



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

BANGKIT INDRIYANA
0806455622

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) DAN TEMBAGA
(Cu) TERHADAP KONDUKTIVITAS LISTRIK DAN SIFAT MEKANIS
MATERIAL PELAT BIPOLAR BERBASIS NANO KOMPOSIT
MWCNT/PP-Cu

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

BANGKIT INDRIYANA
0806455622

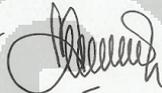
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JANUARI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Bangkit Indriyana

NPM : 0806455622

Tanda Tangan : 

Tanggal : 19 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Bangkit Indriyana
NPM : 0806455622
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi :

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

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

1. Prof.Dr.Ir.Anne Zulfia Syahrial,M.Sc., selaku dosen pembimbing yang telah banyak menyediakan waktu, tenaga dan pemikiran dalam mengarahkan saya dalam melakukan penelitian dan penulisan skripsi ini;
2. Drs. Saeful Rohman, M.T. dari Sentra Teknologi Polimer atas bantuannya dan bimbingannya dalam penyelesaian skripsi ini.
3. Bapak Suyono dan Ibu Aruwati, selaku orang tua dan Indra Nur Zaman serta Annisa Ramadhani, keluarga saya yang telah memberikan dukungan material dan moral;
4. Seluruh staf STP yang membantu dalam pemrosesan dan pengujian material untuk kelancaran penelitian ini; dan
5. M. Ekaditya Albar, sebagai patner penelitian untuk skripsi yang telah banyak membantu saya dalam penyelesaian skripsi ini.

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

Depok, 19 Januari 2012

Penulis

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

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

Nama : Bangkit Indriyana
NPM : 0806455622
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) dan Tembaga (Cu) terhadap Konduktivitas Listrik dan Sifat Mekanis Material Pelat Bipolar Berbasis Nano Komposit MWCNT/PP-Cu

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,



(Bangkit Indriyana)

ABSTRAK

Nama : Bangkit Indriyana
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul :

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

Pada teknologi *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC), pelat bipolar merupakan komponen penting yang berfungsi sebagai media pengumpul dan pentransfer elektron dari anoda menuju katoda. Penelitian ini difokuskan dalam pemilihan material serta fabrikasi komposit berbasis matriks polimer dengan penguat karbon. Bahasan utama penelitian ini ialah studi mengenai pengaruh penambahan fraksi volum penguat *Multi Wall Carbon Nano Tubes* (MWCNT) sebesar 0.1%; 0.5%; dan 1% dan penambahan fraksi volum tembaga (Cu) sebesar 0.1%, 0.2%, dan 0.5% terhadap konduktivitas listrik dan sifat mekanis material pelat bipolar berbasis nano komposit MWCNT/PP-Cu. Material dikarakterisasi melalui pengujian tarik, pengujian tekuk, pengujian densitas, pengujian porositas, pengujian konduktivitas listrik, analisa gugus fungsi dengan menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan pengamatan permukaan patahan tekuk material pelat bipolar menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan fraksi volum penguat MWCNT dan Cu dapat meningkatkan nilai konduktivitas listrik, kekuatan tarik, modulus elastisitas, elongasi, kekuatan tekuk serta mereduksi densitas dan porositas material pelat bipolar.

Kata kunci:

PEMFC, pelat bipolar, MWCNT, nanokomposit, konduktivitas listrik.

ABSTRACT

Name : Bangkit Indriyana
Study Program : Metallurgy and Material Science Engineering
Title :

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

In Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) technology, bipolar plate is used to collect and transfer electron from the anode to the cathode. This research focuses on material selection of composite based on polymeric matrix and carbon reinforcements to fabricate the bipolar plate material. The main discussion in this research is the analysis of addition of volume fraction multiwall carbon nano tubes (MWCNT) reinforcement equal to 0.1%; 0.5%; 1% and addition of volume fraction of copper reinforcement equal to 0.1%; 0.2%; and 0.5% to the mechanical and electrical conductivity properties of bipolar plate material based on nano composite MWCNT/PP-Cu. The material is characterized using 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). The results of this research show that addition of volume fraction multiwall carbon nano tubes (MWCNT) and copper (Cu) reinforcement increases the electrical conductivity, ultimate tensile testing, modulus of elasticity, elongation at break, flexural strength and also reduces the density and porosity of bipolar plate material.

Key words:

PEMFC, bipolar plate, MWCNT, nanocomposite, electrical conductivity.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
DAFTAR SINGKATAN.....	xiv
DAFTAR SIMBOL.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Permasalahan.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Hipotesis Penelitian.....	3
1.5. Ruang Lingkup Penelitian.....	4
1.6. Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Sel Bahan Bakar (<i>Fuel Cell</i>).....	6
2.2. <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i> (PEMFC).....	10
2.3. Pelat Bipolar.....	13
2.4. Material Komposit.....	15
2.4.1. Matriks Polipropilen (PP).....	16
2.4.2. Bahan Aditif PP-g-MA.....	17
2.4.3. Serat Karbon.....	18
2.4.4. Grafit.....	18
2.4.5. Anti-oksidan.....	19
2.4.6. <i>Multi Wall Carbon Nano Tube</i> (CNT).....	20
2.4.7. <i>Multi Wall Carbon Nano Tube</i> (CNT).....	21
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	22
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	22
3.2. Variabel Penelitian.....	23
3.2.1. Variabel Bebas.....	24
3.2.2. Variabel Terikat.....	24
3.2.3. Variabel Terkontrol.....	25
3.3. Formulasi Penelitian.....	25
3.4. Material.....	27

