nilai konduktivitas listrik dengan metode *four point probe* ini adalah dengan memberikan suatu arus listrik dan beda potensial tertentu terhadap spesimen uji sehingga nilai resistansi listrik dari material yang diuji dapat diketahui^[62]. Apabila nilai hambatan jenis dari suatu bahan diketahui maka nilai dari konduktivitas listrik bahan tersebut dapat dihitung. Pengujian konduktivitas listrik dengan *four point probe* ini dilakukan sesuai standar ASTM F1529 (*Test Method for Sheet Resistance Uniformity Evaluation by In-Line Four-Point Probe with the Dual-Configuration Procedure*).

Dalam pengujian dengan metode ini dimensi merupakan faktor yang sangat mempengaruhi hasil pengujian^[62]. Spesimen dibentuk sedemikian rupa hingga berbentuk persegi dengan panjang sisi 1 cm. Proses pengamplasan 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^[62]. Berikut adalah tahapan kerja pengujian nilai konduktivitas listrik sampel bahan dengan metode *four point probe*^[63]:

1. Siapkan sampel material 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 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 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 $\Omega.cm$ dan catat hasilnya.
15. Ulangi langkah di atas sehingga diperoleh data hasil pengujian.
16. Untuk mendapatkan nilai konduktivitas bahan maka dapat dilakukan dengan formulasi sebagai berikut^[62]:

$$\sigma = \frac{1}{R} \quad (3.4)$$

dimana:

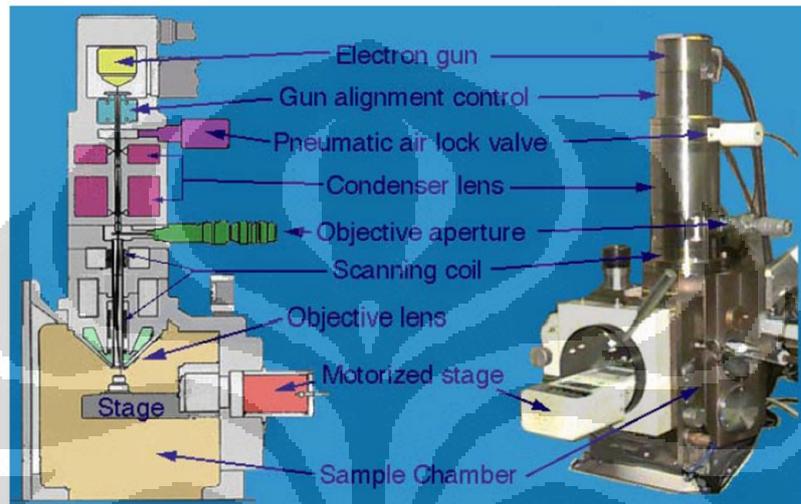
σ → Konduktivitas listrik bahan (S/cm)

R → Hambatan jenis bahan ($\Omega.cm$)

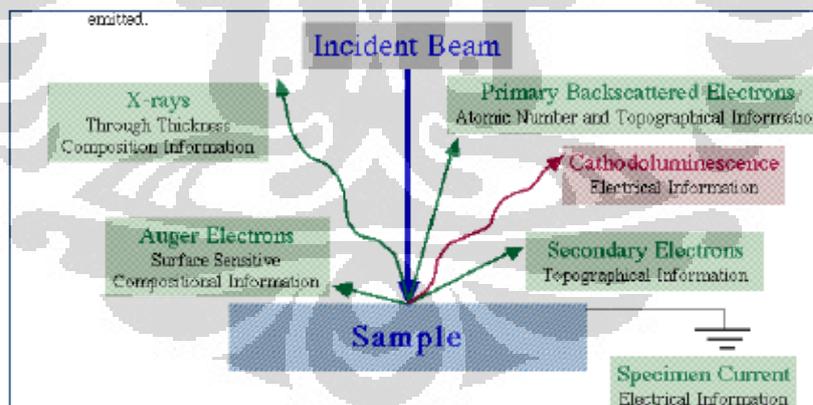
17. Ambil nilai rata-rata dari ketiga pengujian yang telah dilakukan maka nilai tersebut adalah nilai konduktivitas bahan yang diuji.

3.6.12. Karakterisasi 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 Lab.Uji Mekanik DTMM FTUI.



(a)



(b)

Gambar 3.4. Komponen *scanning electron microscope* (a) dan interaksi *electron beam* dengan sampel (b)^[64]

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 *Multi Wall Carbon Nano Tubes* (MWCNT) serta morfologi permukaan hasil

perpatahan pengujian tekuk spesimen material pelat bipolar. Bagian material pelat bipolar yang dikarakterisasi dengan menggunakan SEM adalah patahan hasil pengujian tekuk.

Sementara tahapan kerja karakterisasi morfologi patahan pengujian tekuk material pelat bipolar dengan metode SEM adalah sebagai berikut^[64]:

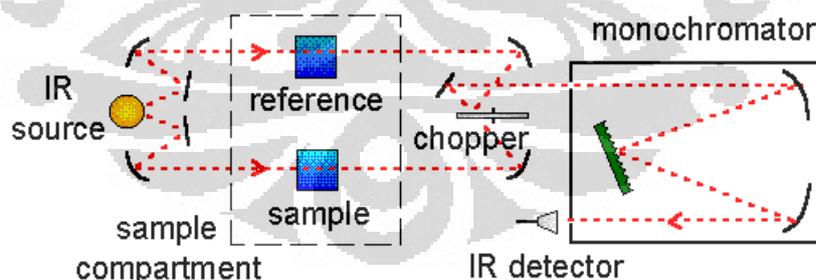
1. Lakukan preparasi sampel material pelat bipolar yang akan dikarakterisasi dengan cara pemotongan sampel sehingga spesimen dapat dimasukkan ke dalam *speciment chamber* SEM.
2. Letakan spesimen uji di dalam *speciment chamber* SEM.
3. Kemudian *speciment chamber* SEM dikondisikan dalam keadaan vakum.
4. *Electron beam* SEM diaktifkan.
5. Dengan menggunakan kontrol komputer arahkan spesimen sehingga diperoleh pencitraan morfologi permukaan patahan material pelat bipolar.
6. Pengambilan gambar dilakukan pada beberapa titik untuk melihat kondisi morfologi permukaan material pelat bipolar secara keseluruhan.
7. Selain itu spesimen pelat bipolar juga diuji kandungan unsur-unsur yang terdapat di dalam pelat bipolar tersebut dengan menggunakan detektor *Energy Dispersed Spectroscopy* (EDS)^[64]. 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.
8. Aktifkan detektor EDS.
9. Arahkan pada bagian pelat bipolar yang akan dikarakterisasi.
10. Cetak grafik yang dihasilkan dari hasil karakterisasi EDS ini.
11. Ulangi langkah tersebut di atas untuk karakterisasi material pelat bipolar formula lainnya.

3.6.13. Karakterisasi Gugus Fungsi dengan FTIR

Hampir setiap senyawa yang memiliki ikatan kovalen, apakah senyawa organik atau anorganik, akan menyerap berbagai frekuensi radiasi elektromagnetik dalam daerah spektrum inframerah^[65]. Molekul akan mengalami respon dalam bentuk vibrasi apabila molekul tersebut dapat menyerap radiasi

inframerah. Radiasi dalam kisaran energi ini sesuai dengan kisaran frekuensi vibrasi rentangan (*stretching*) dan vibrasi bengkokan (*bending*) dari ikatan kovalen dalam kebanyakan molekul. Vibrasi rentangan dibagi menjadi dua, yaitu rentangan simetri dan rentangan asimetri. Sedangkan vibrasi bengkokan dibagi menjadi empat, yaitu guntingan, kibasan, goyangan dan puntiran^[65]. Setiap tipe ikatan yang berbeda akan memiliki frekuensi vibrasi yang berbeda sehingga tidak ada dua molekul yang memiliki bentuk serapan inframerah atau spektrum inframerah yang tepat sama.

Kegunaan yang penting dari spektrum inframerah adalah memberikan keterangan tentang molekul. Serapan setiap tipe ikatan (N-H, C-H, O-H, C-X, C=O, C-O, C-C, C=C, C=N, dan sebagainya) hanya diperoleh dalam bagian-bagian kecil tertentu dari daerah vibrasi inframerah. Dengan mencocokkan antara bilangan gelombang *transmittance* atau *absorbance* dengan *database*, kita dapat mengetahui gugus fungsi yang terkandung dalam sampel material yang diuji. Hal ini penting dilakukan untuk mengetahui gugus fungsi yang terbentuk setelah proses fabrikasi material pelat bipolar. Pengujian FTIR dilakukan berdasarkan standar ASTM E1944 (*Standard Practice for Describing and Measuring Performance of Laboratory Fourier Transform Near-Infrared (FT-NIR) Spectrometers: Level Zero and Level One Tests*). Prinsip kerja FTIR dapat dilihat pada gambar di bawah ini:

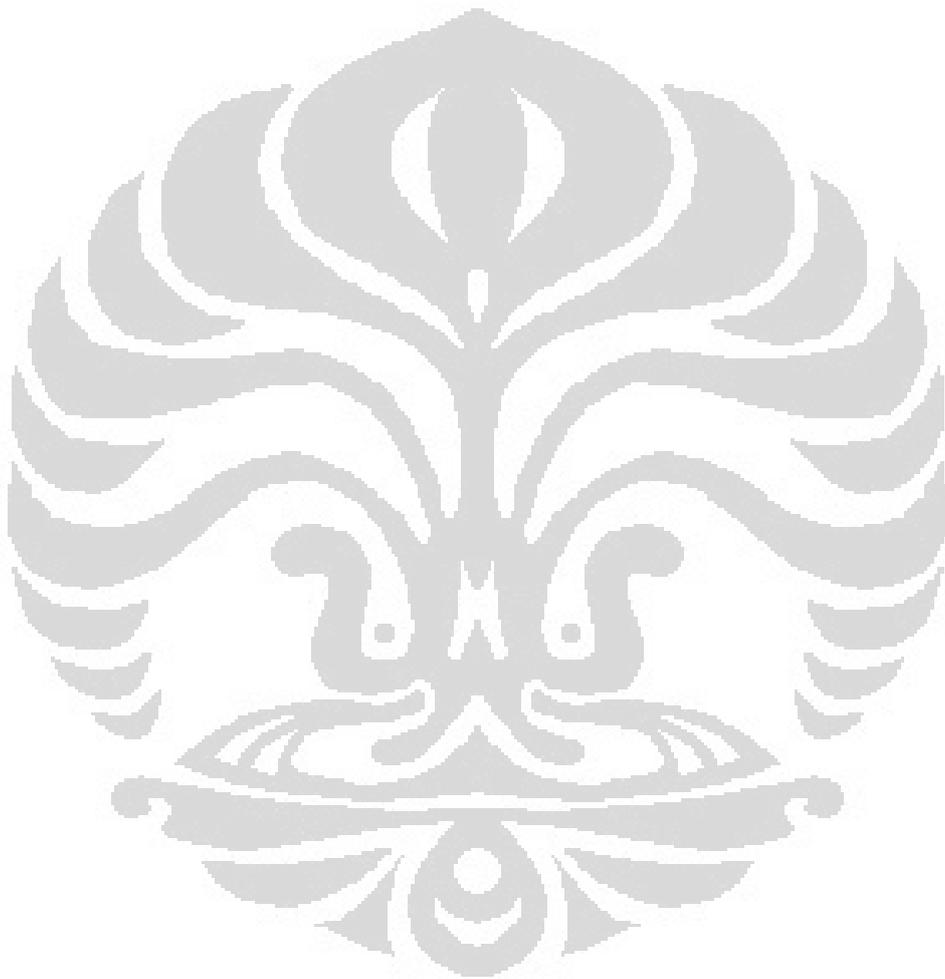


Gambar 3.5. Skema pengujian FTIR^[65]

Tahapan pengujian FTIR adalah sebagai berikut^[65]:

1. Timbang sampel pelat bipolar hasil *crushing* sebanyak 2.5 gram.
2. Larutkan sampel tersebut di dalam larutan garam KBr dengan perbandingan sampel : KBr, yaitu 1:10.
3. Masukkan sampel yang telah dilarutkan tersebut ke dalam *chamber* FTIR.

4. Tutup *chamber*, lalu tembakkan sumber radiasi inframerah.
5. Hasil *absorbance* dan *transmittance* dari radiasi inframerah dapat terlihat pada *software* di komputer.



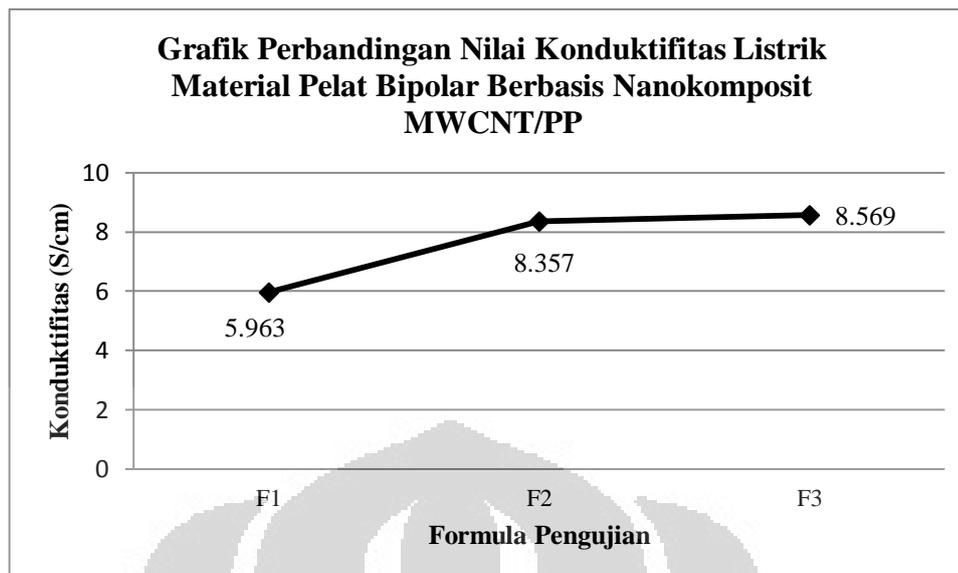
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT terhadap Konduktivitas Listrik Material Pelat Bipolar

Konduktivitas listrik merupakan parameter penting yang menjadi target dan kunci keberhasilan dari penelitian material 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 material pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC sesuai dengan yang ditetapkan oleh DOE USA adalah minimal $100 \text{ S/cm}^{[2]}$. Nilai konduktivitas listrik ini dapat dicapai dengan pemilihan material serta desain fabrikasi material yang tepat.

Salah satu fokus utama dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh penambahan fraksi volum penguat MWCNT terhadap peningkatan sifat konduktivitas listrik material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP. 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 ($\Omega \cdot \text{cm}$) berbanding terbalik dengan nilai konduktivitas listrik (S/cm). 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 material pelat bipolar berbasis nano komposit MWCNT/PP dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



Gambar 4.1. Grafik Perbandingan Nilai Konduktivitas Listrik Material Pelat Bipolar

Berdasarkan pengujian nilai konduktivitas listrik dengan metode *four-point probe* yang dilakukan di Laboratorium *Fuel Cell*, Departemen Fisika, LIPI-Serpong, diperoleh data bahwa semakin besar fraksi volum MWCNT yang ditambahkan akan semakin meningkatkan nilai konduktivitas listriknya seperti yang terlihat pada gambar di atas. Fraksi volum yang ditambahkan pada material pelat bipolar ini berturut-turut 0.1% wt, 0.5% wt dan 1% wt pada F1, F2 dan F3. Adanya peningkatan nilai konduktivitas listrik tersebut dibuktikan dengan kenaikan nilai konduktivitas listrik sebesar 5.963 S/cm, 8.357 S/cm dan 8.569 S/cm berturut-turut pada F1, F2 dan F3.

Adanya kenaikan nilai konduktivitas ini dikarenakan oleh terbentuknya *extra conductive paths* ketika kita melakukan penambahan fraksi volum MWCNT. Fenomena ini dapat dijelaskan dengan adanya data bahwa material MWCNT yang memiliki *specific surface area* dan *aspect ratio* yang besar sehingga memungkinkan terjadinya interaksi yang lebih banyak antara penguat MWCNT dengan penguat-penguat lainnya yang juga konduktif. Hasil pengujian konduktivitas listrik ini juga didukung dengan penelitian lain yang menyatakan bahwa penambahan MWCNT dapat meningkatkan nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar secara drastis karena MWCNT yang membentuk *extra effective electrical conductive paths* pada sistem nanokomposit MWCNT/PP^[3,66]. Dengan demikian, penambahan fraksi volum dari material penguat MWCNT dapat

meningkatkan nilai konduktivitas listrik dari material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP.

Peningkatan nilai konduktivitas listrik ini juga dapat dijelaskan dengan adanya berbagai macam penguat lain yang terkandung dalam sistem nanokomposit material pelat bipolar MWCNT/PP. Adanya berbagai material konduktif dalam material pelat bipolar dapat menciptakan suatu *conductive network* secara tiga dimensi yang mempengaruhi besarnya nilai konduktivitas listrik dari material pelat bipolar^[3,67-69].

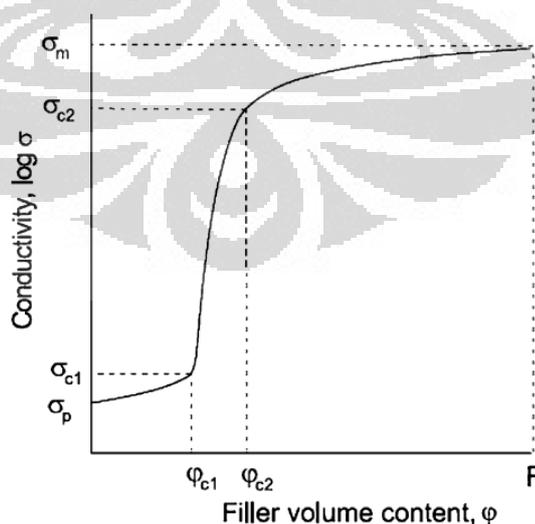
Grafit yang merupakan material pertama yang digunakan sebagai pelat bipolar memiliki konduktivitas yang cukup baik. Hal ini dibuktikan oleh pengujian yang dilakukan oleh Shu-Hang Liao pada tahun 2008 dimana konduktivitas listrik pelat bipolar akan meningkat seiring dengan penambahan jumlah grafit^[3]. Walaupun pada penelitian ini jumlah grafit yang digunakan tidak dijadikan suatu variabel, namun adanya pengaruh fraksi volum penguat grafit yang memiliki konduktivitas listrik sebesar 680 S/cm^[13] dapat mempengaruhi nilai konduktivitas listrik material pelat bipolar.

Material lain yang digunakan sebagai penguat dan *filler* pada penelitian ini adalah material karbon hitam (*carbon black*). Karbon hitam merupakan *minor conductive filler* yang ditambahkan pada material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP mampu mengisi celah atau *voids* antara berbagai *filler* yang terkandung dalam komposit. Adanya karbon hitam sebagai pengisi celah ini memungkinkan pelat bipolar berbasis nanokomposit memiliki kenaikan pada nilai konduktivitas listriknya^[2,70-71].

Selain material penguat MWCNT, grafit dan karbon hitam, adanya penambahan material penguat serat karbon juga ternyata memiliki pengaruh terhadap nilai konduktivitas listrik material pelat bipolar. Berdasarkan penelitian^[2,71-72], penambahan serat karbon pada pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP dapat mengurangi resistivitas dari komposit sehingga dapat meningkatkan konduktivitas listriknya. Namun, peningkatan konduktivitas listrik yang disebabkan oleh serat karbon ini juga bergantung pada konsentrasi serat, contohnya adalah *percolation behavior*^[2,73]. Dalam penelitian ini, serat karbon tidak menjadi fokus utama dalam meningkatkan nilai konduktivitas.