3.4.1.	Polipropilena (PP).....	27
3.4.2.	<i>Polypropylene-grafted-Maleated Anhydride</i> (PP-g-MA).....	27
3.4.3.	Serat Karbon Fortafil 243.....	28
3.4.4.	Grafit	28
3.4.5.	Anti-Oksidan CN-CAT A215.....	28
3.4.6.	MWCNT (<i>Multi Wall Carbon Nano Tube</i>)	29
3.5.	Peralatan.....	30
3.5.1.	Peralatan Preparasi Sampel Pengujian.....	30
3.5.2.	Peralatan Karakterisasi Sampel.....	31
3.6.	Prosedur Penelitian.....	33
3.6.1.	Penimbangan Bahan	33
3.6.2.	Pencampuran Panas hasil <i>Hot Blending</i>	34
3.6.3.	<i>Crushing</i> Hasil <i>Hot Blending</i>	38
3.6.4.	Pencetakan Panas (Hot Pressing) dengan Compression Moulding	39
3.6.5.	Preparasi Spesimen Pengujian Tarik	40
3.6.6.	Preparasi Spesimen Pengujian Tekuk	41
3.6.7.	<i>Conditioning</i> Spesimen Tarik dan Tekuk	41
3.6.8.	Pengujian Tarik (<i>Tensile Testing</i>).....	42
3.6.9.	Pengujian Tekuk (<i>Flexural Testing</i>).....	43
3.6.10.	Pengujian Densitas dan Porositas.....	44
3.6.11.	Pengujian Konduktivitas Listrik Sampel dengan <i>Four Point Probe</i>	46
3.6.12.	Karakterisasi Morfologi Patahan Tekuk dengan	
3.6.13.	SEM dan EDS.....	48
3.6.14.	Karakterisasi Gugus Fungsi dengan FTIR	49
BAB 4	PEMBAHASAN.....	52
4.1.	Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT dan Cu Terhadap Koduktivitas Listrik Pelat Bipolar	52
4.2.	Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT dan Cu Terhadap Kekuatan Tarik dan % Elongasi Pelat Bipolar	59
4.3.	Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT dan Cu Terhadap Kekuatan Tekuk Pelat Bipolar	63
4.4.	Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT dan Cu Terhadap Kerapatan Massa dan % Porositas Pelat Bipolar	68
4.5.	Analisa Permukaan Patahan Pelat Bipolar	70
4.6.	Analisa Gugus Fungsi Pelat Bipolar	73
BAB 6	KESIMPULAN.....	76
5.1.	Kesimpulan.....	76
5.2.	Saran.....	77
DAFTAR PUSTAKA.....		78

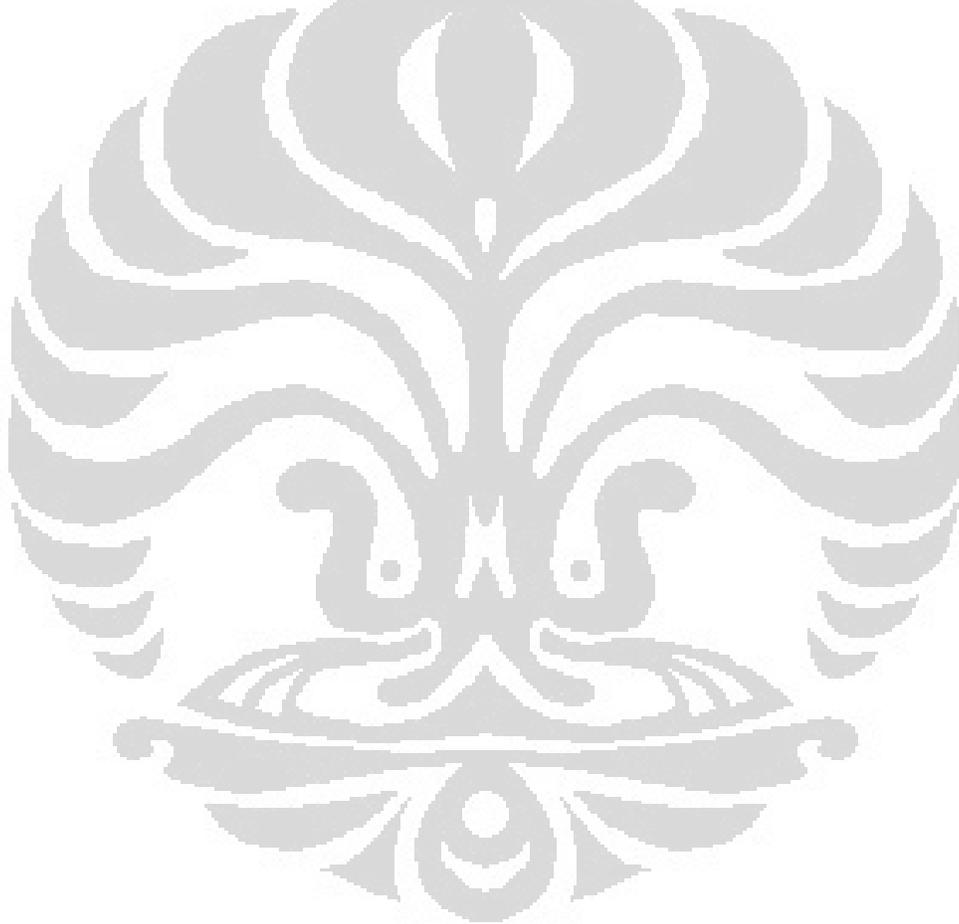
DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Perbedaan Jenis-Jenis <i>Fuel Cell</i>	8
Tabel 2.2. Komponen Utama Penyusun PEMFC.....	11
Tabel 2.3. Spesifikasi Material untuk Pelat Bipolar Ideal.....	14
Tabel 2.4. Material untuk Pelat Bipolar PEMFC.....	15
Tabel 2.5. Karakteristik <i>Maleic Anhydride</i>	17
Tabel 2.6. Sifat-Sifat Grafit.....	19
Tabel 2.7. Karakteristik <i>Carbon Nanotubes</i>	21
Tabel 3.1. Komposisi material pada setiap formulasi penelitian.....	26
Tabel 3.2. Sifat <i>Polypropylene</i> Grade HI-10-HO.....	27
Tabel 3.3. Spesifikasi Anti-Oksidan CN-CAT B215.....	29
Tabel 3.4. Spesifikasi <i>Multi Wall Carbon Nano Tube (MWCNT)</i>	29
Tabel 3.5. Peralatan Preparasi Sampel Pengujian.....	30
Tabel 3.6. Peralatan Karakterisasi Sampel.....	32
Tabel 3.7. Parameter proses pencetakan panas (<i>hot pressing</i>).....	39
Tabel 3.8. Parameter proses pengondisian spesimen uji tarik dan uji tekuk.....	42
Tabel 3.9. Parameter Proses Pengujian Tarik.....	42
Tabel 4.1. Perbandingan Nilai Kekuatan Tekuk Komposit Pelat Bipolar MWCNT/PP Formula A dan B.....	67
Tabel 4.2. Data Literatur Nilai Densitas Bahan.....	68
Tabel 4.3. Nilai densitas komposit pelat bipolar MWCNT/PP-Cu.....	68
Tabel 4.4. Daftar gugus fungsional yang terdapat didalam komposit.....	74