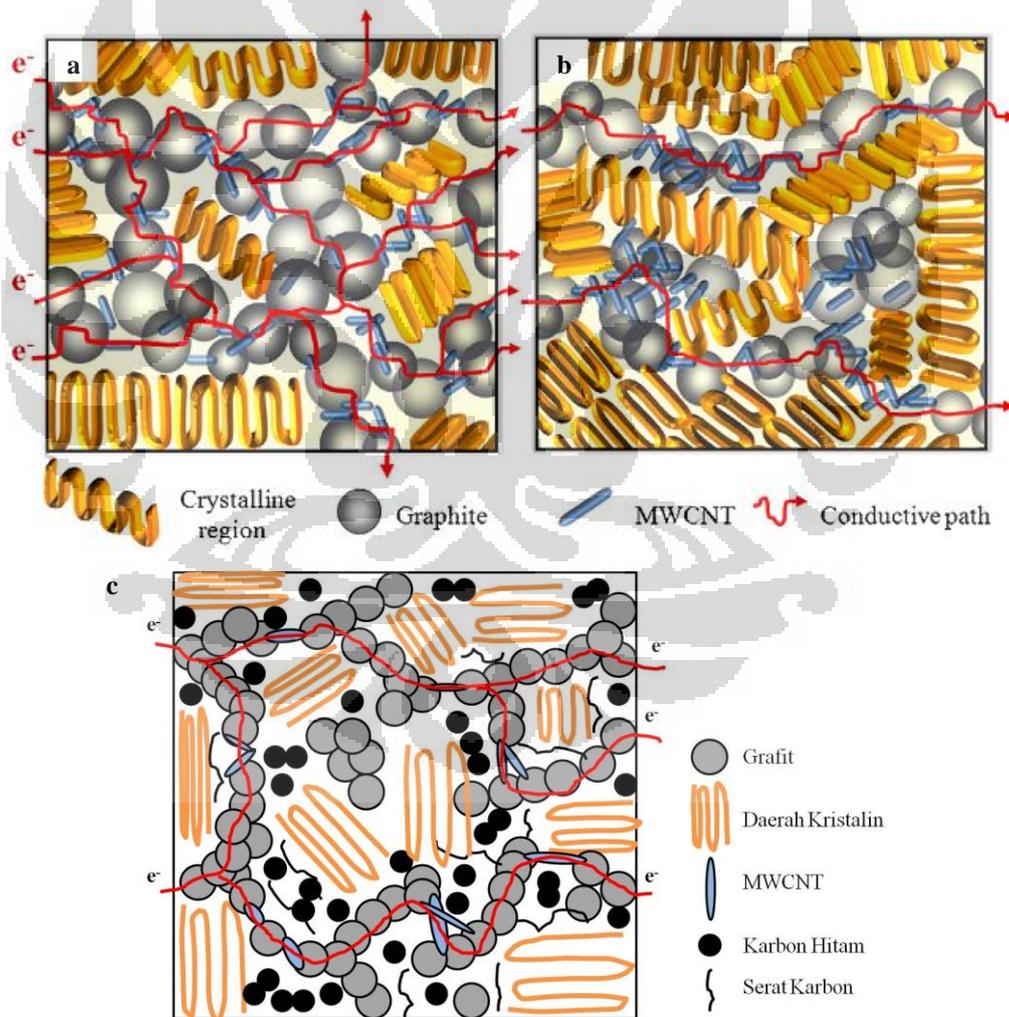
Seperti halnya karbon hitam, serat karbon dipakai sebagai minor *filler* dalam usaha mencapai nilai konduktivitas material pelat bipolar MWCNT/PP.

Percolation behavior atau *percolation theory* merupakan suatu teori yang dapat menjelaskan mekanisme konduktivitas pada *carbon polymer composite* (CPC)^[2]. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.2 bahwa komposit awalnya akan bersifat insulator ketika penambahan jumlah *filler* masih di bawah *critical value* yang disebut *percolation threshold* (ϕ_c). Ketika jumlah *filler* telah melewati nilai kritis, maka akan terbentuk suatu mekanisme konduktif pada komposit dengan nilai tertentu sehingga komposit berubah sifatnya dari insulator menjadi konduktif. Pada gambar 4.2 juga dapat dilihat bahwa nilai konduktivitas listrik maksimum (σ_m) baru akan diperoleh ketika jumlah *filler* (F) meningkat di atas *percolation threshold*. Permasalahannya saat ini adalah para peneliti terus mencari nilai optimum mengenai komposisi *filler* yang baik untuk menghasilkan konduktivitas tertinggi pada *carbon polymer composite* (CPC). Proses mendapatkan komposisi optimum ini menjadi semakin sulit ketika kita tidak mungkin secara mudah membandingkan hasil penelitian satu dengan yang lain karena adanya parameter proses dan kondisi yang berbeda-beda untuk setiap penelitian. Maka tidak heran jika ditemukan nilai optimum yang berbeda-beda dari berbagai peneliti yang memiliki fokus bahasan yang sama, yaitu pengaruh komposisi *filler* terhadap konduktivitas listrik pelat bipolar berbasis matriks polimer.



Gambar 4.2. Grafik pengaruh konsentrasi *filler* terhadap konduktivitas komposit dengan matriks polimer^[2]

Derajat kristalinitas dari polimer juga dapat mempengaruhi besarnya nilai konduktivitas listrik dari material pelat bipolar. Polimer yang digunakan dalam penelitian ini (polipropilen HI10HO) memiliki derajat kristalinitas dengan tingkat menengah atau semi kristalin^[50]. Polimer dengan derajat kristalinitas yang tinggi cenderung menghasilkan konduktivitas listrik yang lebih rendah dibanding polimer dengan derajat kristalinitas yang rendah. Hal ini dikarenakan adanya struktur kristalin (lamela) pada sistem komposit menciptakan suatu daerah yang tidak konduktif sehingga nilai konduktivitas listrik menjadi rendah^[3,74]. Penjelasan pengaruh derajat kristalinitas polimer dapat dilihat pada skema *conductive paths* berdasarkan literatur^[3] dan pendekatan yang dilakukan oleh penulis di bawah ini:

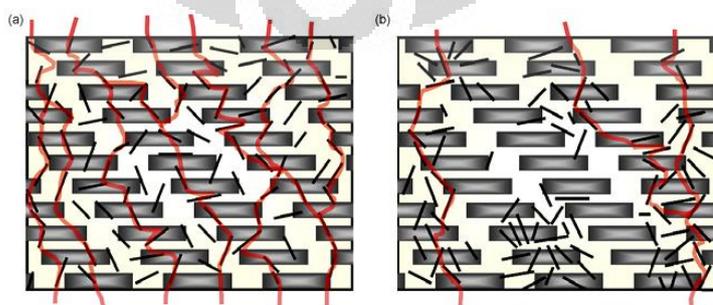


Gambar 4.3. Skema *conductive paths* material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP pada matriks polimer dengan kristalinitas rendah (a), matriks polimer dengan kristalinitas tinggi (b)^[3] dan matriks polimer dengan kristalinitas medium sesuai pendekatan penelitian (c)

Berdasarkan hasil pengujian nilai konduktivitas listrik tersebut, nilai konduktivitas tertinggi terdapat pada formula pengujian ketiga (F3) dengan nilai konduktivitas listrik sebesar 8.569 S/cm. Nilai konduktivitas listrik yang tertinggi ini ternyata belum mampu memenuhi nilai konduktivitas untuk material pelat bipolar yang telah ditetapkan oleh *Department of Energy* (DOE)^[2] di Amerika Serikat sebesar 100 S/cm. Ada beberapa analisa yang menyebabkan nilai konduktivitas listrik yang diperoleh ini masih jauh di bawah standar DOE^[2].

Konduktivitas listrik dari komposit sangat bergantung pada *mutual contact* dari material-material yang konduktif untuk menciptakan suatu *conductive paths* di dalam komposit^[3,75]. Oleh karena itu, kita harus memperhatikan interaksi apa yang dapat terjadi selama proses fabrikasi dari material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP ini. Kita harus mempertimbangkan efek-efek penambahan berbagai macam material penguat tersebut terhadap berbagai sifat fisik dan mekanis dari komposit material pelat bipolar yang diperoleh.

Penambahan MWCNT yang terlalu banyak dapat menyebabkan terbentuknya aglomerat pada material pelat bipolar berbasis nanokomposit sehingga menghambat *conductive paths* yang terbentuk^[5]. Hal ini dikarenakan adanya *surface area* yang besar dari MWCNT serta adanya gaya Van der Waals yang menyebabkan MWCNT lebih sering membentuk agregat^[5]. *Chemical compatibility* yang buruk antara MWCNT dan matriks polimer jika tidak dilakukan *treatment* khusus juga merupakan penyebab rendahnya nilai konduktivitas listrik yang dihasilkan. Penjelasan mengenai pengaruh terbentuknya agregat MWCNT terhadap nilai konduktivitas listrik (*conductive paths*) material pelat bipolar berdasarkan literatur^[76] dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.4. Mekanisme *conductive paths* pada material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP pada (a) MWCNT yang terdistribusi secara seragam dan (b) MWCNT yang membentuk agregat^[2,76]

Adanya PP-g-MA yang berfungsi sebagai *compatibility agent* seharusnya mengikat gugus hidroksil dari MWCNT. Tujuan pengikatan gugus *maleic anhydride* (-MA) dari PP-g-MA dalam penelitian ini adalah untuk memastikan terjadinya dispersi material MWCNT yang merata di dalam matriks polimer. Hal ini dikarenakan material MWCNT yang cenderung membentuk agregat dengan ikatan Van der Waals apabila tidak diberikan *surface treatment* atau *compatibility agent*^[51]. Namun, dalam penelitian ini bukan hanya material MWCNT yang memiliki gugus hidroksil. Material penguat yang memiliki gugus hidroksil lainnya adalah karbon hitam. Material karbon hitam memiliki gugus hidroksil (OH⁻) dan karboksil (COO⁻) di permukaannya^[46]. Oleh karena itu, bukan tidak mungkin gugus *maleic anhydride* (-MA) dari material PP-g-MA tidak mengikat gugus hidroksil dari MWCNT melainkan mengikat gugus hidroksil dari karbon hitam. Hal ini juga ditunjang dengan data bahwa ukuran partikel karbon hitam yang lebih besar^[52] dibandingkan ukuran MWCNT yang berukuran nano dan fraksi volum karbon hitam yang lebih besar dibandingkan fraksi volum MWCNT (30% : 1%) menyebabkan proses pengikatan gugus OH⁻ dari material MWCNT menjadi sangat kecil kemungkinannya. Dengan kecilnya kemungkinan tersebut, maka proses agregasi MWCNT dapat menghambat *conductive paths* yang terbentuk seperti pada gambar 4.4.

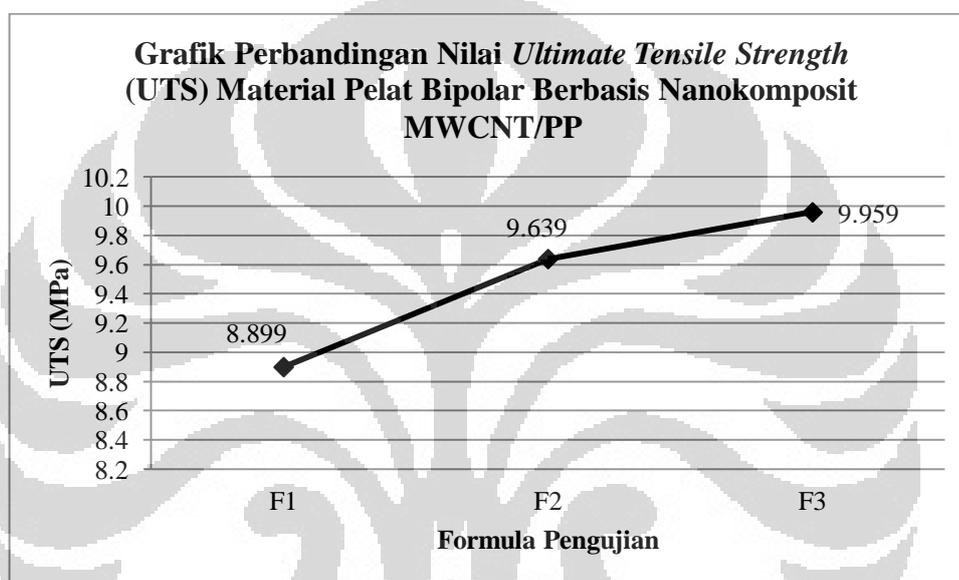
Proses *processing* yang digunakan juga dapat mempengaruhi besarnya nilai konduktivitas listrik yang diperoleh. Adanya berbagai macam *filler* yang didispersikan ke dalam matriks polimer dapat meningkatkan viskositas dari komposit yang akan dicampur atau *mixing* sehingga menyebabkan proses menjadi lebih sulit^[2]. Selain itu, konduktivitas listrik hasil *mixing* juga dipengaruhi oleh adanya proses yang melibatkan gaya geser (*shearing*)^[2,77] sehingga dapat merusak partikel-partikel konduktif (mengubah *aspect ratio* dan morfologinya).

4.2. Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT terhadap Kekuatan Tarik dan % Elongasi Material Pelat Bipolar

Pengembangan fabrikasi material pelat bipolar berbasis nanokomposit yang memiliki konduktivitas listrik dan sifat mekanis yang baik merupakan suatu proses yang sulit^[3]. Material pelat bipolar tidak hanya membutuhkan

konduktivitas listrik yang tinggi, namun juga membutuhkan kekuatan mekanis yang cukup untuk mendukung setiap komponen pada *fuel cell stack* dan menahan adanya beban dampak atau getaran.

Nilai kekuatan tarik dan % elongasi dari material pelat bipolar berbasis nanokomposit dilakukan dengan mesin *Universal Testing Machine* di Sentra Teknologi Polimer (STP) Serpong. Data hasil pengujian nilai kekuatan tarik material pelat bipolar berbasis nano komposit MWCNT/PP dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



Gambar 4.5. Grafik Perbandingan Nilai Kekuatan Tarik Material Pelat Bipolar

Berdasarkan pengujian nilai kekuatan tarik material pelat bipolar, diperoleh data bahwa semakin besar fraksi volum MWCNT yang ditambahkan akan semakin meningkatkan nilai kekuatannya seperti yang terlihat pada gambar di atas. Fraksi volum yang ditambahkan pada material pelat bipolar ini berturut-turut 0.1% wt, 0.5% wt dan 1% wt pada F1, F2 dan F3. Adanya peningkatan nilai kekuatan tarik tersebut dibuktikan dengan kenaikan nilai kekuatan tarik sebesar 8.899 MPa, 9.639 MPa dan 9.959 MPa berturut-turut pada F1, F2 dan F3.

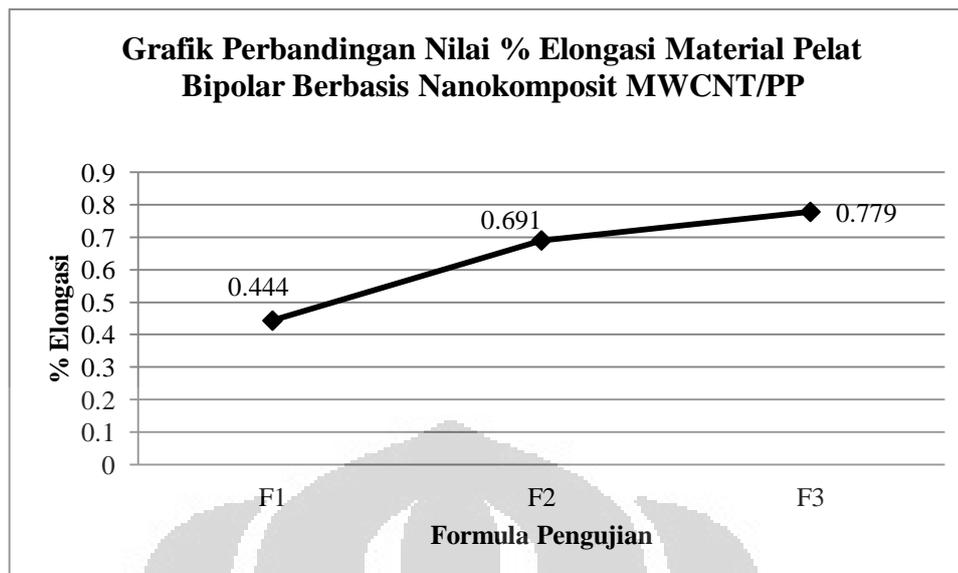
Terjadinya peningkatan nilai kekuatan tarik material pelat bipolar ini sangat dipengaruhi oleh faktor dispersi dan *compatibility* yang baik antara *filler* dan matriks polimer. Jika dilihat lebih lanjut, kenaikan kekuatan tarik dari formula satu (F1) sampai dengan formula tiga (F3) nilainya cukup kecil. Besar

kenaikannya adalah sebesar 0.74 (8.32%) dan 0.32 MPa (3.32%). Seperti yang telah dibahas sebelumnya pada bagian konduktivitas listrik, adanya *compatibility agent* (PP-g-MA) belum dapat dikatakan berfungsi secara optimal dalam proses pendispersian material penguat MWCNT karena adanya material penguat lain (karbon hitam) yang memiliki gugus yang sama dengan MWCNT. Proses dispersi yang tidak optimal dikarenakan ada sebagian MWCNT yang terdispersi namun ada juga yang berkumpul sebagai agregat. Adanya sebagian material MWCNT yang beragregat dan sebagian terjembatani oleh PP-g-MA ini dapat dilihat pada pembahasan pengujian FTIR.

Pengaruh penambahan fraksi volum MWCNT terhadap kekuatan tarik material pelat bipolar (walaupun kecil kenaikannya) disebabkan oleh penguat MWCNT yang memiliki sifat mekanis yang baik. Hal ini dapat dilihat dari besarnya kekuatan tariknya, yaitu sebesar 11-63 GPa^[47] sehingga mendukung peningkatan kekuatan tarik material pelat bipolar. Dengan adanya kenaikan fraksi volum penguat MWCNT dapat berarti kemungkinan MWCNT tersebut terdispersi oleh PP-g-MA dalam matriks polimer menjadi makin besar. Hal ini juga didukung data bahwa material penguat lain yang tidak berubah fraksi volumenya di dalam sistem komposit material pelat bipolar.

Adanya transfer beban atau tegangan yang baik ini dipengaruhi oleh mekanisme pembasahan (*wetability*) pada *interface* yang baik antara matriks polimer dan material penguatnya. Proses *wetability* yang baik ini dapat dilihat pada pembahasan hasil pengamatan SEM. Proses *wetability* yang baik akan menyebabkan transfer tegangan dapat terjadi secara optimal antara matriks polimer dengan penguat MWCNT. Selain itu, nilai kekuatan tarik yang diperoleh ini juga dikarenakan oleh adanya serat karbon yang merupakan sumber kekuatan mekanis yang utama dari material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP^[2]. Kekuatan mekanis yang dipengaruhi oleh serat karbon antara lain kekerasan, *fracture toughness* dan kekuatan tekuk. DOE tidak mempersyaratkan nilai minimum untuk kekuatan tarik pelat bipolar^[2].

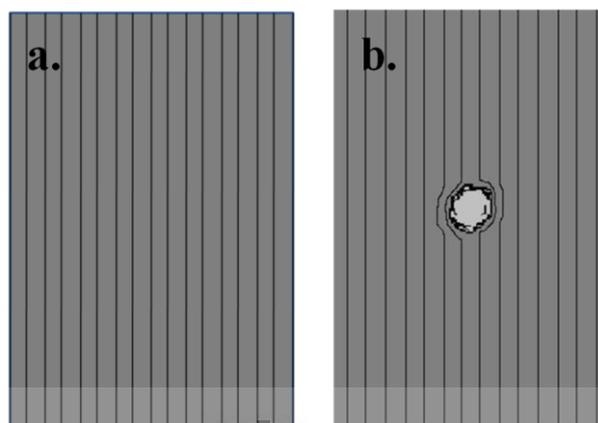
Sementara grafik yang menunjukkan perbandingan nilai elongasi saat perpatahan dari sampel material pelat bipolar untuk ketiga formulasi penelitian adalah sebagai berikut:



Gambar 4.6. Grafik Perbandingan Nilai % Elongasi Material Pelat Bipolar

Berdasarkan nilai % elongasi material pelat bipolar, diperoleh data bahwa semakin besar fraksi volum MWCNT yang ditambahkan akan semakin meningkatkan nilai % elongasinya seperti yang terlihat pada gambar di atas. Fraksi volum yang ditambahkan pada material pelat bipolar ini berturut-turut 0.1% wt, 0.5% wt dan 1% wt pada F1, F2 dan F3. Adanya peningkatan nilai % elongasi tersebut dibuktikan dengan kenaikan nilai % elongasi sebesar 0.444, 0.691 dan 0.779 berturut-turut pada F1, F2 dan F3.

Nilai % elongasi dari pengujian material pelat bipolar ini masih di bawah standar dari DOE^[2] (3-5%). Hal ini dikarenakan adanya proses *crushing* (penghancuran) setelah proses *hot blending* (rheomix) dalam pembuatan komposit menjadi bentuk yang lebih kecil dapat mengurangi kekuatannya secara drastis^[3]. Kecilnya nilai % elongasi yang diperoleh juga disebabkan adanya pengaruh keberadaan dari MWCNT dalam material pelat bipolar berbasis nanokomposit yang juga bertindak sebagai *stress concentrator*^[3] apabila tidak terdispersi secara sempurna di dalam matriks polimer. Pengaruh adanya *stress concentrator* terhadap aliran tegangan dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.7. Pengaruh adanya *stress concentrator* terhadap aliran tegangan (a) tanpa *stress concentrator* dan (b) dengan adanya *stress concentrator*^[78]

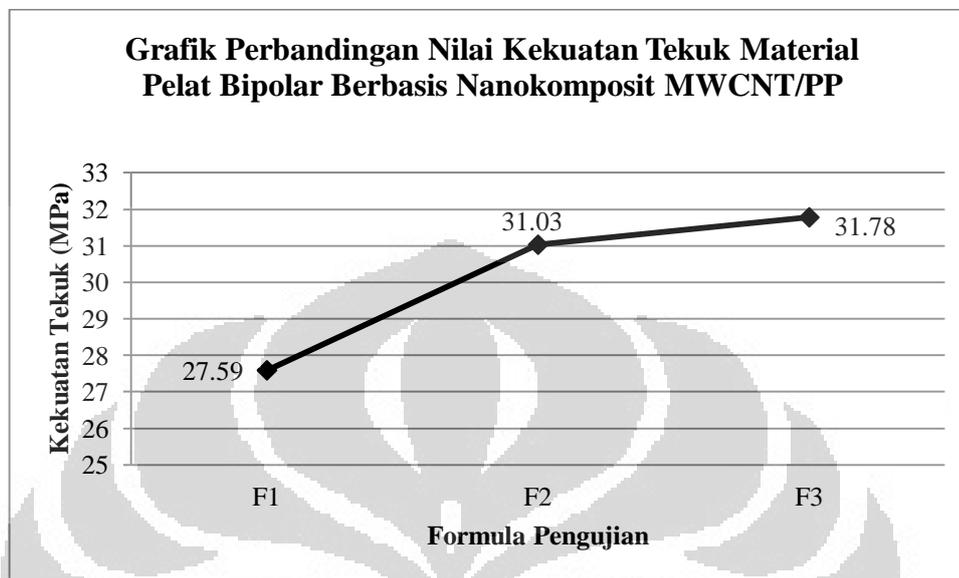
MWCNT memiliki kecenderungan untuk membentuk agregat dengan sesamanya akibat adanya gaya Van der Waals sehingga permukaan MWCNT perlu dimodifikasi dengan *surface modifier*. Tanpa adanya *surface modifier*, interaksi antara MWCNT dan matriks polimer tidak akan maksimal. Selain itu, pengaruh penggunaan polimer dengan derajat kristalinitas medium juga ditinjau dalam penelitian ini. Seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya bahwa MWCNT memiliki dispersi yang buruk pada daerah kristalin dan memiliki dispersi yang baik pada daerah amorf^[31].

4.3. Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT terhadap Kekuatan Tekuk dan Modulus Kekakuan Material Pelat Bipolar

Pengujian tekuk yang dilakukan terhadap material pelat bipolar bertujuan untuk mengetahui ketahanan material pelat bipolar tersebut terhadap mekanisme pembebanan tekuk. Standarisasi pengujian tekuk untuk material 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°C dan kelembaban relatif sebesar 50% selama lebih dari 40 jam.

Pengujian tekuk (*flexural testing*) yang dilakukan terhadap material pelat bipolar ini akan menghasilkan dua parameter penting yang berhubungan dengan sifat mekanis dari material pelat bipolar tersebut. Kedua parameter tersebut adalah nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) dan nilai modulus kekakuan atau 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 dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



Gambar 4.8. Grafik Perbandingan Nilai Kekuatan Tekuk Material Pelat Bipolar

Berdasarkan nilai kekuatan tekuk material pelat bipolar, diperoleh data bahwa semakin besar fraksi volum MWCNT yang ditambahkan akan semakin meningkatkan nilai kekuatannya seperti yang terlihat pada gambar di atas. Fraksi volum yang ditambahkan pada material pelat bipolar ini berturut-turut 0.1%wt, 0.5%wt dan 1%wt pada F1, F2 dan F3. Adanya peningkatan nilai kekuatan tekuk tersebut dibuktikan dengan kenaikan nilai kekuatan tekuk sebesar 27.59 MPa, 31.03 MPa dan 31.78 MPa berturut-turut pada F1, F2 dan F3.

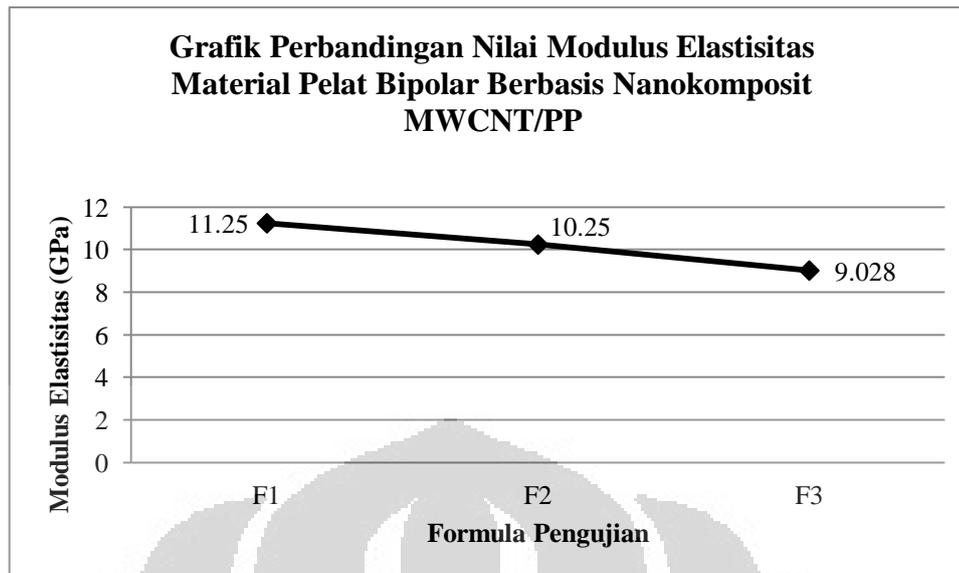
Adanya kenaikan nilai kekuatan tekuk pada material pelat bipolar ini dapat dijelaskan dengan mekanisme yang hampir sama dengan kenaikan kekuatan tarik material pelat bipolar. Hal ini disebabkan oleh penguat MWCNT yang memiliki sifat mekanis yang baik^[47]. Dengan adanya kenaikan fraksi volum penguat MWCNT dapat berarti kemungkinan MWCNT tersebut terdispersi oleh PP-g-MA dalam matriks polimer menjadi makin besar. Hal ini juga didukung data bahwa material penguat lain yang tidak berubah fraksi volumenya di dalam sistem komposit pelat bipolar.

Adanya transfer beban atau tegangan yang baik ini dipengaruhi oleh mekanisme pembasahan (*wetability*) pada *interface* yang baik antara matriks

polimer dan material penguatnya. Proses *wetability* yang baik ini dapat dilihat pada pembahasan hasil pengamatan SEM dan hasil pengujian FTIR yang menunjukkan adanya ikatan antara gugus *maleic anhydride* (-MA) dari PP-g-MA yang bereaksi dengan gugus fungsi dari penguat karbon. Proses *wetability* yang baik akan menyebabkan transfer tegangan dapat terjadi secara optimal antara matriks polimer dengan penguat MWCNT.

Nilai kekuatan tekuk yang diperoleh ini (F1, F2 dan F3) sudah melewati batas yang ditetapkan oleh DOE^[2] tentang material pelat bipolar, yaitu sebesar 25 MPa. Kekuatan tekuk yang diperoleh ini juga dikarenakan oleh adanya serat karbon yang merupakan sumber kekuatan mekanis yang utama dari pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP^[2]. Kekuatan mekanis yang dipengaruhi oleh serat karbon antara lain kekerasan, *fracture toughness* dan kekuatan tekuk. Selain serat karbon, material pengisi lain yang berperan adalah karbon hitam yang dapat mengisi celah-celah (*voids*) di dalam sistem komposit. Keberadaan berbagai penguat karbon (termasuk MWCNT) yang bersifat lebih kaku dibandingkan matriks polimer di dalam sistem komposit dapat menyebabkan kenaikan nilai kekuatan tekuk dari material pelat bipolar^[3].

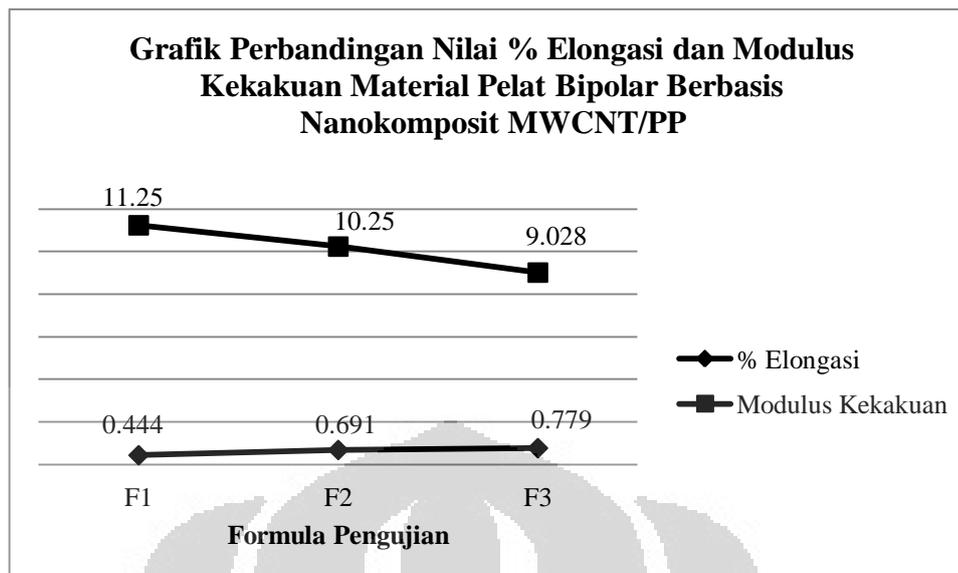
Selain kekuatan tekuk, data lain yang diperoleh dari pengujian tekuk ini adalah modulus elastisitas. Grafik yang menunjukkan perbandingan nilai modulus elastisitas dari spesimen material pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian adalah sebagai berikut:



Gambar 4.9. Grafik Perbandingan Nilai Modulus Elastisitas Material Pelat Bipolar

Berdasarkan nilai modulus elastisitas material pelat bipolar, diperoleh data bahwa semakin besar fraksi volum MWCNT akan semakin menurunkan nilai modulus elastisitasnya seperti yang terlihat pada gambar di atas. Fraksi volum yang ditambahkan pada material pelat bipolar ini berturut-turut 0.1%wt, 0.5%wt dan 1%wt pada F1, F2 dan F3. Adanya penurunan nilai modulus elastisitas tersebut dibuktikan dengan penurunan nilai modulus elastisitas sebesar 11.25 GPa, 10.25 GPa dan 9.028 GPa berturut-turut pada F1, F2 dan F3.

Penambahan fraksi volum penguat MWCNT pada komposit MWCNT/PP menurunkan modulus tekuk komposit MWCNT/PP. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi 0.1%wt - 1%wt volum penguat MWCNT yang ditambahkan dalam komposit MWCNT/PP mampu menurunkan modulus tekuknya sehingga formula pengujian dengan % volum MWCNT lebih banyak (F3) memiliki kekakuan yang lebih rendah. Adanya penurunan modulus kekakuan ini juga dibuktikan dengan hasil pengujian % elongasi material komposit pelat bipolar MWCNT/PP yang meningkat dengan peningkatan % volum penguat MWCNT. Hubungan antara % elongasi dan nilai modulus kekakuan dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



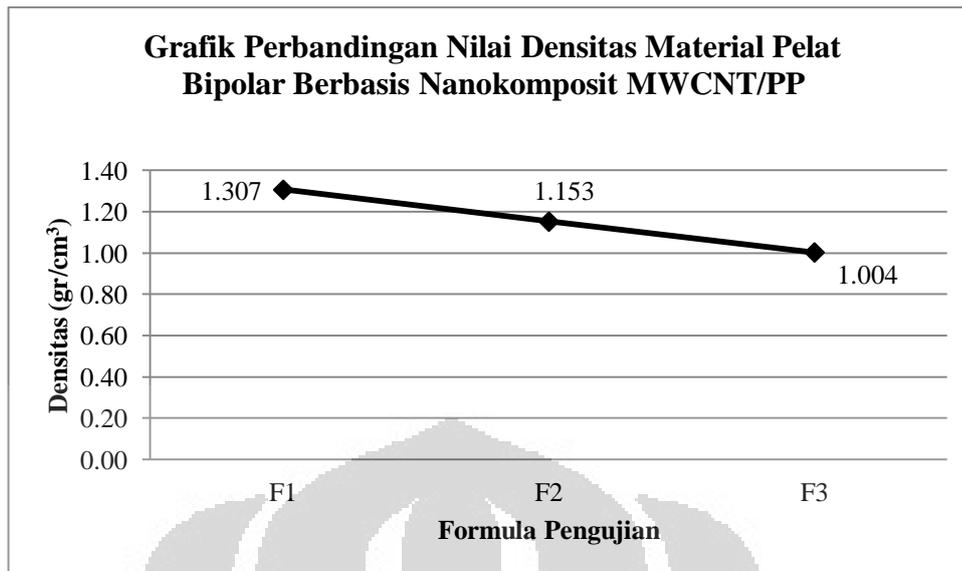
Gambar 4.10. Grafik Perbandingan % Elongasi dan Modulus Kekakuan Material Pelat Bipolar

4.4. Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT terhadap Nilai Densitas dan % Porositas Material Pelat Bipolar

Salah satu parameter penting yang menentukan tingkat keberhasilan dari penelitian ini adalah reduksi berat dari material pelat bipolar. Reduksi berat dari material 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 material pelat bipolar dengan berat yang relatif ringan maka parameter yang dapat dijadikan tolak ukur adalah densitas dari material 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 material pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



Gambar 4.11. Grafik Perbandingan Nilai Densitas Material Pelat Bipolar

Berdasarkan nilai densitas material pelat bipolar, diperoleh data bahwa semakin besar fraksi volum MWCNT yang ditambahkan akan semakin menurunkan nilai densitasnya seperti yang terlihat pada gambar di atas. Fraksi volum yang ditambahkan pada material pelat bipolar ini berturut-turut 0.1% wt, 0.5% wt dan 1% wt pada F1, F2 dan F3. Adanya penurunan nilai densitas tersebut dibuktikan dengan penurunan nilai densitas sebesar 1.307 gr/cm³, 1.153 gr/cm³ dan 1.004 gr/cm³ berturut-turut pada F1, F2 dan F3.