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 2.1.	Skema <i>Input</i> dan <i>Output Fuel Cell</i>	7
Gambar 2.2.	Rentang <i>Output</i> Daya Listrik <i>Fuel Cell</i>	9
Gambar 2.3.	<i>Basic Fuel Cell Operation</i>	10
Gambar 2.4.	Susunan PEMFC.....	11
Gambar 2.5.	Pelat Bipolar	13
Gambar 2.6.	Rumus Struktural Polipropilena.....	16
Gambar 2.7.	Proses Pembuatan Serat Karbon dari PAN dan <i>Pitch</i> ...	18
Gambar 3.1.	Diagram alir preparasi dan fabrikasi sampel pelat bipolar.....	22
Gambar 3.2.	Diagram alir karakterisasi dan pengujian sampel pelat Bipolar.....	23
Gambar 3.3.	Skema Metode <i>Three-Point Bending Test</i>	43
Gambar 3.4.	<i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	48
Gambar 3.5.	Prinsip Pengujian FTIR.....	50
Gambar 4.1.	Grafik Perbandingan Nilai Konduktivitas Listrik F1, F2, dan F3 Pelat Bipolar	53
Gambar 4.2.	Ilustrasi peran carbon black dalam mengisi celah pada sistem komposit	55
Gambar 4.3.	Model <i>Conduction path</i> pada komposit bermatriks Polimer	56
Gambar 4.4.	Ilustrasi <i>conduction path</i> pada komposit yang mengandung (a) MWCNT terdispersi sempurna pada matriks dan (b) MWCNT yang beragregat	56
Gambar 4.5.	Mekanisme pengikatan gugus hidroksil pada permukaan carbon black oleh gugus maleic anhidride akibat dari konsentrasi carbon black yang lebih banyak dari MWCNT	59
Gambar 4.6.	Grafik Pengaruh MWCNT dan Cu terhadap Nilai UTS Pelat Bipolar MWCNT/PP-Cu	60
Gambar 4.7.	Grafik Pengaruh MWCNT dan Cu terhadap % elongasi Pelat Bipolar MWCNT/PP-Cu	60
Gambar 4.8.	Ilustrasi stress concentration pada material material.....	62
Gambar 4.9.	Grafik Pengaruh MWCNT dan Cu terhadap kekuatan tekuk Pelat Bipolar MWCNT/PP-Cu	64
Gambar 4.10.	Data Literatur Pengaruh MWCNT Terhadap Kuat Tekuk	65
Gambar 4.11.	Grafik Pengaruh MWCNT dan Cu terhadap modulus kekakuan komposit pelat bipolar MWCNT/PP-Cu.....	66
Gambar 4.12.	Hubungan antara % elongasi dan nilai modulus kekakuan komposit pelat biplat MWCNT/PP-Cu berdasarkan hasil pengujian	66
Gambar 4.13.	Grafik Perbandingan Kekuatan Tekuk Pelat Bipolar Formula A dan B	67

Gambar 4.14.	Grafik Pengaruh MWCNT dan Cu terhadap densitas komposit pelat bipolar MWCNT/PP-Cu	69
Gambar 4.15.	Grafik Pengaruh MWCNT dan Cu terhadap porositas komposit pelat bipolar MWCNT/PP-Cu	69
Gambar 4.16.	Permukaan patahan tekuk sampel F3 yang diamati menggunakan SEM pada perbesaran (a) 3000x, (b) 5000x, (c) 10000x, dan (d) hasil EDS permukaan area (c)	72
Gambar 4.17.	Analisa serbuk multi wall carbon nano tubes (MWCNT) menggunakan HRSEM	73
Gambar 4.18.	Grafik Hasil Pengujian FTIR F1, F2, dan F3 material pelat bipolar	74