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

Tabel 4.1. Data Literatur Nilai Densitas Bahan

Bahan	Densitas (gr/cm ³)
Polipropilen HI10HO ^[50]	0.9
Serat Karbon ^[51]	1.75
Karbon Hitam ^[52]	2
Grafit ^[13]	1.26
PP-g-MA ^[13]	0.91
Anti Oksidan CN-CAT A215 ^[13]	0.85
CNT (<i>Multiwall</i>) ^[53]	0.037

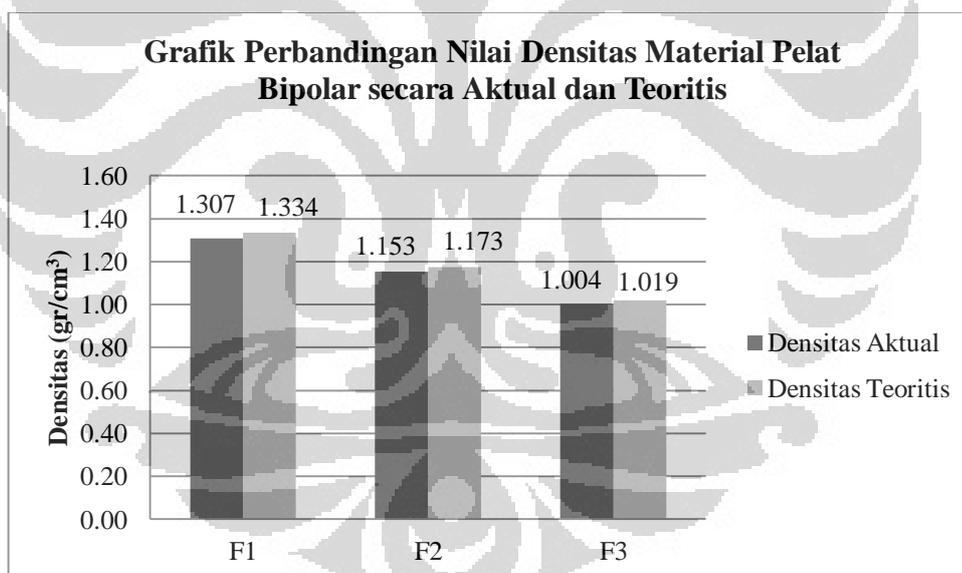
Komposisi dari setiap bahan yang digunakan untuk setiap formula penelitian telah ditentukan sebelumnya. Berdasarkan komposisi tersebut maka dapat ditentukan fraksi volum masing-masing bahan untuk setiap formula

penelitian. Dengan diketahuinya nilai densitas dan fraksi volum 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* seperti pada persamaan 3.3. Prediksi nilai densitas material pelat bipolar secara teoritis untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 4.2. Prediksi Nilai Densitas Pelat Bipolar Teoritis

Formula Penelitian	Densitas (gr/cm^3)
F1	1.334
F2	1.173
F3	1.019

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



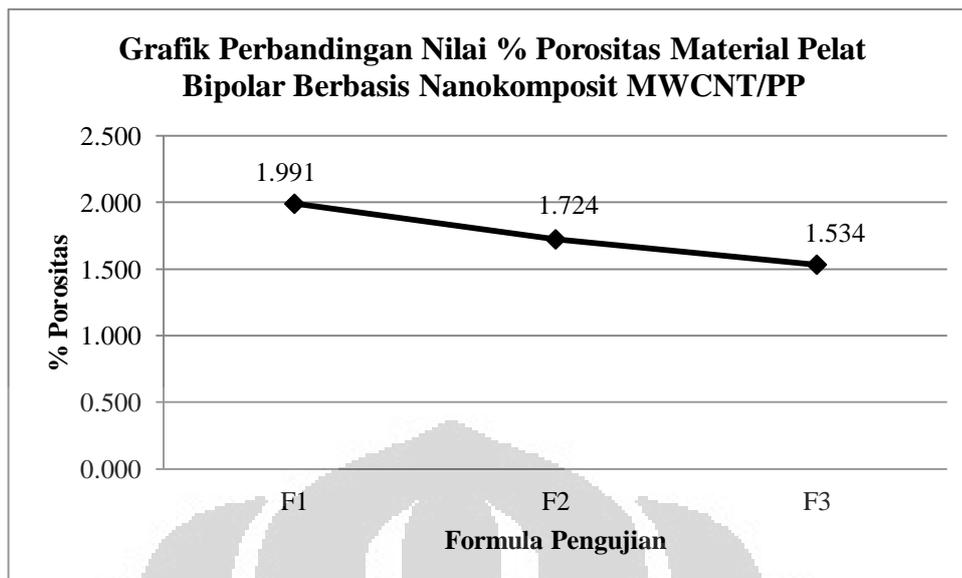
Gambar 4.12. Grafik Perbandingan Densitas Material Pelat Bipolar secara Aktual dan Teoritis

Berdasarkan grafik tersebut di atas dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya penambahan fraksi volum penguat MWCNT, maka akan menurunkan nilai densitas material pelat bipolar. Penurunan densitas yang terjadi antara formula 1 dengan formula 3 adalah sekitar 23%. Hal ini membuktikan bahwa penguat MWCNT bukan hanya dapat meningkatkan sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis, namun juga dapat mereduksi berat material pelat bipolar

sehingga dihasilkan material pelat bipolar yang lebih ringan. Penambahan penguat MWCNT yang memiliki densitas sebesar 0.037 gr/cm^3 [53] mampu mereduksi densitas pelat bipolar yang didominasi oleh berbagai penguat karbon lain yang memiliki densitas cukup besar seperti serat karbon, grafit dan karbon hitam.

Berdasarkan grafik di atas juga dapat dilihat bahwa nilai densitas material pelat bipolar hasil pengujian (aktual) selalu lebih rendah dari prediksi nilai densitas berdasarkan literatur (teoritis). Hal ini menunjukkan bahwa reduksi densitas material 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 yang dilakukan dalam dua tahap, yaitu tahap pencampuran pertama selama 10 menit lalu tahap pencampuran kedua selama 5 menit. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan homogenitas dari matriks dan penguat dari pelat bipolar berbasis komposit ini. Pada proses pencetakan panas dilakukan dengan kondisi penekanan (*compressing*) yang bersiklik antara suhu dan tekanan sehingga membuat proses penyatuan antara setiap bahan dapat terjadi lebih optimal.

Hasil pengujian nilai densitas pelat bipolar ini dapat sekaligus digunakan untuk pengujian % porositas yang dimiliki oleh material pelat bipolar. Porositas merupakan salah satu parameter penting yang menentukan keberhasilan dari penelitian ini. Proses pembasahan (*wetability*) yang buruk pada sistem MWCNT dengan matriks polimer dapat menyebabkan terbentuknya celah atau *voids* pada komposit pelat bipolar^[5]. Secara umum material 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 material pelat bipolar tersebut. Hasil pengujian porositas material pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



Gambar 4.13. Grafik Perbandingan Nilai % Porositas Material Pelat Bipolar

Berdasarkan nilai % porositas material pelat bipolar, diperoleh data bahwa semakin besar fraksi volum MWCNT yang ditambahkan akan semakin menurunkan nilai % porositasnya seperti yang terlihat pada gambar di atas. Fraksi volum yang ditambahkan pada material pelat bipolar ini berturut-turut 0.1%wt, 0.5%wt dan 1%wt pada F1, F2 dan F3. Adanya penurunan nilai % porositas tersebut dibuktikan dengan penurunan % porositas sebesar 1.991%, 1.724% dan 1.534% berturut-turut pada F1, F2 dan F3.

Proses reduksi porositas material 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 dua tahap, yaitu tahap pencampuran pertama selama 10 menit lalu tahap pencampuran kedua selama 5 menit. Hal ini membuat pencampuran antara setiap bahan menjadi lebih homogen. Pada proses pencetakan panas dilakukan dengan kondisi penekanan (*compressing*) yang bersiklik antara suhu dan tekanan yang membuat proses penyatuan antara setiap bahan dapat terjadi lebih optimal.

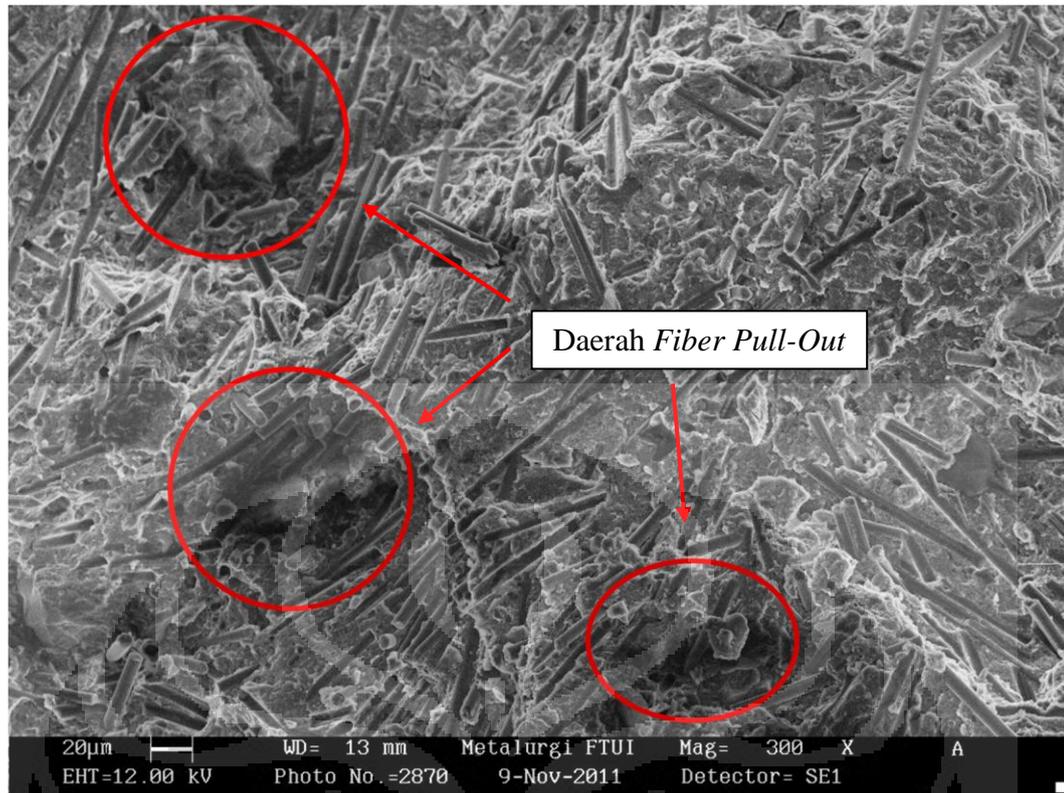
Karbon hitam merupakan *minor conductive filler* yang ditambahkan pada material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP mampu mengisi celah atau *voids* antara berbagai *filler* yang terkandung dalam komposit^[2]. Adanya karbon hitam sebagai pengisi celah ini memungkinkan material pelat bipolar

berbasis nanokomposit memiliki penurunan pada % porositasnya. Adanya *filler* yang terdispersi secara merata di dalam material pelat bipolar dapat mengurangi besarnya porositas secara efektif pada material pelat bipolar^[5]. Besarnya porositas pada komposit pelat bipolar dapat dikurangi dengan penambahan suatu *surfactant* atau *coupling agents* yang didispersikan secara merata pada nanokomposit MWCNT/PP^[2,5].

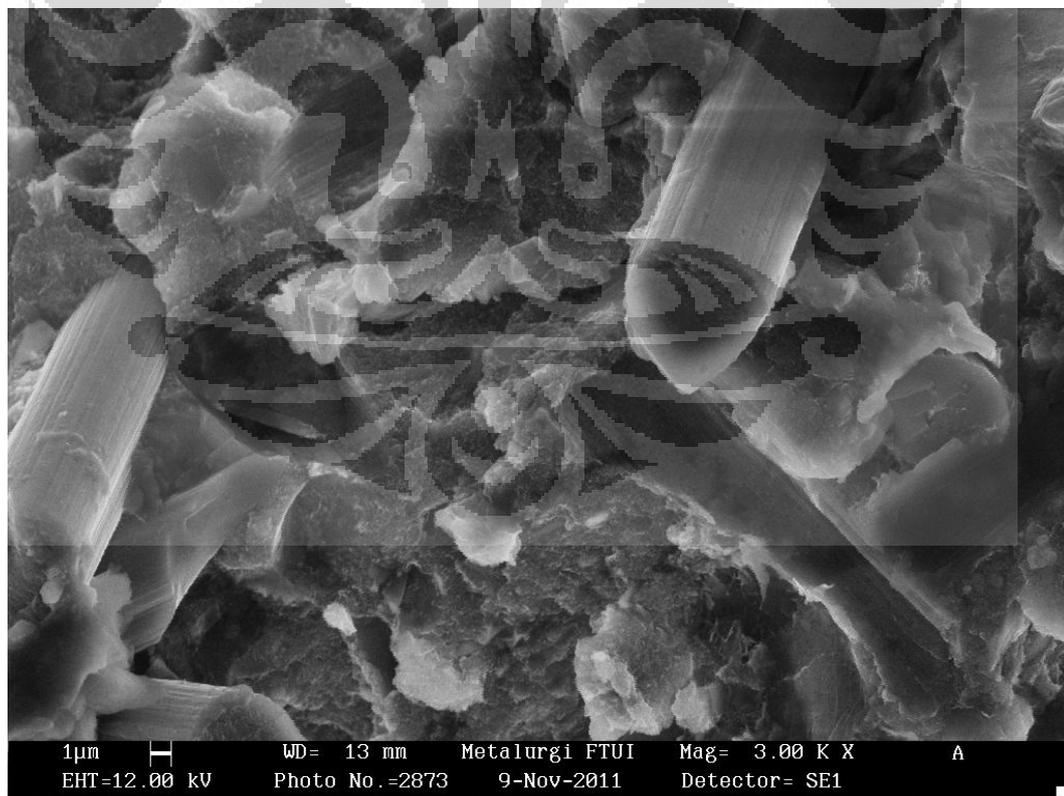
4.5. Analisa Permukaan Patahan Tekuk dan Komposisi Kimia Material Pelat Bipolar

Pengamatan permukaan patahan dilakukan dengan menggunakan SEM jenis LEO 420 di Laboartorium Uji Mekanik Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia. Sampel yang digunakan dalam proses pengamatan ini adalah sampel hasil patahan pengujian fleksural. Dari tiga jenis formula yang diteliti, sampel formula ketiga (F3) adalah sampel yang digunakan untuk diamati permukaan patahannya dengan SEM. Hal ini dikarenakan sampel F3 merupakan sampel material pelat bipolar yang memiliki konduktivitas dan sifat mekanis paling baik dalam penelitian ini.

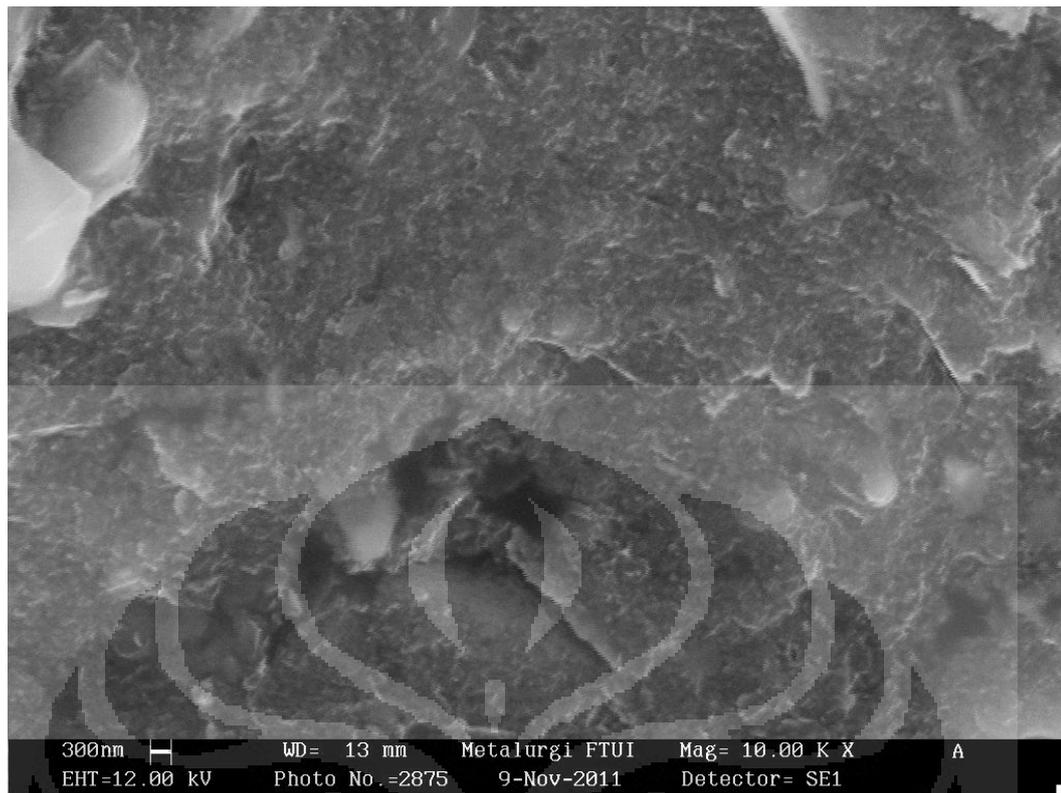
Tujuan dilakukannya pengamatan permukaan patahan ini adalah untuk mengetahui dispersi penguat di dalam matriks polimer. Hal ini juga sekaligus untuk melihat proses *wetability* yang terjadi antara matriks dan material *filler*. Hasil pengamatan permukaan patahan sampel hasil uji fleksural dengan berbagai perbesaran adalah sebagai berikut:



(a)



(b)



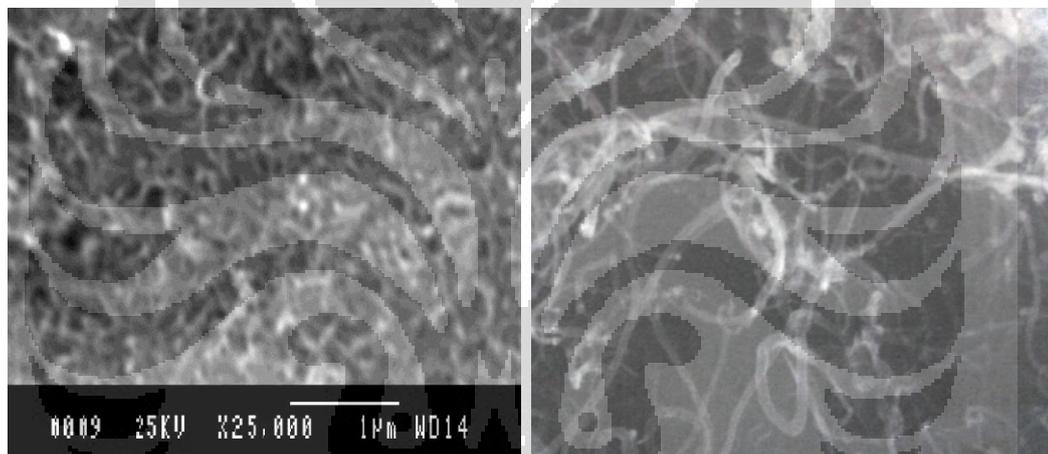
Gambar 4.14. Permukaan patahan sampel F3 dengan menggunakan SEM (a) perbesaran 300x, (b) perbesaran 3.000x dan (c) perbesaran 10.000x

Berdasarkan foto pengamatan permukaan patahan dengan SEM tersebut dapat dilihat bahwa secara umum, matriks polimer sudah dapat membasahi penguat atau *filler* yang terkandung di dalam komposit pelat bipolar tersebut. Salah satu bukti yang mendukung analisa ini adalah adanya penguat serat karbon yang terselubungi oleh matriks polimer. Proses penyelubungan serat karbon ini terjadi di berbagai lokasi pengamatan patahan pelat bipolar seperti pada gambar 4.14 (b).

Walaupun sudah dapat terbasahi dengan baik, namun masih dapat dilihat adanya bagian-bagian yang mengalami *fiber pull-out* (ditandai dengan daerah lingkaran merah) dalam sistem komposit seperti pada gambar 4.14 (a). Adanya proses *fiber pull-out* dalam sistem komposit ini dikarenakan oleh proses pembasahan (*wetability*) yang masih kurang optimal dari matriks polimer terhadap penguat karbon. Kekurangan ini juga dapat disebabkan oleh belum berfungsinya secara optimal material PP-g-MA sebagai *compatibility agent* untuk menjebatani gugus fungsi antara matriks polimer dan penguat karbon. Adanya mekanisme *fiber pull-out* ini tentunya akan sangat mempengaruhi berbagai sifat fisik dan mekanis material pelat bipolar yang dihasilkan. Sifat-sifat yang dipengaruhi oleh

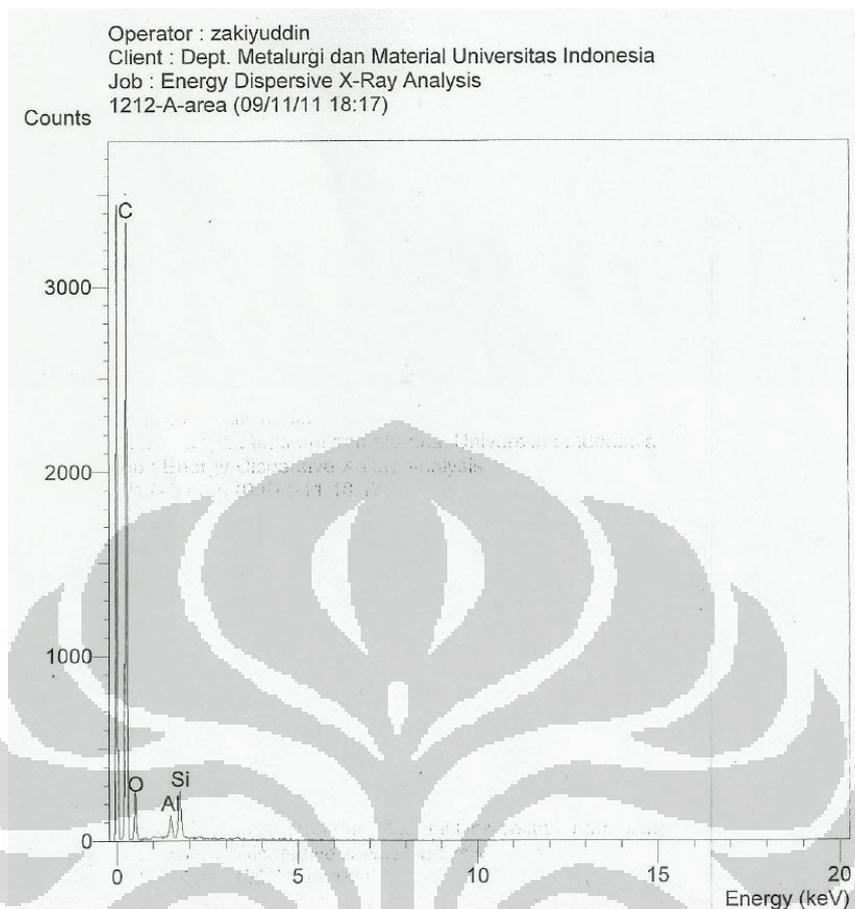
mekanisme ini antara lain: nilai konduktivitas listrik, kekuatan tarik dan tekuk, serta besarnya nilai kerapatan massa dan porositasnya.

Pada penelitian ini, pengamatan penguat MWCNT tidak bisa dilakukan dengan menggunakan SEM karena perbesaran maksimal dari alat (10.000 kali) belum bisa mendeteksi adanya MWCNT seperti terlihat pada gambar 4.14 (c). Dengan perbesaran 10.000 kali, ukuran yang dideteksi oleh SEM sebesar 300 nm, sedangkan ukuran sampel MWCNT yang digunakan dalam penelitian memiliki diameter luar sebesar 13-18 nm dan panjang 1-12 um. Bentuk morfologi dari penguat MWCNT murni berdasarkan pengamatan dengan *high resolution SEM* (HR-SEM) di BATAN (Serpong) dan data dari produsen^[53] dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.15. Morfologi dari MWCNT dengan alat HR-SEM (kiri) dan TEM^[53] (kanan)

Selain pengamatan permukaan patahan dengan menggunakan SEM, dilakukan pula karakterisasi komposisi kimia dengan menggunakan EDS. Hasil pengujian komposisi kimia dengan EDS terhadap sampel patahan tekuk material pelat bipolar adalah sebagai berikut:

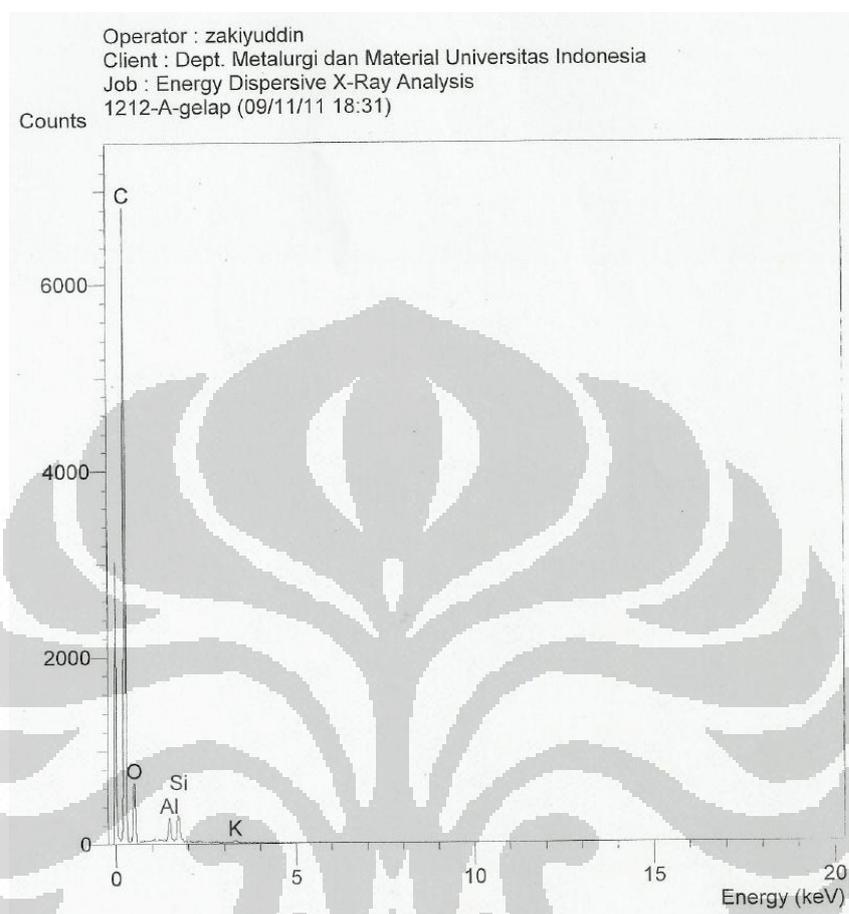


Gambar 4.16. Hasil komposisi kimia material pelat bipolar dengan EDS pada seluruh area sampel

Gambar di atas merupakan hasil pemindaian (*scanning*) dari seluruh area patahan tekuk yang diamati. Gambar di atas menunjukkan adanya konsentrasi atom karbon yang tinggi pada sampel. Hal ini jelas dapat dimengerti karena adanya berbagai macam penguat karbon yang terkandung dalam material komposit pelat bipolar ini, seperti grafit, karbon hitam, serat karbon dan MWCNT. Adanya unsur minor seperti Al dan Si merupakan kontribusi dari % *ash* yang terkandung dalam bahan dasar atau *raw material* yang digunakan. Hal ini telah dikonfirmasi dengan *material properties* dari produsen sekaligus pembuktian dengan detektor *backscattered electron* yang mendeteksi adanya fasa gelap dan terang di dalam sampel pelat bipolar.

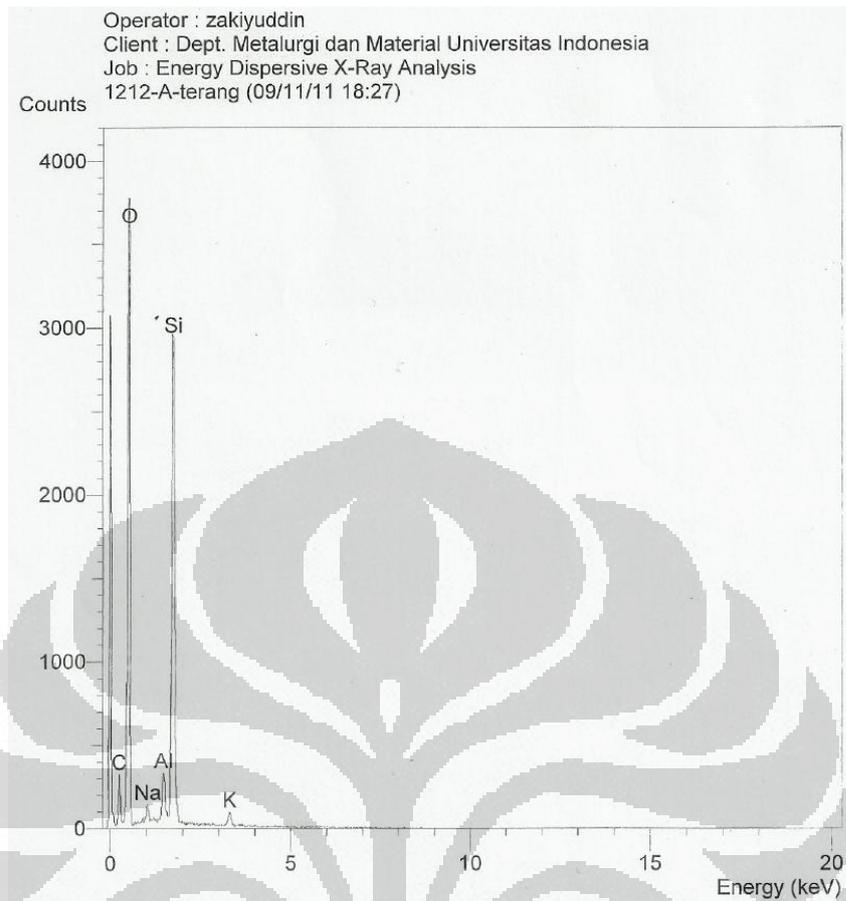
Penembakan fasa gelap dan terang untuk mengetahui komposisi kimianya dapat dilihat pada grafik EDS selanjutnya dimana pada fasa gelap merupakan kumpulan dari berbagai unsur karbon yang terkandung dalam pelat bipolar seperti

yang telah dijelaskan sebelumnya. Hasil penembakan EDS pada fasa gelap dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.17. Hasil komposisi kimia material pelat bipolar dengan EDS pada fasa gelap

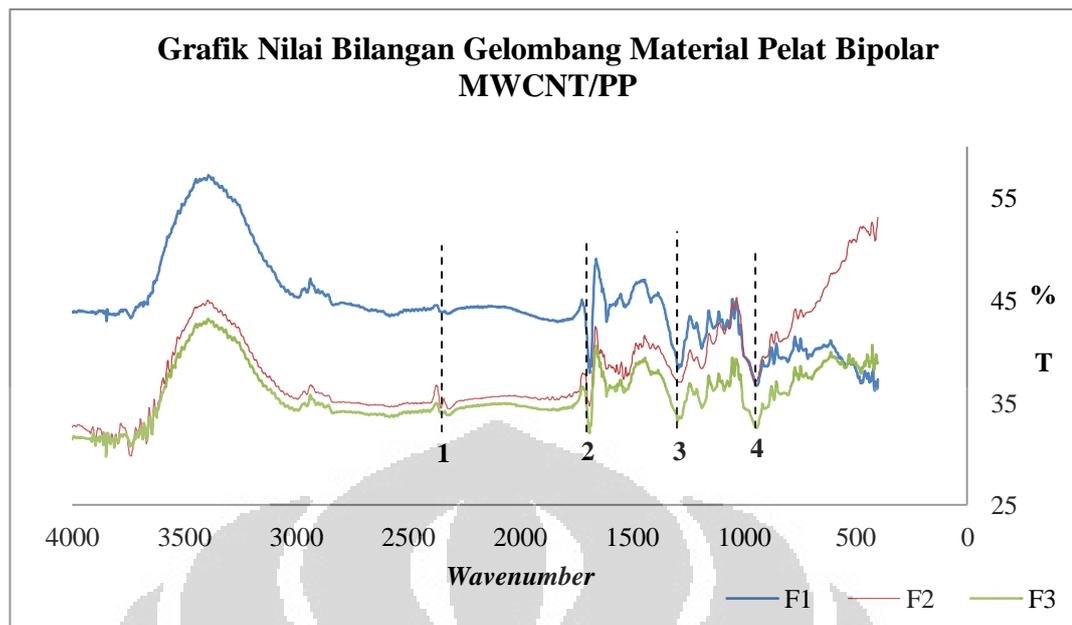
Sementara itu, hasil penembakan fasa terang pada sampel patahan tekuk pelat bipolar menunjukkan adanya unsur Si, Na, K dan Al yang muncul akibat adanya % *ash* yang terkandung dalam *raw material* yang digunakan. Salah satu material yang berkontribusi terhadap % *ash* ini adalah grafit^[79]. Salah satu permasalahan dari penggunaan grafit alam dalam berbagai aplikasi adalah tingginya kandungan *ash* yang biasanya mengandung Fe dan Si. Pengaruh *ash* ini baru dapat dihilangkan dengan proses *leaching* di dalam larutan asam atau melakukan proses *exposure* dengan gas-gas halogen^[79]. Adanya kadar oksigen yang tinggi dari fasa terang material pelat bipolar ini dikarenakan adanya proses oksidasi yang dialami oleh berbagai material penyusun material pelat bipolar. Hasil penembakan EDS pada fasa terang dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.18. Hasil komposisi kimia material pelat bipolar dengan EDS pada titik terang

4.6. Analisa Gugus Fungsi Pelat Bipolar

Pengujian karakterisasi gugus fungsi material pelat bipolar dilakukan dengan FTIR di Laboratorium Afiliasi Kimia, Departemen Kimia, Universitas Indonesia. Hasil pengujian gugus fungsi tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.19. Hasil pengujian gugus fungsi dengan FTIR

Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat beberapa informasi penting yang mendukung berbagai analisa yang telah dikemukakan dalam pembahasan sebelumnya. Dalam pengujian FTIR ini, data yang digunakan dari percobaan adalah data % *transmittance* dari sampel ketika ditembak sinar infra merah lalu data tersebut dicocokkan dengan literatur *database* FTIR^[80]. Data yang diperoleh dari gambar 4.19 garis 1, pada bilangan gelombang (*wavenumber*) sekitar 2300 (2324 pada F1, 2312 pada F2 dan 2314 pada F3) ditemukan adanya gugus karboksil (COO⁻) pada sampel pelat bipolar^[80]. Gugus karboksil merupakan indikasi adanya reaksi antara gugus *maleic anhydride* dari PP-g-MA dengan gugus hidroksil (OH⁻) dari penguat karbon^[41]. Gugus karboksil (COO⁻) ini ditemukan dengan % *transmittance* yang medium sampai lemah. Hal ini menandakan bahwa ada sejumlah material PP-g-MA yang berhasil menjebatani antara penguat karbon (MWCNT maupun karbon hitam) dengan matriks polipropilen.

Pada bilangan gelombang sekitar 1600 (Gambar 4.19 garis 2) pada ketiga sampel pengujian ditemukan adanya gugus fungsi C=C alken yang merupakan gugus fungsi dari material MWCNT^[80]. Sedangkan pada *range* bilangan gelombang 1134 sampai dengan 1294 (Gambar 4.19 garis 3) selalu ditemui adanya *peak* yang dapat berasal dari beberapa gugus fungsi seperti ester (COOR),

karboksil (COO^-), anhidrit dan hidroksil (OH^-)^[80]. Dengan adanya gugus-gugus tersebut pada ketiga sampel bipolar maka dapat disimpulkan bahwa proses dispersi antara matriks polimer polipropilen dengan berbagai penguat karbon tidak berjalan sepenuhnya atau kurang optimal. Hal ini ditandai dengan masih adanya gugus anhidrat yang berasal dari PP-g-MA dan gugus hidroksil (OH^-) dari penguat karbon yang belum terikat. Di sisi lain juga ditemukan adanya hasil pengikatan gugus anhidrat dengan gugus hidroksil (OH^-) yang menghasilkan gugus fungsi ester (COOR) dan karboksil (COO^-)^[41].

Dengan demikian, hasil pengujian FTIR ini telah mendukung teori-teori yang telah dikemukakan sebelumnya bahwa dalam komposit pelat bipolar yang digunakan dalam penelitian ini masih ada yang belum kompatibel antara matriks dan pengisinya, namun ada juga yang sudah berhasil dijembatani oleh *compatibility agent* PP-g-MA. Pada bilangan gelombang sekitar 900 (Gambar 4.19 garis 4) merupakan indikasi dari gugus alken^[80] yang berasal dari matriks polimer yang digunakan yaitu polipropilen.

BAB 5 PENUTUP

5.1. Kesimpulan

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

1. Penambahan fraksi volum penguat *multi wall carbon nano tube* (MWCNT) memiliki pengaruh yang cukup signifikan dalam meningkatkan sifat mekanis dan sifat konduktivitas listrik material pelat bipolar berbasis nano komposit MWCNT/PP.
2. Nilai konduktivitas listrik *in-plane* tertinggi adalah sebesar 8.569 S/cm untuk F3 (penambahan 1%wt MWCNT) dan nilai konduktivitas listrik *in-plane* terendah adalah sebesar 5.963 S/cm untuk F1 (penambahan 0.1% wt MWCNT).
3. Nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) tertinggi adalah sebesar 9.959 MPa untuk F3 (penambahan 1% wt MWCNT) dan nilai UTS terendah adalah sebesar 8.899 MPa untuk F1 (penambahan 0.1%wt MWCNT).
4. Nilai elongasi tertinggi adalah sebesar 0.779% untuk F3 (penambahan 1%wt MWCNT) dan nilai elongasi terendah adalah sebesar 0.444% untuk F1 (penambahan 0.1% wt MWCNT).
5. Nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) tertinggi adalah sebesar 31.78 MPa untuk F3 (penambahan 1%wt MWCNT) dan nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) terendah adalah sebesar 27.59 MPa untuk F1 (penambahan 0.1%wt MWCNT). Nilai kekuatan tekuk yang dimiliki oleh material pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian sudah memenuhi target kekuatan tekuk yang harus dimiliki oleh material pelat bipolar PEMFC sesuai dengan target DOE^[2], yaitu sebesar 25 MPa.
6. Nilai modulus elastisitas tertinggi adalah sebesar 11.25 GPa untuk F1 (penambahan 0.1% wt MWCNT) dan nilai modulus elastisitas terendah adalah sebesar 9.028 GPa untuk F3 (penambahan 1%wt MWCNT).
7. Nilai densitas terendah adalah sebesar 1.004 gram/cm³ untuk F3 (penambahan 1% wt MWCNT) dan nilai densitas tertinggi adalah sebesar 1.307 gram/cm³ untuk F1 (penambahan 0.1% wt MWCNT).

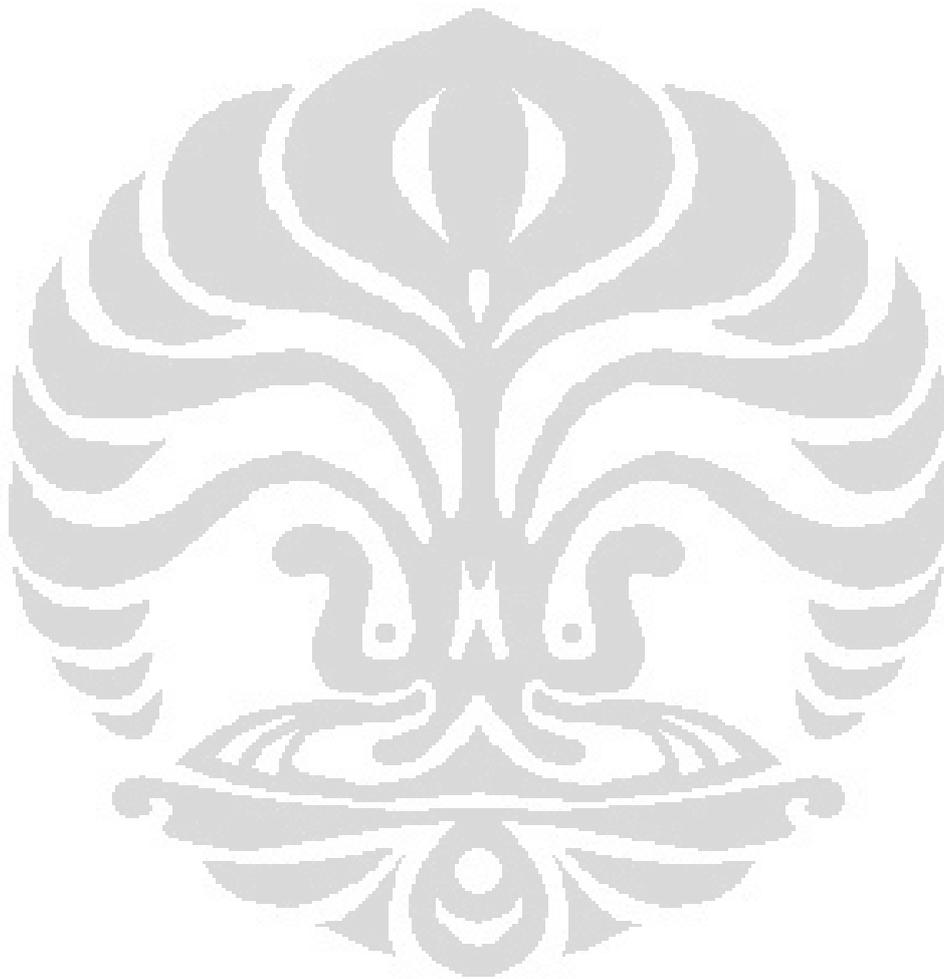
8. Nilai porositas terendah adalah sebesar 1.534% untuk F3 (penambahan 1% wt MWCNT) dan nilai porositas tertinggi adalah sebesar 1.991% untuk F1 (penambahan 0.1% wt MWCNT).
9. Hasil analisa permukaan patahan tekuk dengan SEM secara umum menunjukkan matriks sudah dapat membasahi penguat namun masih ada *fiber pull out* di beberapa titik.
10. Hasil analisa gugus fungsi material pelat bipolar dengan FTIR menunjukkan bahwa PP-g-MA yang berperan sebagai *compatibilizer* dalam nanokomposit MWCNT/PP masih belum mampu bekerja secara optimal untuk menjebatani penguat MWCNT terhadap matriks polipropilen.