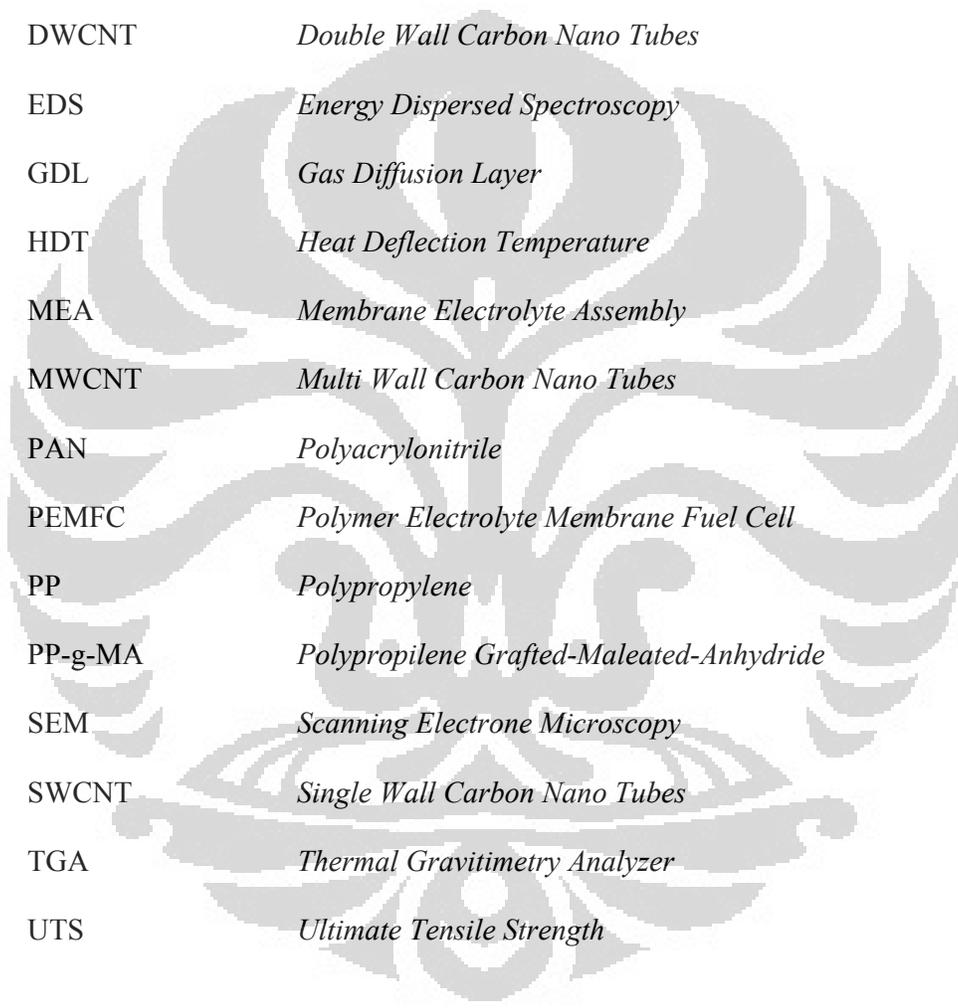


DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1:** Jadwal Kegiatan Penelitian
- Lampiran 2:** Foto Bahan dan sampel
- Lampiran 3:** Hasil Pengujian 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



DAFTAR SINGKATAN



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

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
$wt\%$	Persen Berat	%
σ_c	Tegangan Tarik Komposit	N/m^2
σ_m	Tegangan Tarik Matriks	N/m^2
σ_f	Tegangan Tarik Penguat (Fiber)	N/m^2
V_m	Fraksi Volume Penguat Matriks	%
V_f	Fraksi Volume Penguat Fiber	%
E_c	Modulus Elastisitas Komposit	N/m^2
E_m	Modulus Elastisitas Matriks	N/m^2
E_f	Modulus Elastisitas Penguat Fiber	N/m^2
ρ_c	Densitas Komposit	$gram/cm^3$
ρ_m	Densitas Matriks	$gram/cm^3$
ρ_f	Densitas Penguat Fiber	$gram/cm^2$
σ	Konduktivitas	S/cm
G	Konduktansi	S
R	Resistivitas	$\Omega.cm$
ρ_{sampel}	Densitas Sampel	$gram/cm^3$
ρ_{air}	Densitas Air	$gram/cm^3$
M_u	Massa Sampel di Udara	gram
M_a	Massa Sampel di Air	gram

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketergantungan masyarakat dunia terhadap energi dari bahan bakar fosil akan menjadi ancaman bagi kita sendiri. Hal ini disebabkan karena sumber energi yang dijadikan tumpuan adalah sumber energi yang berasal dari fosil yang tersimpan di dalam 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 dalam memanfaatkan dapat dilakukan secara efisien.

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). Prinsip kerja sel bahan bakar (*fuel cell*) merupakan kebalikan dari proses elektrolisa. Pada proses elektrolisa, 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 sendiri diperoleh dari berbagai cara yang cukup mudah dan murah, salah satunya dengan proses elektrolisa air.

1.2. Perumusan Permasalahan

Pelat bipolar merupakan salah satu komponen pada PEMFC, pelat bipolar umumnya dibuat dari material yang memiliki konduktivitas listrik yang baik dan tidak dapat dilewati oleh gas. 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. Namun, masalah yang timbul dalam penggunaan material termoplastik sebagai matriks dalam komposit pelat bipolar ini adalah nilai konduktivitas listrik dari material termoplastik tersebut cukup rendah dan cenderung bersifat sebagai insulator listrik. Salah satu solusi untuk mengatasi adanya permasalahan tersebut adalah dengan menggunakan material penguat (*reinforcement*) yang dapat meningkatkan sifat konduktivitas listrik dari pelat bipolar PEMFC.

1.3. Tujuan Penelitian

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

1. Mengetahui proses fabrikasi pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP-Cu, dengan bahan polipropilena (PP), *polypropylene-grafted-maleated-anhydred* (PP-g-MA), *carbon nano tubes* (CNT), serat karbon Fortafile 243, grafit 4012, *carbon black*, anti oksidan CN-CAT A215, dan tembaga (Cu).
2. Mengetahui sifat-sifat fisis dan mekanis pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP-Cu, meliputi konduktivitas listrik, kekuatan tarik (*tensile strength*), kekuatan tekuk (*flexural strength*), *densitas*, porositas (*porosity*), gugus fungsi, dan karakteristik patahan tekuk.
3. Mengetahui efek penambahan tembaga (Cu) terhadap sifat mekanis dan konduktivitas listrik dari pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP-Cu.

1.4. Hipotesis Penelitian

Pelat bipolar yang disyaratkan untuk PEMFC harus mempunyai konduktivitas yang tinggi dan *performace* yang baik serta ringan. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan material pelat bipolar yang memiliki konduktivitas listrik yang baik untuk dapat digunakan sebagai material pelat bipolar. Material penguat (*reinforcement*) yang digunakan yaitu *multiwall carbon nano tubes* (MWCNT) memiliki konduktivitas listrik sebesar 10^2 S/cm dan kemurnian sebesar >99% serta serbuk tembaga (Cu) yang memiliki konduktivitas listrik 59.6×10^4 S/m dan kemurnian sebesar >99%. Penambahan fraksi volum material *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT) sebanyak 0.1%, 0.5%, dan 1% serta penambahan fraksi volum serbuk tembaga (Cu) sebesar 0.1%, 0.2%, dan 0.5% diharapkan dapat meningkatkan nilai konduktivitas listrik hingga lebih dari 100 S/cm sehingga dapat memenuhi persyaratan dari Departemen Energi Amerika Serikat (DOE).