5.2. Saran

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

1. Polipropilen (PP) yang digunakan sebagai matriks dalam pembuatan nanokomposit MWCNT/PP harus memiliki nilai derajat kristanilitas yang rendah sehingga mampu membentuk lebih banyak *conductive path* (daerah kristalin minimum) yang berperan sebagai jalur penghantar pergerakan elektron dalam nanokomposit MWCNT/PP yang pada akhirnya akan meningkatkan nilai konduktivitas listrik dari material pelat bipolar.
2. Fraksi volum penguat grafit yang digunakan dalam pembuatan nanokomposit MWCNT/PP harus ditingkatkan sebagai partikel konduktif yang dapat membentuk *conductive path* sehingga dapat meningkatkan konduktivitas listrik material pelat bipolar.
3. MWCNT yang digunakan sebagai penguat dalam nanokomposit MWCNT/PP sebaiknya diberikan *surface modifier* atau dilakukan *surface treatment* agar kecenderungan partikel nano MWCNT untuk membentuk agregat dapat diminimalisasi sekaligus menjebatani penguat ini dengan matriks polipropilen.
4. Penggunaan *compatibilizer* PP-g-MA dalam nanokomposit MWCNT/PP sebaiknya ditingkatkan fraksi volumenya. Hal ini berguna agar seluruh penguat

dapat terjembatani dengan matriks polipropilen sehingga material pelat bipolar ini dapat bekerja secara optimal.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zulfia, Anne *et al.* 2009. *Studi Pemanfaatan Grafit Dapur Busur Listrik untuk Pelat Bipolar Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*. Seminar Nasional Kluster Riset Teknik Mesin 2009.
- [2] Ett, Gerhard *et al.* 2011. *Carbon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of the main challenges to improve electrical performance*. *Journal of Power Sources* 196, 2945-2961.
- [3] Liao, Shu-Hang *et al.* 2008. *Preparation and properties of carbon nanotube/polypropylene nanocomposite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells*. *Journal of Power Sources* 185, 1225-1232.
- [4] R.A. Antunes. 2010. *Hydrogen Energy* 35, 3632–3647.
- [5] Liao, Shu-Hang *et al.* 2007. *Preparation and properties of carbon nanotube-reinforced vinyl ester/nanocomposite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells*. *Journal of Power Sources* 176, 175-182.
- [6] Gibran, Abi. 2010. *Studi Pengaruh Penambahan Fraksi Volum Penguat Carbon Nano Tubes (CNT) Terhadap Sifat Mekanis dan Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar Berbasis Nano Komposit PP/C-CNT*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [7] R Chris and S Scott. 2003. *Introduction to Fuel Cell Technology*. Notre Dame: U.S.A Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame.
- [8] J. Larminie, A.L. Dicks. 2000. *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley, New York, 308.
- [9] Grove, William Robert. 1842. *on a Gaseous Voltaic Battery*. *Philosophical Magazine and Journal of Science* vol. XXI, 417-420.
- [10] EG & G Services Parsons Inc. 2004. *Fuel Cell Handbook 7th Edition*. West Virginia: U.S. Department of Energy.
- [11] Dwi Kuncoro, Dhanar. *Simulasi Proton Exchange Membrane Fuel Cell*. Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- [12] U.S. Department of Energy. 2011. *Comparison of Fuel Cell Technologies*. Energy Efficiency and Fuel Cell Technologies Program.

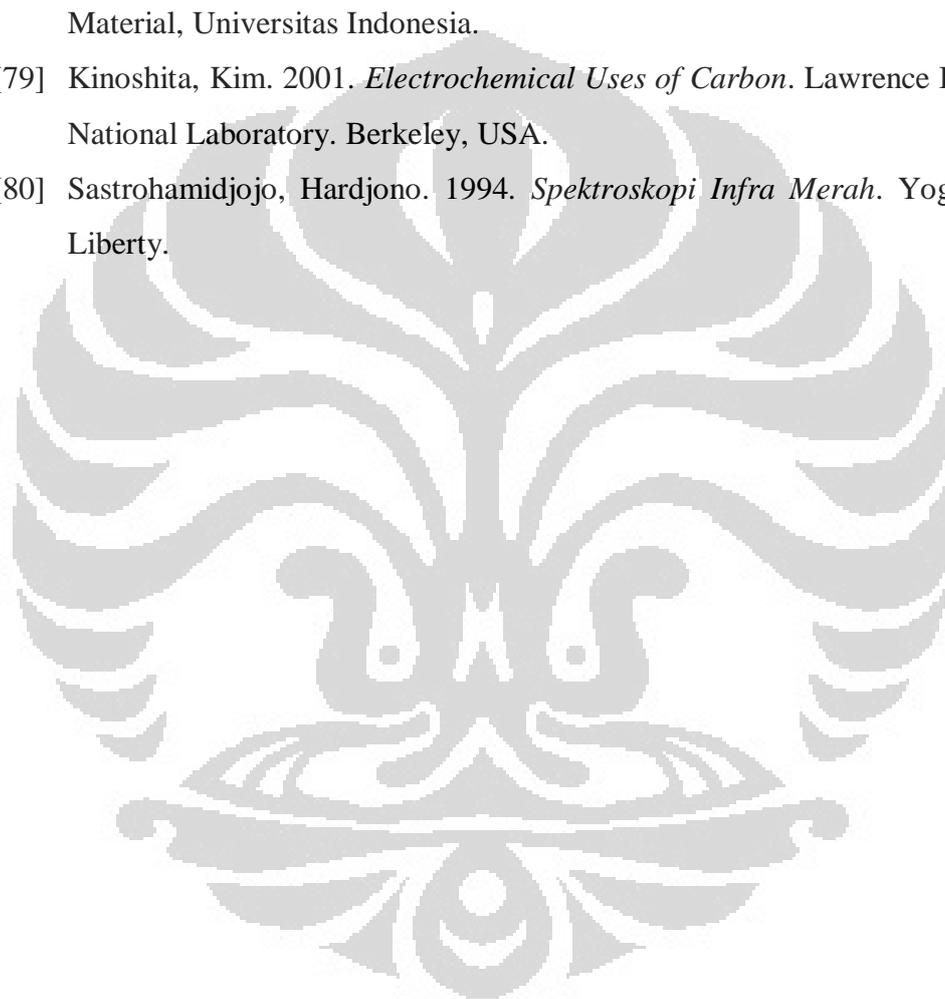
- [13] Bimanyu, Taufik Arya. 2009. *Pengaruh Penambahan Tembaga Terhadap Sifat Mekanik Dan Konduktivitas Pelat Bipolar Komposit PP/C-Cu*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [14] J. M. King dan M. J. O'Day. 2000. *Applying fuel cell experience to sustainable power products*. Journal of Power Sources 86, 16 – 22.
- [15] D. P. Davies, et al. 2000. *Bipolar plate materials for solid polymer fuel cells*, Journal of Applied Electrochemistry 30, 101 – 105.
- [16] K.S. Dhathathreyan and N. Rajalakshmi, *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*. Journal of Fuel Cell.
- [17] NSF Integrative Graduate Education and Research Traineeship (IGERT). A *Ph.D. program in the Engineering, Science, and Entrepreneurship of Fuel Cell*. <http://fuelcell-igert.rpi.edu/update.do?artcenterkey=24> diakses tanggal 9 Desember 2011 pukul 15.51 WIB.
- [18] Y. Wang. 2006. *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.
- [19] L. Du, S.C. Jana. 2007. J. Power Sources 172, 734.
- [20] H.C. Kuan, C.C.M. Ma, K.H. Chen, S.M. Chen. 2004. J. Power Sources 134, 7.
- [21] B.K. Kho, I.H. Oh, S.A. Hong, H.Y. Ha. 2004. *Electrochim. Acta* 50, 781.
- [22] A.Muller, P. Kauranen, A.V. Ganski, B. Hell. 2006. J. Power Sources 154, 467.
- [23] E.A. Cho, U.S. Jeon, H.Y. Ha, S.A. Hong, I.H. Oh. 2004. J. Power Sources 125, 178.
- [24] B.D. Cunningham, D.G. Baird. 2007. J. Power Sources 168, 418–425.
- [25] B.K. Kakati, D. Deka, *Electrochim. Acta* 52, 7330–7336.
- [26] Y.Wang, D.O. Northwood. 2008. J. Power Sources 175, 40–48.
- [27] S.-T.Myung,M. Kumagai, R. Asaishi, Y.-K. Sun, H. Yashiro. 2008. *Electrochem. Commun.* 10, 480–484.
- [28] W.-S. Jeon, J.-G. Kim, Y.-J. Kim, J.-G. Han. 2008. *Thin Solid Films* 516, 3669–3672.

- [29] A.M.F. Barreras, A. Lozano, L. Gonzalez, J.A. Garcia, L. Valino, R.Mustata. 2009. *J. New Mater. Electrochem. Syst.* 12, 97–102.
- [30] K.S.Weil, J.Y. Kim, G. Xia, J. Coleman, Z.G. Yang. 2006. *Surf. Coat. Technol.* 201, 4436–4441.
- [31] V.V. Nikam, R.G. Reddy, 2005. *J. Power Sources* 152, 146–155.
- [32] S.H. Wang, J. Peng, W.B. Lui, J.S. Zhang. 2006. *J. Power Sources* 162, 486–491.
- [33] C.-Y. Bai, T.-M. Wen, K.-H. Hou, M.-D. Ger. 2010. *J. Power Sources* 195, 779–786.
- [34] Zulfia, Anne. 2010. *Kuliah Material Komposit*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [35] Herman Yuwono, Akhmad. 2011. *Kuliah Material Teknik*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [36] D. Hull and T.W. Clyne. 1996. *An Introduction to Composite Materials, 2nd edition*. Cambridge University Press, New York.
- [37] Herman Yuwono, Akhmad. 2008. *Diktat Kuliah Material Mutahir*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [38] Herman Yuwono, Akhmad. 2011. *Kuliah Teknologi Nano*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [39] Agustinus, Sumadi. 2010. *Kuliah Material Polimer*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [40] Callister, William D. 2007. *Materials Science and Engineering: An Introduction 7th Edition*. John Wiley & sons, Inc.
- [41] Katili, Sari. 2010. *Kuliah Kimia Organik*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [42] Kirk Othmer. 1995. *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4th edition Vol 6. New York: John Wiley.
- [43] M.Wissler. 2006. *J. Power Sources* 156, 142–150.
- [44] Chalid, Mochamad. 2010. *Diktat Kuliah Material Aditif*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [45] R.B. Mathur, S.R. Dhakate, D.K. Gupta, T.L. Dhami, R.K. Aggarwal. 2008. *J. Mater. Process. Technol.* 203, 184–192.

- [46] F. Mighri, M.A. Huneault, M.F. Champagne. 2004. *Polym. Eng. Sci.* 44, 1755–1765.
- [47] Carbon Nano Tube (CNT). <http://id.wikipedia.org/wiki/carbonnanotubes> diakses tanggal 13 Desember 2011 pukul 13.00 WIB.
- [48] Stinson, Christopher. 2004. *Carbon Nanotubes*. <http://www.nd.edu/~techrev/Archive/Winter2002/a6.html> diakses tanggal 13 Desember 2011 pukul 21.42 WIB.
- [49] Sugiyono. 2007. *Statistik untuk Penelitian*, Jakarta: Alfabeta.
- [50] Material Polimer HI10HO. http://www.chandra-asri.com/products.php?component_product_id=8&locale=id diakses tanggal 25 Desember 2011 pukul 10.23 WIB.
- [51] Chopped Carbon Fiber. <http://www.alibaba.com> diakses tanggal 26 Desember 2011 pukul 19.13 WIB.
- [52] Carbon Black. <http://www.alibaba.com> diakses tanggal 26 Desember 2011 pukul 19.30 WIB.
- [53] Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Cheap Tubes*. 112 Mercury Drive, Brattleboro, VT 05301.
- [54] Laboratorium Metalurgi Kimia. 2010. *Standar Operasional dan Prosedur (SOP) Penimbangan Zat*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [55] Abdillah, Nur Himawan. 2008. *Pembuatan Komposit Pelat Bipolar Dengan Matriks Polipropilena Dengan Penguat Karbon dan Aditif Polivinylidene Fluoride (PVDF)*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [56] Laboratorium Teknik Kimia. 2011. *Standar Operasional dan Prosedur (SOP) Penggunaan Rheomix Haake Haake PolyDrive 3000*. Institut Teknologi Indonesia (ITI), Serpong.
- [57] Adam, Hatta. 2008. *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*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [58] ASTM D3039. *Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*.

- [59] ASTM D790. *Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*.
- [60] Laboratorium Metalurgi Fisik. 2010. *Diktat Praktikum Karakterisasi Material 1*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [61] Arif. 2009. *Kuliah Fisika Dasar 1: Mekanika*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [62] P. Schuetze, Andrew. 2002. *A Laboratory on the Four-Point Probe Technique*. Edgewood Academy, San Antonio, Texas.
- [63] Laboratorium *Fuel Cells*. 2011. *Buku Petunjuk Penggunaan Instrumen Four Point Probe*. Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). Serpong.
- [64] Saptono, Rachmat. 2009. *Kuliah Karakterisasi Material 1*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [65] Nurjaya, Dwi Marta. 2010. *Kuliah Karakterisasi Material 2*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [66] S.H. Liao, C.H. Hung, C.C.M. Ma, C.Y. Yen, Y.F. Lin, C.C. Weng. 2008. *J. Power Sources* 176, 175.
- [67] S. Iijima. 1991. *Nature* 345, 56.
- [68] D.M. Delozier, K.A. Watson, J.G. Smith Jr., T.C. Clancy, J.W. Connell. 2006. *Macromolecules* 39, 1731.
- [69] Y. Yang, X. Xie, J. Wu, Z. Yang, X. Wang, Y.W. Mai. 2006. *Macromol. Rapid Commun.* 27, 1695.
- [70] R.B. Mathur, S.R. Dhakate, D.K. Gupta, T.L. Dhami, R.K. Aggarwal. 2008. *J. Mater. Process. Technol.* 203, 184–192.
- [71] P.H. Maheshwari, R.B. Mathur, T.L. Dhami. 2007. *J. Power Sources* 173, 394–403.
- [72] F. Mighri, M.A. Huneault, M.F. Champagne. 2004. *Polym. Eng. Sci.* 44, 1755–1765.
- [73] J.H. Lee, Y.K. Jang, C.E. Hong, N.H. Kim, P. Li, H.K. Lee. 2009. *J. Power Sources* 193, 523–529.
- [74] L.G. Xia, A.J. Li, W.Q. Wang, Q. Yin, H. Lin, Y.B. Zhao. 2008. *J. Power Sources* 178, 363.

- [75] R. Blunk, M.H.A. Elhamid, D. Lisi, Y. Mikhail. 2006. *J. Power Sources* 156, 151.
- [76] S.-H. Liao, C.-H. Hung, C.-C.M. Ma, C.-Y. Yen, Y.-F. Lin, C.-C. Weng. 2008. *J. Power Sources* 176, 175–182.
- [77] E. Middelma, W. Kout, B. Vogelaar, J. Lenssen, E. de Waal. 2003. *J. Power Sources* 118, 44–46.
- [78] Zulfia, Anne. 2011. *Kuliah Mekanika Perpatahan*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [79] Kinoshita, Kim. 2001. *Electrochemical Uses of Carbon*. Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, USA.
- [80] Sastrohamidjojo, Hardjono. 1994. *Spektroskopi Infra Merah*. Yogyakarta: Liberty.



DAFTAR ISI

Table of Content

HALAMAN Start Page	JENIS KEGIATAN PENELITIAN Research Activity	TANGGAL Date
1	Mengambil material Polipropilen (PP) dari Bpk. Pandu Lanang	23 Juli 2011
1	Diskusi dengan Prof. Anne : Background riset dan komposisi	28 Juli 2011
1	Mengambil material PE (Polietilen) Wax di PT Advance, Cibitung	29 Juli 2011
1	Mengambil material Grafrit, Carbon Black, Carbon Fibre, MWCNT	11 Agustus 2011
1	Penimbangan material sesuai formulasi di Lab. Kimia Metalurgi	20 September '11
1	Diskusi dg Bpk Saepul di Sentra Teknologi Polimer dan Tour Lab	22 September '11
1	Proses Hot Blending di ITI dan Diskusi dg Prof. Anne	3 Oktober '11
1	Diskusi dg Prof Anne : Fiksasi Komposisi Baru	4 Oktober '11
1	Diskusi dg Prof. Anne : Informasi ttg Spesifikasi Polimer	5 Oktober '11
1	Mengambil material PPgMA dan Antioksidan dari P3KEBT	6 Oktober '11
2	Penimbangan material sesuai formulasi di Lab. Kimia Metalurgi	7 Oktober '11
2	Mengurus administrasi di Pertamina utk Rheomix	10 Oktober '11
2	Proses Hot Blending di Pertamina, Pulo Gadung	14 Oktober '11
2	Diskusi dg Prof. Anne : Konsultasi Proses Hot Blending	17 Oktober '11
2	Proses Hot Blending di ITI	19-20 Okt. '11
2	Proses Hot Blending di ITI	24 Oktober '11
2	Proses Crushing di STP	26 Oktober '11
2	Proses Hot Pressing di STP (+ Cutting dan Preparasi Sampel)	27-28 Okt. '11
2	Proses Conditioning Sampel di STP	29 Oktober '11
2	Proses Pengujian FTIR di Lab. Kimia Afiliasi MIPA UI	31 Oktober '11
2	Pengambilan Sampel Hasil Conditioning di STP	2 November '11
2	Pengambilan hasil uji FTIR, Pengujian MFI dan Density	4 November '11
2	Diskusi dg Prof. Anne : Konsultasi hasil FTIR dan uji MFI	7 November '11
2	Pengujian Konduktivitas di Fisika LIPI	8 November '11
2	Pengujian Tensile dan Fleksural di STP	9 November '11
2	Diskusi dg Prof. Anne : Konsultasi hasil seluruh pengujian	10 November '11

- 3 Juli 2011 : Pengambilan material Polipropilen (PP) dari Bpt. Pandu Lanang. Polipropilen merupakan matriks dari komposit pelat bipolar.
- 3 Juli 2011 : Diskusi dg Prof. Anne (pembimbing riset) tentang background riset yg dilakukan dan fiksasi komposisi pembuatan pelat bipolar berbasis nano komposit MWCNT / PP.
Hasil diskusi : Pembuatan material polimer konduktif dg penambahan carbon. Reinforce yg digunakan = Carbon fibre, Carbon black, Grafit. Multiwall Carbon Nano Tube dan serbuk Cu.
Proses Mixing dg Rheomix di ITI
Penggunaan aditif PE Wax.
Variabel MWCNT : 0,1 % , 0,5 % dan 1 %
Variabel serbuk Cu : 0,1 % , 0,2 % dan 0,5 %
- 9 Juli 2011 : Pengambilan material PE Wax di PT Advance, Cibitung. PE Wax merupakan compatibilizer antara PP dan Carbon
- Agustus 2011 : Pengambilan material Grafit, Carbon Black, Carbon Fibre dan MWCNT dari Prof. Anne yang telah dipesan sebelumnya.
- Sept. 2011 : Penimbangan material sesuai dg formulasi pengujian F1A, F2A, F3A dan F1B, F2B, F3B di Laboratorium Kimia Metalurgi Universitas Indonesia.
- 2 Sept. 2011 : Diskusi dg Bpt. Saeful di Sentra Teknologi Polimer tentang processing dan karakterisasi serta Tour Lab.
- 10 Okt. 2011 : Proses hot blending (scr Rheomix) di ITI sebanyak 50 gr. Hasil hot blending kurang memuaskan. Diskusi dg Prof. Anne menghasilkan keputusan utk menambah PPgMA dan antioksidan, utk menggantikan PE Wax. Proses rheomix dicoba pindah ke Pertamina, Pulo Gradung.
- 1 Okt. 2011 : Diskusi dg Prof. Anne utk menentukan komposisi baru. Hasilnya : % PP berubah dari 10 % menjadi 15 % . PE Wax tidak lagi digunakan. Adanya penambahan PPgMA dan Antioksidan.
- 1 Okt. 2011 : Diskusi dg Prof. Anne utk membahas parameter proses rheomix sesuai dg spesifikasi polimer yg digunakan, yaitu HI-10-HO dg suhu 210-230°C
- 1 Okt. 2011 : Pengambilan material PPgMA dan Anti oksidan dari Lab. Fuel Cell, P3KEBT.