Penelitian-penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Shu-Hang Liao (2008) menunjukkan bahwa penambahan dan penyebaran *multiwall carbon nano tubes* (MWCNT) yang baik dapat meningkatkan konduktivitas listrik, sifat mekanis dan stabilitas termal dari pelat bipolar berbasis nano komposit MWCNT/PP-Cu^[1]. 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 pelat bipolar^[1]. Pada tahun 2010, Sutoni melakukan penelitian yang membahas pengaruh penambahan serbuk tembaga (Cu) terhadap sifat konduktivitas listrik dan kekuatan mekanis dari material pelat bipolar berbasis nano komposit. Hasil penelitian yang dilakukan Sutoni menunjukkan bahwa penambahan 1% serbuk tembaga (Cu) memiliki sifat konduktivitas yang paling tinggi (4.739 S/cm)^[2]. Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya maka hipotesis dari penelitian ini adalah: “Penambahan fraksi volum penguat *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT) dan serbuk tembaga (Cu) memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap peningkatan sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis dari material pelat bipolar berbasis nano komposit MWCNT/PP-Cu untuk aplikasi *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC)”.

1.5. Ruang lingkup penelitian

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

- a. Material-material yang digunakan dalam pembuatan komposit pelat bipolar pada penelitian ini meliputi polipropilena (PP), *polypropylene-grafted-maleated anhydrate* (PP-g-MA), *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT), serat karbon, grafit, serbuk tembaga (Cu) dan anti oksidan CN-CAT A215.
- b. Formulasi yang digunakan dibagi menjadi 3 formula yang merupakan variabel bebas dari fraksi volum penguat *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT) dengan besarnya masing-masing 0.1%, 0.5% dan 1% dan fraksi volum serbuk tembaga (Cu) sebesar 0.1%, 0.2% dan 0.5%.
- 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 unsur kimia dalam sampel pelat bipolar 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 enam bab, yaitu sebagai berikut:

- **Bab 1 Pendahuluan**

Berisi latar belakang penelitian, perumusan permasalahan, tujuan penelitian, hipotesis penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

- **Bab 2 Landasan Teori**

Berisi studi literatur yang berkaitan dengan penelitian ini.

- **Bab 3 Metodologi Penelitian**

Berisi diagram alir penelitian, variabel penelitian, formulasi penelitian, komposisi material, spesifikasi dan karakteristik material, peralatan preparasi sampel pengujian, peralatan karakterisasi sampel dan prosedur penelitian secara terperinci.

- **Bab 4 Hasil dan Pembahasan**

Berisi data-data hasil penelitian dan analisa dari hasil penelitian.

- **Bab 6 Kesimpulan**

Berisi kesimpulan akhir berdasarkan pembahasan dan analisis akhir dari penelitian.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Bahan Bakar (*Fuel Cell*)

Salah satu sumber energi alternatif yang sedang dikembangkan saat ini adalah sel tunam (*fuel cell*). Sel tunam (*fuel cell*) merupakan suatu alat konversi energi yang mampu menghasilkan energi listrik dari bahan bakar hidrogen. Pada tahun 1839, Sir William Grove berhasil menciptakan sel tunam (*fuel cell*) untuk yang pertama kalinya. Dari penelitian yang dilakukan diketahui bahwa air dapat terurai menjadi hidrogen dan oksigen ketika diberikan arus listrik. Proses ini dikenal dengan proses elektrolisis. Hipotesis yang dikeluarkan adalah jika proses elektrolisis air tersebut dibalik maka akan dihasilkan air dan arus listrik. Istilah sel tunam (*fuel cell*) kemudian berhasil dipopulerkan beberapa tahun kemudian oleh Ludwig Mond dan Charles Langer dimana kedua ilmuwan tersebut membuat suatu model praktis untuk menghasilkan listrik^[3]. Bahan baku utama dari sel tunam (*fuel cell*) adalah gas hidrogen yang dapat berasal dari sinar matahari, sampah organik (*biomass*) ataupun dari angin^[1,3]. Sel tunam (*fuel cell*) merupakan alat konversi energi yang dapat diisi ulang (*rechargeable*) dan juga dapat dibawa kemana-mana (*portable*)^[3]. 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^[4]. Reaksi elektrokimia yang terjadi pada *fuel cell* merupakan suatu reaksi pembakaran yang dapat dirumuskan dalam persamaan 2.1 sebagai berikut^[4]:



Bahan bakar berupa oksigen dapat diperoleh dari udara sedangkan gas hidrogen bisa diperoleh dari reaksi reformer hidrokarbon yang berasal dari

pabrik besar^[3]. Selain itu, gas hidrogen sendiri juga dapat diperoleh dari proses elektrolisis air^[3]. Kendala yang dihadapi dalam hal bahan bakar diantaranya adalah gas hidrogen yang bermolekul kecil, susah dicairkan, dan mudah terbakar sehingga memberikan kesulitan saat penyimpanan dan distribusi. Solusi yang diterapkan untuk menangani gas hidrogen ini diantaranya adalah dengan memperkecil reaktor *reformer* dengan bahan baku LPG atau gas metana, menguraikan metanol yang dibuat dari pabrik besar tetapi dalam bentuk cair sehingga mudah untuk dipindahkan. Gas hidrogen juga dapat diperoleh dari metanol setelah diuraikan menjadi gas CO dan hidrogen, kemudian gas CO dioksidasi menjadi CO₂ dan air^[3]. Elektron yang dihasilkan selanjutnya dimanfaatkan sebagai arus listrik. Residu yang dihasilkan dari reaksi dalam suatu *fuel cell* hanyalah berupa air sehingga tidak mencemari lingkungan. Skema kerja dari sistem *input* dan *output* dari *fuel cell* dapat dilihat pada gambar di bawah ini^[1]:



Gambar 2.1 Skema *Input* dan *Output Fuel Cell*^[5]

Sistem *fuel cell* yang bekerja menggunakan hidrogen dapat didesain menjadi suatu sistem yang ringan dan mudah dibawa. Rangkaian *fuel cell* juga tidak mempunyai bagian yang bergerak atau bergetar (bila dibandingkan sistem piston pada bahan bakar minyak) dan sama sekali tidak menimbulkan polusi. Sehingga pada kondisi yang ideal, sistem ini tahan uji^[4]. Untuk itu *fuel cell* menjadi kandidat yang sangat baik sebagai sumber energi alternatif. *Fuel cell* sebagai sumber energi alternatif dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis, berdasarkan kombinasi tipe bahan bakar dan oksidan, tipe elektrolit yang digunakan, temperatur operasi, dan lain-lain. *Fuel cell* berdasarkan jenis elektrolit penyusunnya dapat dibedakan menjadi:

1. *Alkaline Fuel Cell* (AFC),
2. *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC),

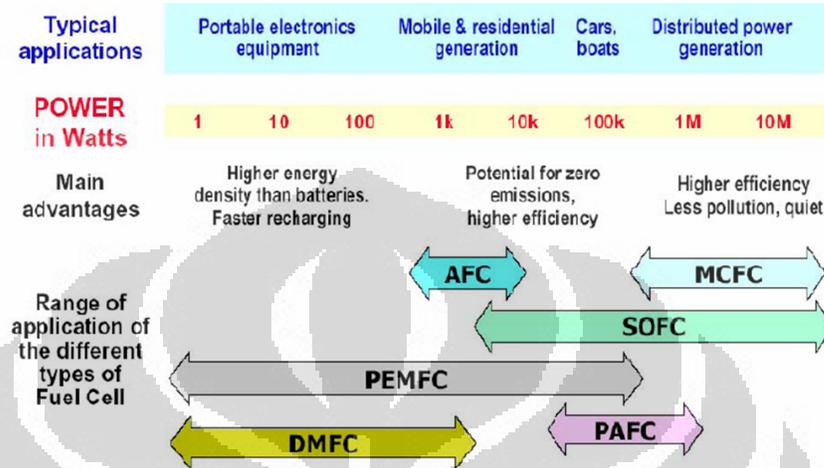
3. *Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)*,
4. *Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)*,
5. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)*, dan
6. *Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)*.

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

Tabel 2.1 Perbedaan Jenis-Jenis *Fuel Cell*^[5]

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

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



Gambar 2.2 Rentang output daya listrik *fuel cell*^[5]

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^[5]:

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

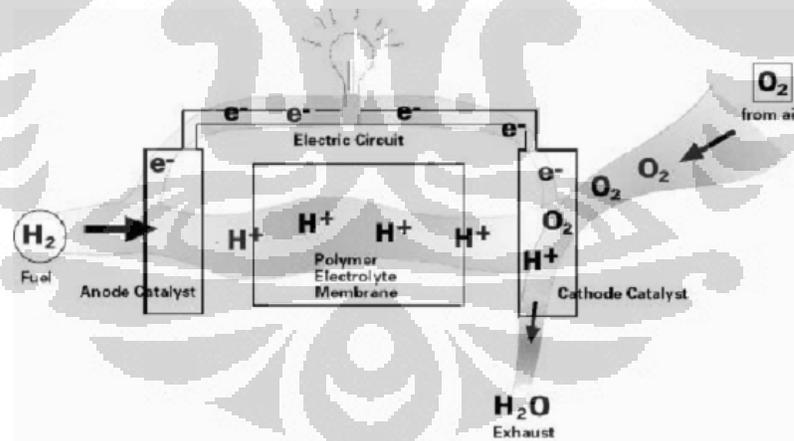
Sel bahan bakar (*fuel cell*) memiliki banyak jenis dan spesifikasi. Pengelompokan jenis *fuel cell* dilakukan berdasarkan parameter jenis elektrolit yang menyusun *fuel cell* tersebut. Secara umum jenis elektrolit yang terdapat di dalam *fuel cell* akan menentukan^[5]:

- Jenis sel bahan bakar (*fuel cell*),
- Jenis reaksi elektrokimia yang terjadi di dalam *fuel cell*,
- Jenis katalis yang digunakan,

- Jenis bahan bakar atau *input* yang diperlukan,
- Rentang temperatur kerja dari *fuel cell*.

2.2 *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)*

Polymer electrolyte membrane fuel cell atau biasa disebut juga dengan *proton exchange membrane fuel cell* 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^[6]. Grubbs menemukan bahwa tanpa adanya asam yang kuat pada membran ini maka membran tersebut akan mampu untuk memindahkan kation dan proton ke katoda^[6]. PEMFC adalah salah satu jenis *fuel cell* yang mempunyai kelebihan dapat bekerja pada temperatur rendah, ringan, dan dapat dibuat dengan ukuran kecil sehingga dapat mengurangi biaya produksi. PEMFC adalah sebuah perangkat elektrokimia yang mengubah secara langsung energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik melalui reaksi berpasangan oksidasi-reduksi^[2]. Secara skematis PEMFC terlihat seperti pada gambar 2.3 berikut^[1]:



Gambar 2.3 *Basic fuel cell operation*^[1].