Tanggal
Date
Jul - October 2011

Lanjutan halaman
Continued from page

Buku
Book

Lanjut ke halaman:
Continue to Page

2

Buku:
Book

Nama Peneliti
Name of Person Conducting Experiment

Saksi 1
First Witness

Saksi 2
Second Witness

Tanda Tangan
Signed

Tanggal
Dated

Tanda Tangan
Signed

Tanggal

Tanda Tangan
Signed

Tanggal

Lampiran 1: Jadwal Kegiatan Penelitian (Lanjutan)

Tanggal
Date
Oktober- November

Lanjutan halaman
Continued from page
1

Buku
Book
-

7 Oktober 2011 : Penimbangan material sesuai formula yg baru di Lab. Kimia Metalurg, UI

10 Oktober 2011 : Mengurus administrasi (surat izin) penggunaan rheomix di Pertamina Pulo Gadung

14 Oktober 2011 : Proses hot blending (rheomix) di Pertamina Pulo Gadung. Hasil : Mesin tdk dpt digunakan krn kotor.

17 Oktober 2011 : Konsultasi dg Prof. Anne ttg hasil rheomix yg tdk berhasil dan memutuskan kembali ke ITI.

19, 20, 24 Oktober 2011 = Proses hot blending di ITI dg hasil yg baik.

26 Oktober 2011 = Proses crushing hasil hot blending di STP utk mereduksi ukuran.

27-28 Oktober 2011 = Proses Hot Pressing di STP utk membentuk pelat dg diameter 14 cm dan tebal 4 mm.

29 Oktober 2011 = Proses conditioning sampel yg tarik dan tekuk di STP selama 40 jam

31 Oktober 2011 = Proses pengujian FTIR di Lab Afiliasi Kimia MIPA UI utk melihat adanya gugus fungsional.

2 November 2011 = Pengambilan sampel hasil conditioning di STP

4 November 2011 = Pengambilan hasil pengujian FTIR (6 sampel) dan proses pengujian Melt Flow Index (hasilnya kurang baik) dan pengujian densitas-porositas.

7 November 2011 = Konsultasi dg Prof. Anne ttg hasil uji FTIR dan uji Melt Flow Index (MFI)

8 November 2011 = Pengujian konduktivitas listrik di FISIKA, LIPI dg Four Point Probe (Hasil: memuaskan)

9 November 2011 = Pengujian Tensile dan Flexural di STP

10 November 2011 = Konsultasi dg Prof. Anne ttg semua hasil pengujian dan persiapan pengumpulan laporan riset.

Lanjut ke halaman:
Continue to Page

Buku:
Book

Nama Peneliti
Name of Person Conducting Experiment

Saksi 1
First Witness

Saksi 2
Second Witness

Tanda Tangan
Signed

Tanggal
Dated

Signed

Tanggal
Dated

Tanda Tangan
Signed

Tanggal
Dated

Lampiran 2: Formulasi dan Bahan Penelitian

- **Formulasi Penelitian:**

Jenis Bahan	Satuan	F1	F2	F3
Polipropilen (PP)	%	15	15	15
	gram	30	30	30
Serat Karbon	%	20	20	20
	gram	40	40	40
Grafit	%	28.9	28.5	28
	gram	57.8	57	56
Karbon Hitam	%	30	30	30
	gram	60	60	60
PP-g-MA	%	5	5	5
	gram	10	10	10
Anti Oksidan CN-CAT A215	%	1	1	1
	gram	2	2	2
MWCNT	%	0.1	0.5	1
	gram	0.2	1	2
Total	%	100	100	100
	gram	200	200	200

Lampiran 2: Formulasi dan Bahan Penelitian (Lanjutan)

- Foto Bahan Penelitian:



Polipropilen HI10HO



Anti-Oksidan
CN-CAT A215



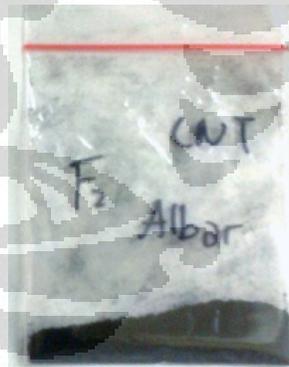
Serat Karbon



PP-g-MA



Grafit



MWCNT



Karbon Hitam

Lampiran 3: Hasil Pengujian Densitas dan Porositas

Perhitungan densitas Sampel (ρ sampel)

$$\rho \text{ sampel} = \frac{M_u}{M_a} \times \rho \text{ air}$$

Formula	Massa Sampel Rata-rata diudara	Massa sampel rata-rata di air	Densitas Air	Densitas Sampel
	M_u	M_a	ρ_a	ρ_s
	gram	gram	gr/cm ³	gr/cm ³
F1	7.736	5.834	0.9855	1.307
F2	6.414	5.483	0.9855	1.153
F3	7.892	7.747	0.9855	1.004

Perhitungan % porositas material pelat bipolar

$$\% \text{ porositas} = \frac{\rho \text{ teoritis} - \rho \text{ percobaan}}{\rho \text{ teoritis}} \times 100\%$$

Formula	Densitas teoritis	Densitas Percobaan	Porositas
	gr/cm ³	gr/cm ³	%
F1	1.334	1.307	1.991
F2	1.173	1.153	1.724
F3	1.019	1.004	1.534

Lampiran 4: Hasil Pengujian Konduktifitas Listrik



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

Laporan Pengujian Material

Metode Pengujian : *Four Point Probe*
 Jenis Sample : MWCNT/PP
 Jumlah Sample : 3 Unit

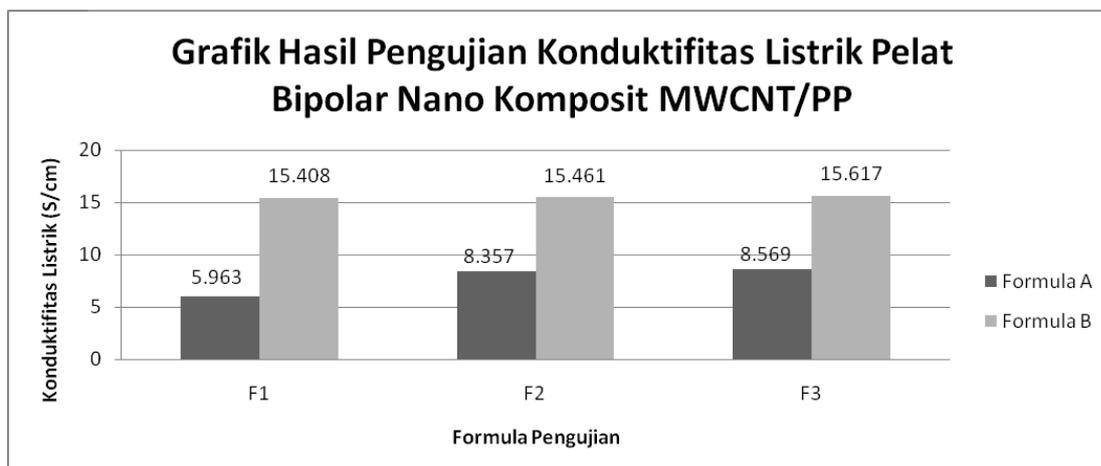
Operator : Subhan
 Pemohon : Albar
 Keterangan : -

Pengukuran Dimensi Spesimen:

Parameter	Ketebalan	
	Nilai	Satuan
F1 A	4.00	mm
F2 A	4.00	mm
F3 A	4.00	mm
F1 B	2.00	mm
F2 B	2.00	mm
F3 B	2.00	mm

Pengukuran nilai resistansi dan konduktivitas specimen:

Formula	A (ohm.cm)	A (S/cm)	A average (S/cm)	Formula	B (ohm.cm)	B (S/cm)	B average (S/cm)
F1	0.1669	5.9916	5.9633	F1	0.0649	15.4083	15.4083
	0.1670	5.9880			0.0649	15.4083	
	0.1692	5.9102			0.0649	15.4083	
F2	0.1212	8.2508	8.3575	F2	0.0737	13.5685	15.4610
	0.1181	8.4674			0.0607	16.4745	
	0.1197	8.3542			0.0612	16.3399	
					0.0611	16.3666	
F3	0.1175	8.5106	8.5692	F3	0.0640	15.6250	15.6169
	0.1164	8.5911			0.0641	15.6006	
	0.1162	8.6059			0.0640	15.6250	



Test Certificate

Flexural Test

Order No.....J1110410
 Test Standard.....ASTM D790
 Tester.....abd

Material.....Komposit F2A
 Tested on.....2011-11-09
 Kondisi Uji.....23.2oC,RH62%

Testing machine.....AGS-G
 Test speed 1.....0 % -> 1.294 mm/min

Directory.....J1110410
 Parameterset.....astm d790

Legend

BNo.....Batch number
 a.....Thickness
 b.....Width

Ls.....Support span
 Ef.....E-Modulus
 "fM.....Flexural strength

Test No	BNo	a mm	b mm	Ls mm	Ef GPa	"fM MPa
1	Komposit F2A - 1	4.040	12.11	64.64	8.696	27.51
2	Komposit F2A - 2	4.070	11.31	65.12	10.25	32.13
3	Komposit F2A - 3	4.050	10.77	64.80	11.71	31.03
4	Komposit F3A - 1	4.010	11.23	64.16	9.028	24.62
5	Komposit F3A - 2	4.010	11.04	64.16	6.751	30.86
6	Komposit F3A - 3	4.060	9.790	64.96	11.09	31.78
7	Komposit F3B - 1	4.010	10.56	64.16	6.611	28.17
8	Komposit F3B - 2	4.010	11.70	64.16	8.179	30.10
9	Komposit F3B - 3	4.020	10.17	64.32	10.35	29.60
11	Komposit F2B - 2	3.480	10.88	55.68	7.481	27.13
12	Komposit F2B - 3	3.480	10.88	55.68	11.05	31.04
13	Komposit F2B - 3	3.530	10.46	56.48	9.393	25.07
14	Komposit F1A - 1	3.930	11.11	62.88	11.25	27.59
15	Komposit F1A - 2	3.890	11.14	62.24	11.10	29.87
16	Komposit F3B - 4	3.860	8.550	61.76	10.22	28.23
18	Komposit F1B - 1	3.060	10.33	48.96	11.32	29.67
19	Komposit F1B - 2	3.030	10.08	48.48	10.44	31.41
20	Komposit F1B - 3	3.030	10.08	48.48	11.29	30.06
Mean:		3.754	10.68	60.06	9.789	29.21
Minimum:		3.030	8.550	48.48	6.611	24.62
Maximum:		4.070	12.11	65.12	11.71	32.13
Std.dev.:		0.382	0.800	6.120	1.640	2.193
W(0.95) %:		5.067	3.729	5.067	8.333	3.733
Values:		18	18	18	18	18

Test Certificate

Plastics Tensile Test

Order No.....J1110410
 Teststandard.....ASTM D3039
 Tester.....abd

Material.....Komposit F3B
 Tested on.....2011-11-09
 Kondisi Uji.....23.2oC , RH 60.9 %

Testing machine.....AGS-G
 Pretension.....0.1 N
 Gripped length.....50 mm
 Test speed 1.....0 % -> 2 mm/min

Directory.....J1110410
 Parameterset.....ASTM D3039

Legend

BNo.....Batch number
 a.....Thickness
 b.....Width
 E.....E-Modulus

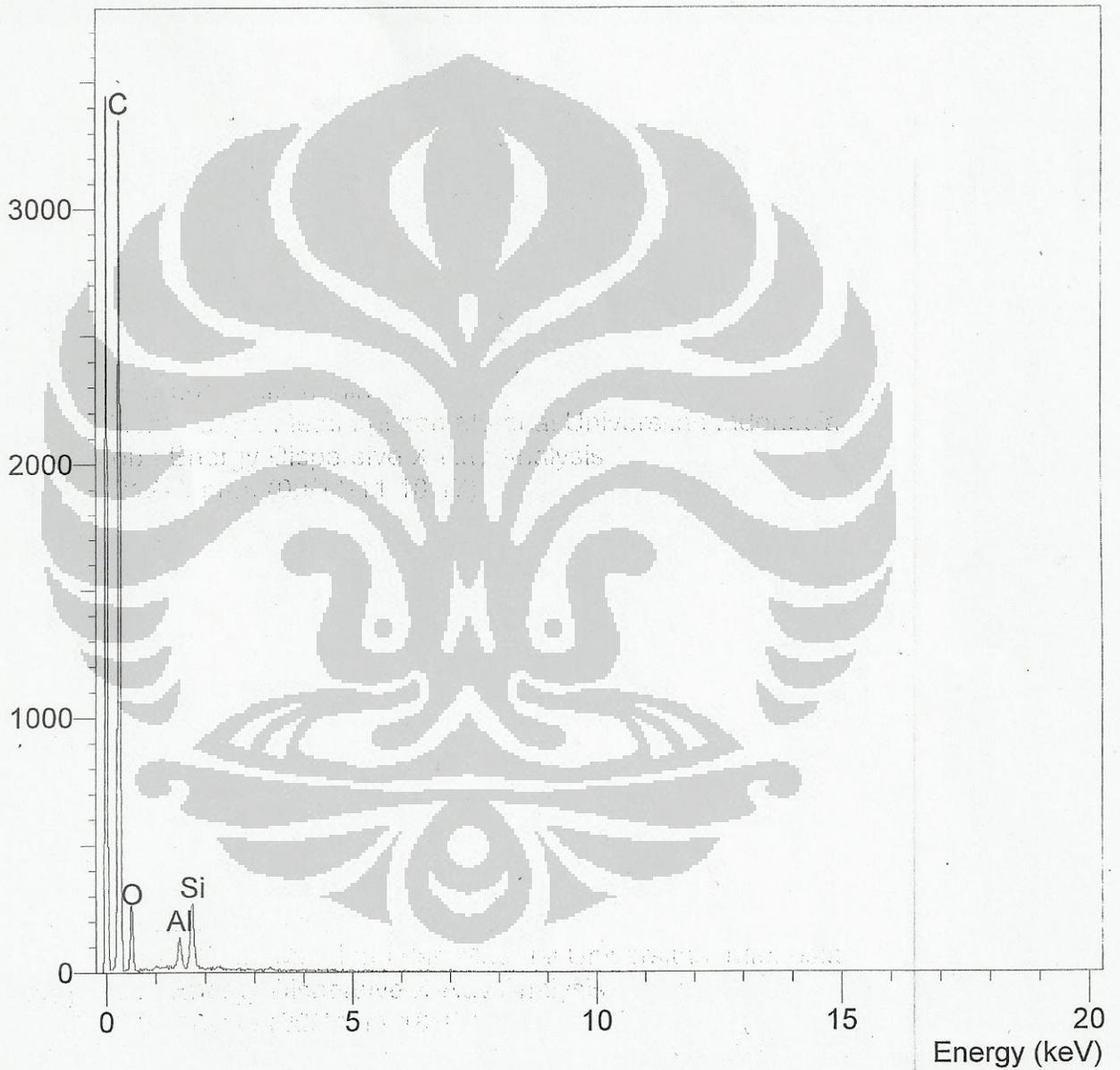
"M.....Tensile strength
 "B.....Strain at Break
 Fmax.....Maximum load
 Comment.....Comment

Test No	BNo	a mm	b mm	E GPa	"M MPa	"B %	Fmax N	Comment
1	Komposit F2A - 1	4.040	12.17	1.522	11.98	1.725	589.0	
2	Komposit F2A - 2	4.370	10.81	1.864	6.277	0.349	296.5	
3	Komposit F2A - 3	4.080	10.86	1.391	10.66	1.863	472.5	
4	Komposit F1A - 1	4.050	11.31	1.028	10.09	2.201	462.3	
5	Komposit F1A - 2	3.830	10.92	1.777	7.708	0.444	322.4	
6	Komposit F1A - 3	4.010	10.89	1.374	12.42	4.198	542.5	
7	Komposit F3A - 1	4.020	10.36	2.425	9.959	0.731	414.8	
8	Komposit F3A - 2	4.010	10.40	2.357	8.512	0.426	355.0	
9	Komposit F3A - 3	4.070	10.45	2.413	9.355	0.779	397.9	
10	Komposit F1B - 1	3.120	11.11	2.777	12.02	0.466	416.8	
11	Komposit F1B - 2	3.130	11.05	2.663	10.98	0.470	379.6	
12	Komposit F1B - 3	3.120	11.20	2.870	11.40	0.489	398.4	
13	Komposit F2B - 1	3.630	9.950	3.028	10.62	0.770	383.6	
14	Komposit F2B - 2	3.690	10.58	2.595	12.85	0.870	501.5	
15	Komposit F2B - 3	3.630	10.52	2.770	14.32	0.692	546.8	
16	Komposit F3B - 1	3.970	10.59	2.678	14.97	1.302	629.3	
17	Komposit F3B - 2	3.960	10.56	1.653	11.67	1.245	488.0	
18	Komposit F3B - 3	3.980	10.48	2.691	12.37	0.530	516.0	
Mean:		3.817	10.79	2.215	11.01	1.086	450.7	
Minimum:		3.120	9.950	1.028	6.277	0.349	296.5	
Maximum:		4.370	12.17	3.028	14.97	4.198	629.3	
Std.dev.:		0.365	0.486	0.619	2.182	0.950	92.18	
W(0.95) %:		4.749	2.238	13.89	9.856	43.52	10.17	
Values:		18	18	18	18	18	18	

Lampiran 7: Hasil Pengujian Komposisi Kimia dengan EDS

Operator : zakiyuddin
Client : Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis
1212-A-area (09/11/11 18:17)

Counts



Lampiran 7: Hasil Pengujian Komposisi Kimia dengan EDS (Lanjutan)

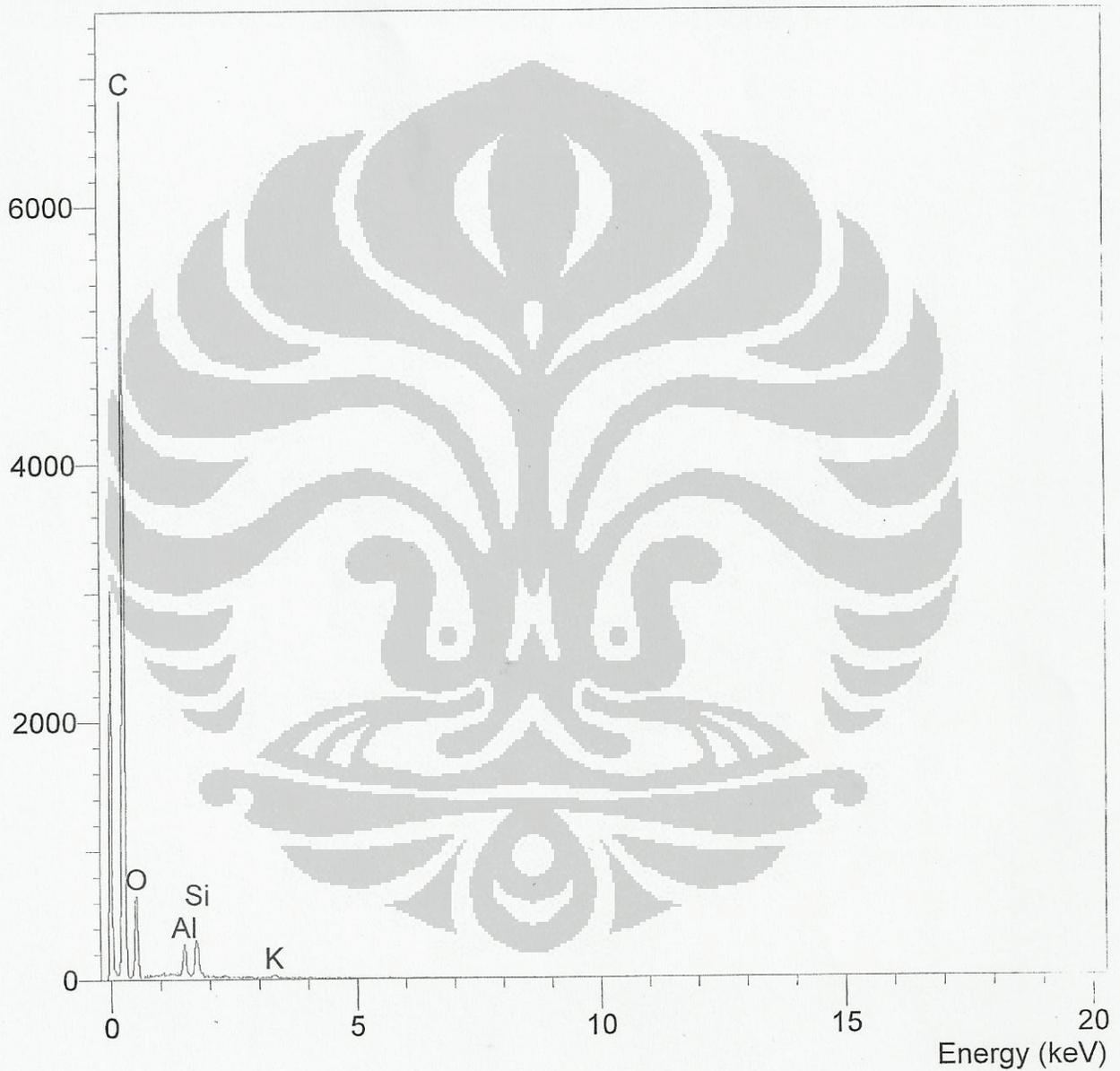
Operator : zakiyuddin

Client : Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia

Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis

1212-A-gelap (09/11/11 18:31)

Counts



Lampiran 7: Hasil Pengujian Komposisi Kimia dengan EDS (Lanjutan)

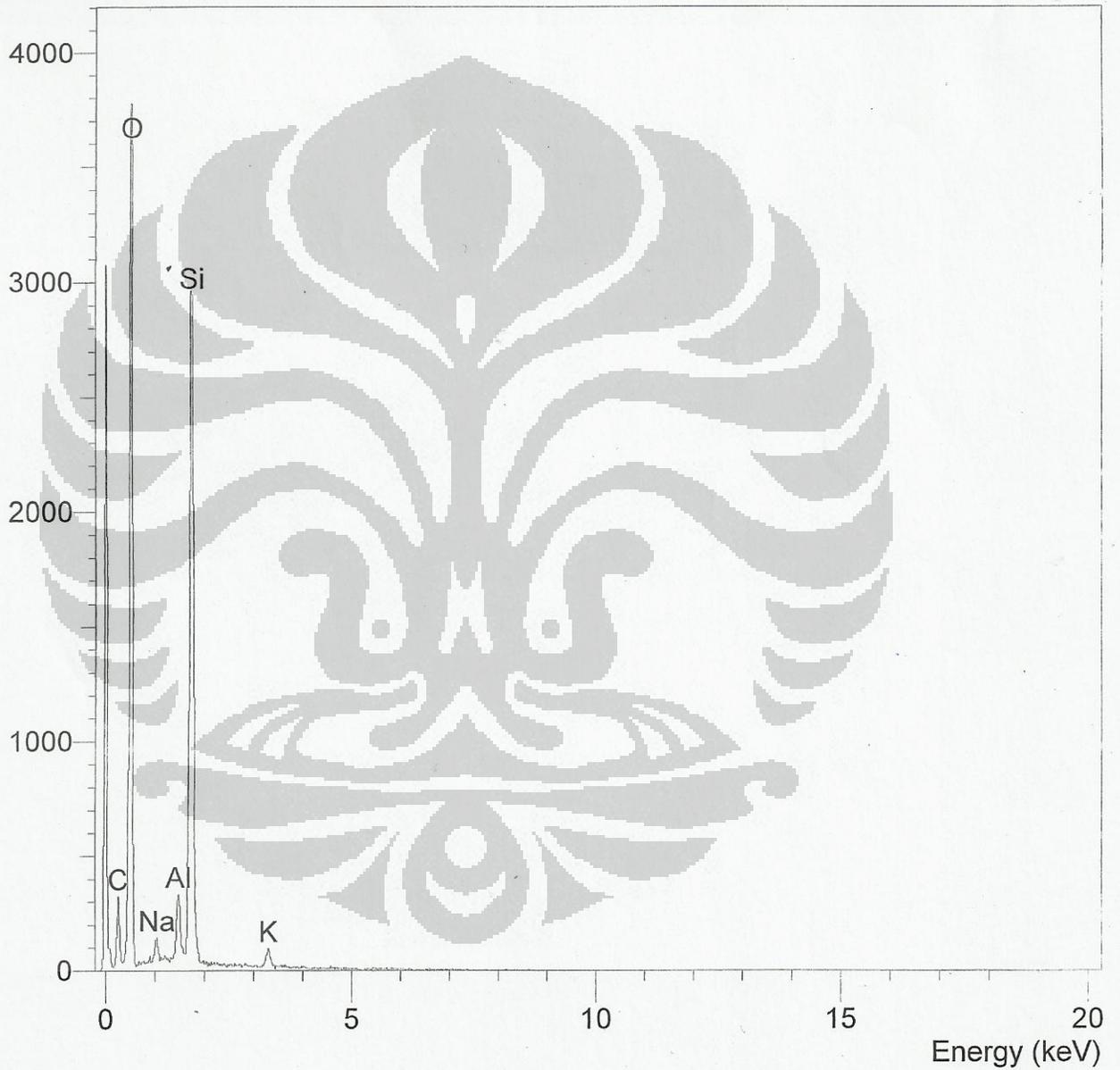
Operator : zakiyuddin

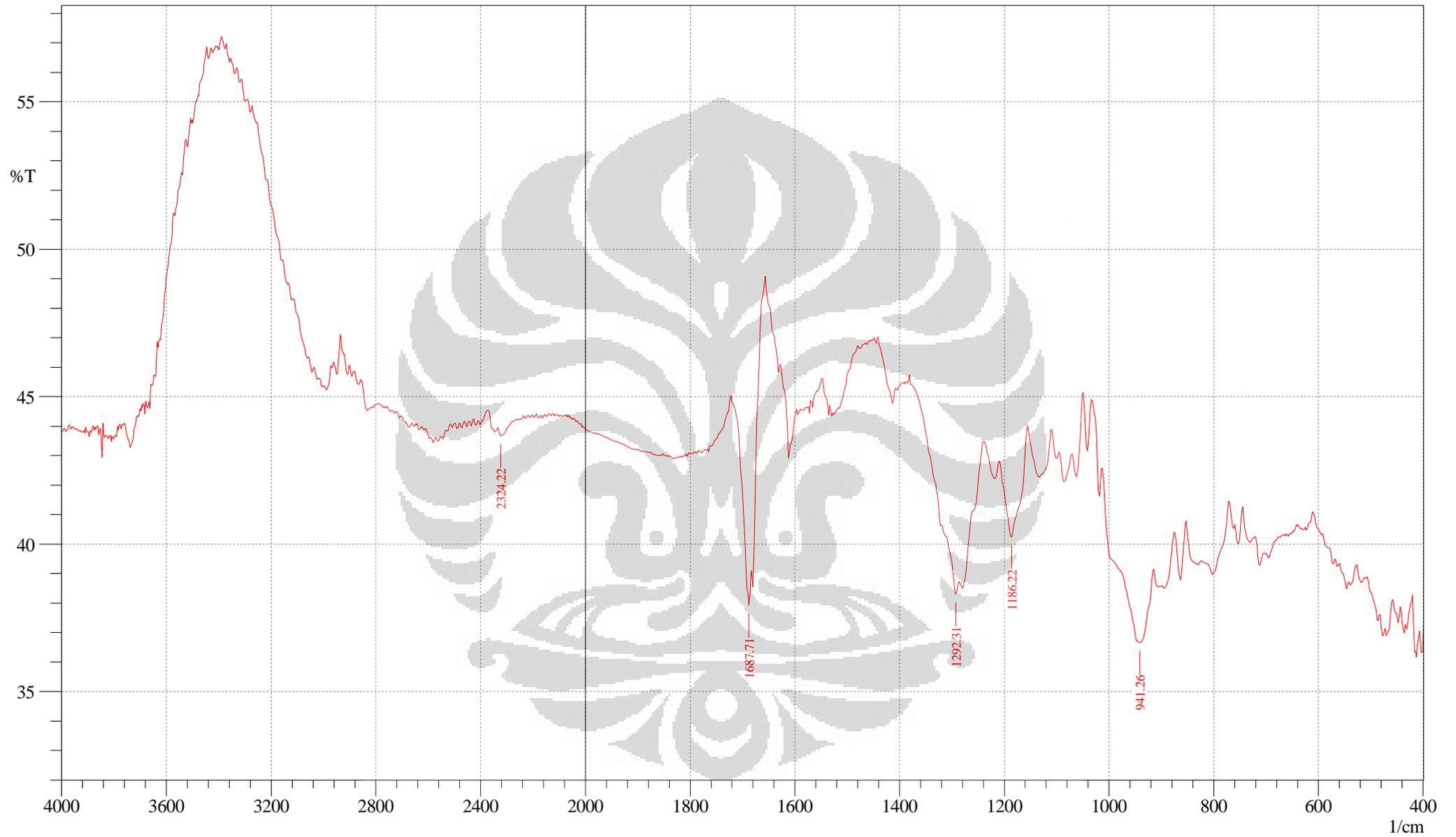
Client : Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia

Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis

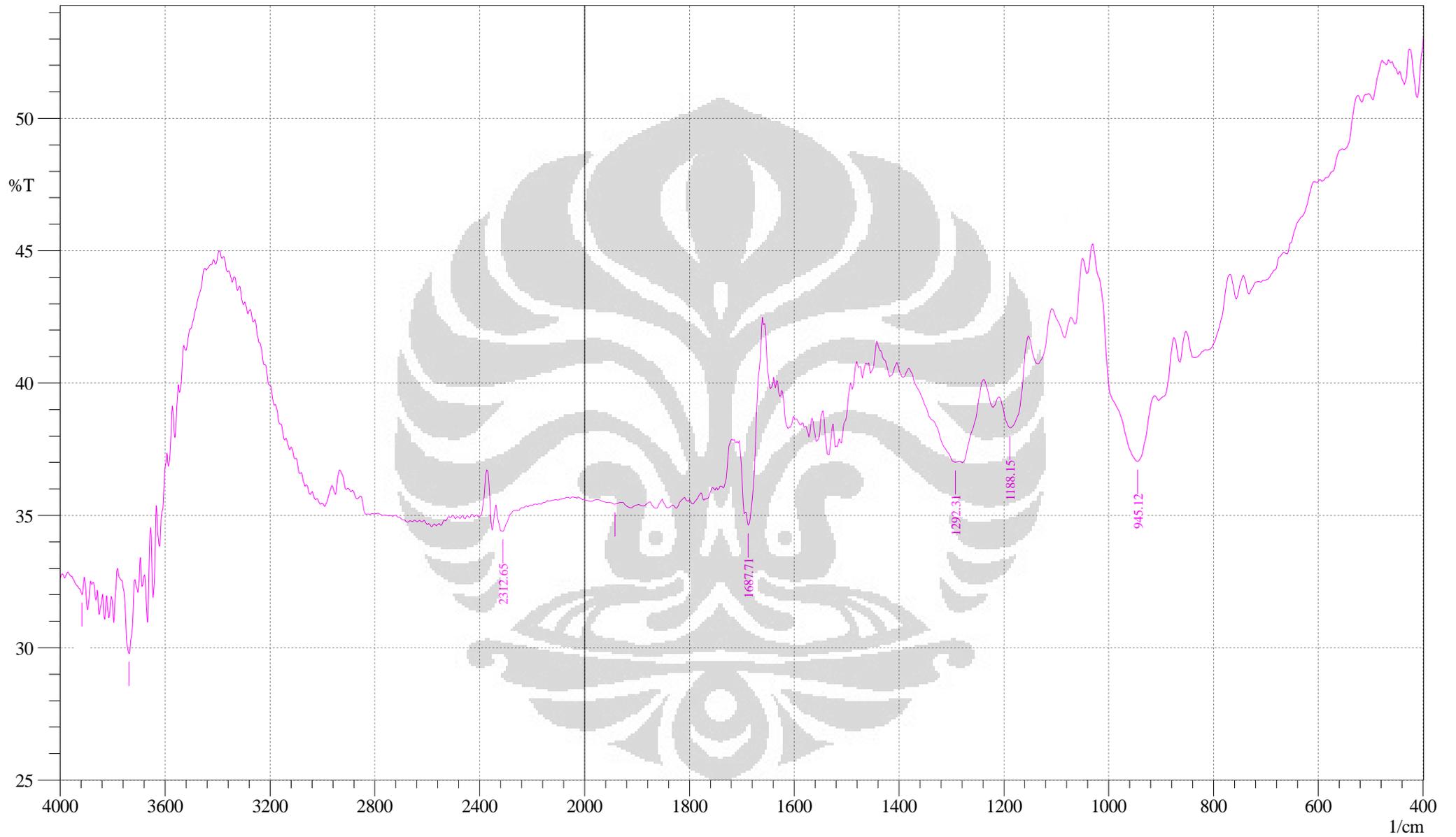
1212-A-terang (09/11/11 18:27)

Counts

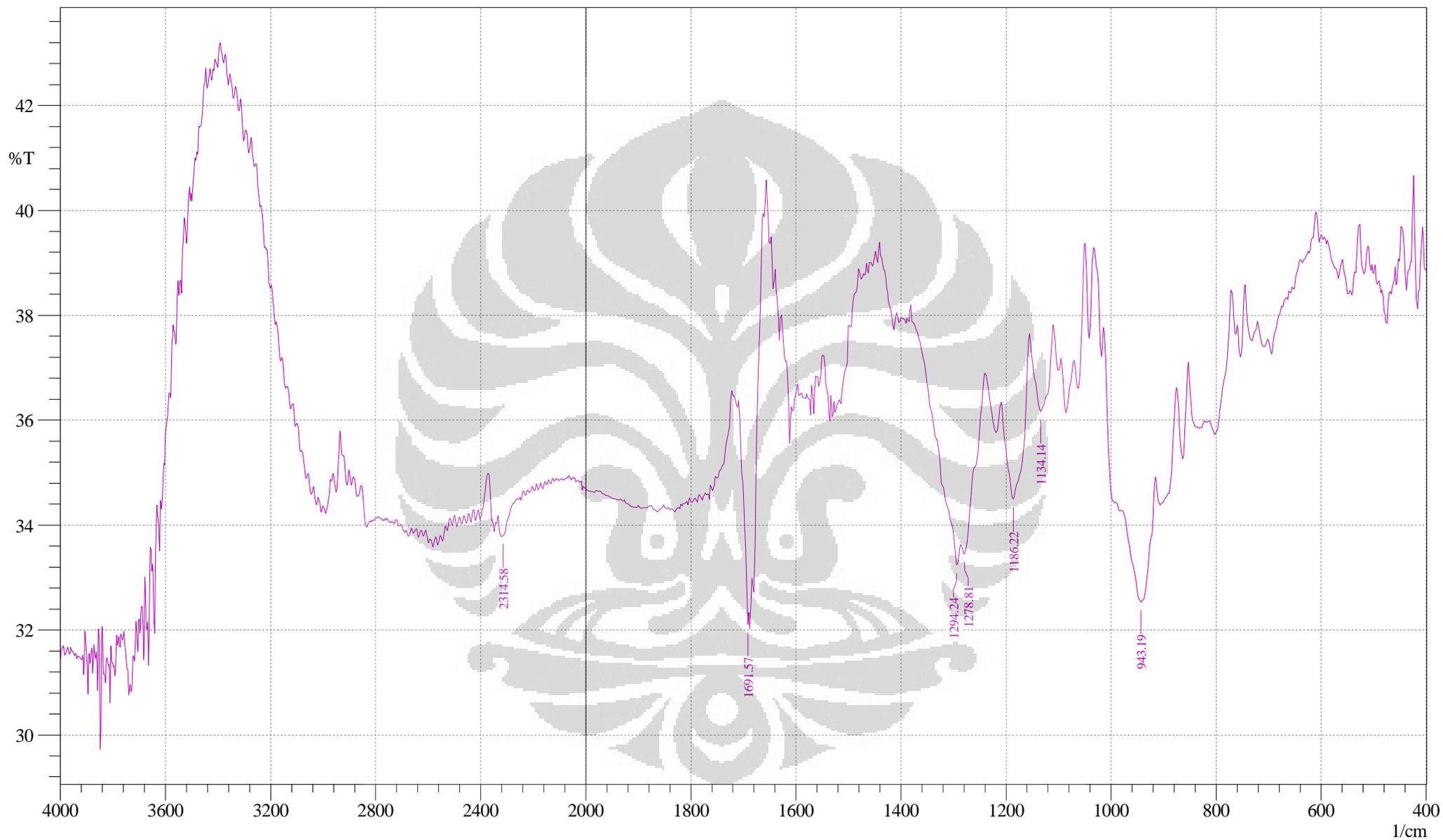




Comment;
fla



Comment;
f2a



Comment;
f3a