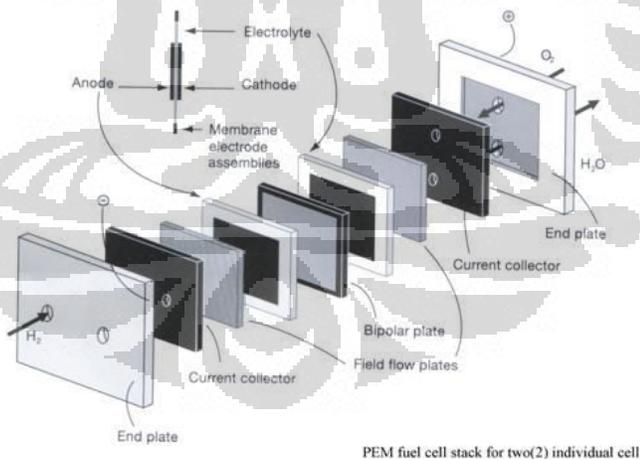
Pada lima tahun terakhir, penelitian PEMFC mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Industri otomotif melakukan investasi melalui berbagai usaha dalam mengkomersialisasi PEMFC pada mobil dengan

harapan mampu bersaing dengan kendaraan bermesin bakar internal^[7]. Secara umum, material penyusun PEMFC dapat dilihat pada tabel 2.2 di bawah ini^[6]:

Tabel 2.2 Komponen Utama Penyusun PEMFC^[6]

Komponen	Bahan Penyusun
<i>Membrane Electrolyte Assembly</i> (MEA)	Polimer solid terimpregnasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda. Kertas atau kain karbon berpori untuk <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)
Pelat Bipolar	Grafit, <i>stainless steel</i> , atau komposit polimer termoplastik
Pelat Penutup	Material dengan kekuatan mekanis yang baik (biasanya baja atau aluminium)
Penyimpanan Arus	Logam dengan kontak elektrik dan konduktivitas yang baik (biasanya tembaga)

Susunan dari *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) dapat dilihat pada gambar 2.4 di bawah ini^[7]:



Gambar 2.4 Susunan PEMFC^[7]

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^[8]. Keunggulan yang dimiliki oleh PEMFC secara terperinci adalah sebagai berikut^[9]:

- PEMFC mempunyai elektrolit padat yang memberikan ketahanan yang sangat baik terhadap gas.
- Temperatur operasi PEMFC yang rendah memungkinkan waktu *start up* yang cepat.
- PEMFC tidak memiliki konstituen sel yang bersifat korosif.
- PEMFC cocok digunakan terutama untuk situasi dimana hidrogen murni dapat digunakan sebagai bahan bakar
- PEMFC mampu beroperasi pada kondisi tekanan hingga 3000 Psi dan memiliki diferensial 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.

Secara umum biaya fabrikasi yang cukup tinggi untuk memproduksi *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) masih menjadi kendala utama untuk dapat memproduksi alat konversi energi alternatif ini. Oleh karena itu diperlukan suatu inovasi dan terobosan dalam mendesain suatu proses fabrikasi dan pemilihan material yang tepat melalui suatu penelitian secara komprehensif sehingga PEMFC ini dapat diproduksi dalam jumlah masal dengan harga cukup ekonomis. Sementara keterbatasan yang dimiliki oleh PEMFC adalah sebagai berikut^[10]:

- 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.

2.3 Pelat Bipolar

Pelat bipolar merupakan bagian penting dari sistem *fuel cell*. Pelat bipolar itu sendiri merupakan komponen utama dalam PEMFC yang berfungsi untuk mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda menuju katoda. Sebagai komponen utama dalam PEMFC, pelat bipolar berkontribusi terhadap 80% dari volum PEMFC, 70% dari berat PEMFC serta 60% dari biaya fabrikasi PEMFC^[7]. Hal ini berarti bahwa reduksi ukuran, berat dan biaya fabrikasi pelat bipolar PEMFC dapat difokuskan pada pemilihan material serta metode fabrikasi yang tepat^[8].

Pelat bipolar ini berperan dalam mengumpulkan arus dari masing-masing *Membran Electrolite Assembly* (MEA) yang terletak di antara pelat anoda dan pelat katoda. Syarat utama material yang dapat dijadikan sebagai pelat bipolar adalah mampu mengalirkan listrik atau menghantarkan elektron dengan baik dan tidak dapat ditembus gas. Pelat bipolar biasanya dibuat dari bahan grafit, logam seperti aluminium, baja tahan karat (*stainless steel*), paduan titanium paduan nikel, atau dapat juga dibuat dari material komposit. Gambar 2.5 merupakan contoh pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC^[11].



Gambar 2.5 Pelat Bipolar^[11]

Fungsi utama pelat bipolar dalam *fuel cell* adalah sebagai berikut^[8]:

- Mengalirkan elektron ke seluruh sirkuit *fuel cell*,

- Mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda dan katoda,
- Menyatukan rangkaian *fuel cell* yang dilengkapi voltase (rangkaian *fuel cell* tergantung pada bentuk pelat bipolar),
- Mengalirkan dan mendistribusikan gas ke elektroda secara merata,
- Memisahkan oksigen dan bahan bakar gas lainnya,
- Memasukkan gas H₂ ke anoda dan memasukkan gas O₂ katoda,
- Membuang air hasil reaksi,
- Berperan sebagai penguat mekanis sekaligus penahan membran tipis dan elektroda dan sebagai penjepit rangkaian *fuel cell*,
- Berperan sebagai konduktor panas untuk meregulasikan temperatur *fuel cell* dan memindahkan panas dari elektroda ke saluran pendingin.

Sementara spesifikasi yang harus dipenuhi oleh suatu material agar dapat dijadikan sebagai pelat bipolar sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh Departemen Energi Amerika Serikat (*Department of Energy United States*) dapat dilihat pada tabel 2.3 di bawah ini^[8]:

Tabel 2.3 Spesifikasi Material untuk Pelat Bipolar Ideal^[8]

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

Sementara bahan yang dapat dijadikan sebagai pelat bipolar berikut karakteristiknya dapat dilihat pada tabel di bawah ini^[12]:

Tabel 2.4 Material untuk Pelat Bipolar PEMFC^[12]

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

2.4. Material Komposit

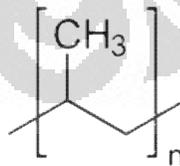
Material komposit merupakan salah satu jenis material rekayasa yang banyak dikembangkan oleh masyarakat global dewasa ini. Material komposit dapat didefinisikan sebagai suatu material rekayasa yang tersusun atas kombinasi antara dua jenis material konstituen atau lebih di mana kombinasi ini terjadi dalam skala makroskopis^[10]. Dalam sistem kombinasi material komposit ini, terdapat material yang berfungsi sebagai matriks dan material yang berfungsi sebagai penguat (*reinforcement*). Matriks dalam komposit merupakan fasa *continuous* yang menyelubungi fasa lainnya (*surrounds other phase*). Fraksi volum dari matriks dalam suatu komposit lebih besar dari pada fraksi volum fasa penguat. Matriks ini juga berperan dalam menentukan jenis material komposit. Sementara penguat (*reinforcement*) merupakan fasa *discontinuous* dalam komposit^[10].

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

- 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. Matriks 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 propilena. Proses polimerisasi adalah proses penyambungan unit-unit molekul kecil (*monomer*) menjadi molekul makro (*macromolecule*) dengan struktur rantai molekul yang sangat panjang^[11]. Kebanyakan polipropilen komersial merupakan *isotactic* dan memiliki kristalinitas tingkat menengah di antara polietilena berdensitas rendah dengan polietilena berdensitas tinggi. Aplikasi dari polipropilen antara lain adalah untuk pengemasan, tekstil, alat tulis, berbagai tipe wadah, perlengkapan laboratorium, komponen otomotif, dan uang kertas polimer^[13]. Rumus struktur polipropilen dapat dilihat pada gambar 2.6^[12].



Gambar 2.6 Rumus Struktural Polipropilen^[12]

Keunggulan yang dimiliki oleh polipropilen adalah sebagai berikut^[13]:

- Ringan karena memiliki berat jenis antara 0.9-0.92 gram/cm³

- Memiliki ketahanan terhadap *stress* dan retak yang tinggi (kekuatan tekan dan kekuatan tarik yang tinggi)
- Memiliki suhu operasional yang tinggi dengan titik leleh 160°C
- Memiliki sifat dielektrik yang baik
- Memiliki ketahanan yang baik terhadap serangan alkali kuat, asam, pelarut organik dan *elektrostatic degreasing*.
- Tidak beracun
- Mudah untuk diproduksi, dirakit dan murah

Struktur dari polipropilen juga mengalami isomerisasi. Isomerisasi dari polimer dibagi menjadi dua yaitu isomerisme stereo dan isomerisme geometrikal^[9]. Isomerisme stereo adalah isomerisme yang disebabkan oleh perbedaan lokasi -R atau gugus-gugus samping^[9].

2.4.2. Bahan Aditif *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 table 2.5 di bawah ini^[11]:

Tabel 2.5 Karakteristik *Maleic Anhydride*^[11]

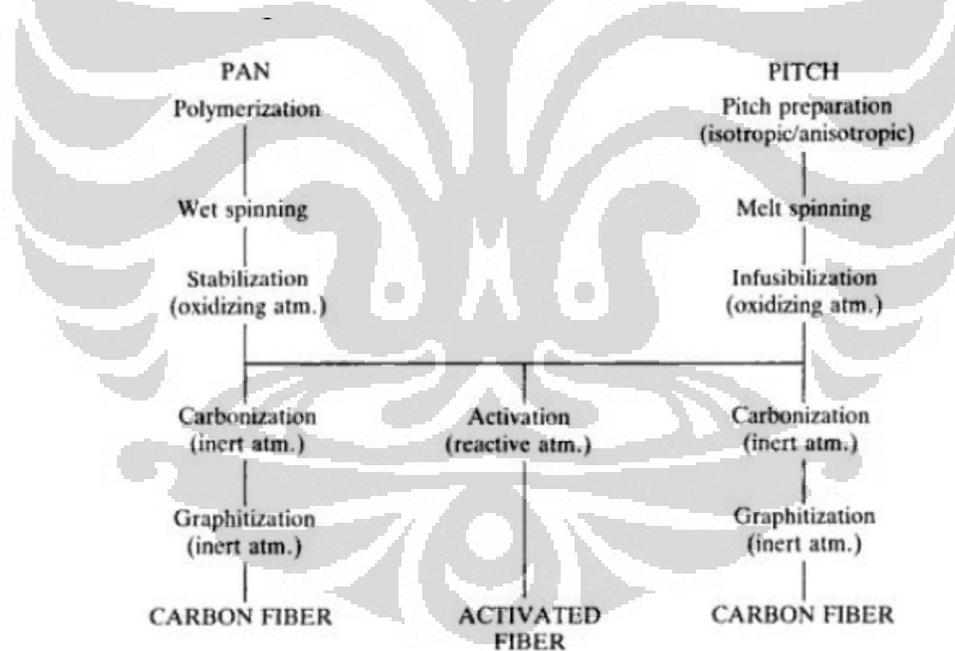
Sifat	Nilai
Berat Molekul	98.06 gr/mol
Struktur	C ₄ H ₂ O ₃
Wujud	Serpihan Putih
Berat Jenis	1.48 Kg/dm ³
Titik Leleh	52.8°C
Titik Didih	202°C

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 anhidrida maleat dari PP-g-MA^[11].

2.4.3. Serat Karbon

Serat karbon adalah serat yang memiliki komposisi minimal 92 %wt karbon. Struktur kristal dari serat karbon bermacam-macam yaitu kristalin, amorf dan semi kristalin. Serat karbon memiliki diameter yang sangat tipis yaitu 0.005-0.010 mm. Tujuan ditambahkan serat karbon didalam sistem komposit adalah untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Serat karbon dihasilkan dengan cara mensintesis dari rayon, poliakrilonitril (PAN) dan *pitch* dengan menghilangkan hidrogen dan nitrogen dalam kondisi atmosfer inert^[11]. Gambar 2.7 menunjukkan proses pembuatan serat karbon dari PAN dan *Pitch*^[11].



Gambar 2.7 Proses Pembuatan Serat Karbon dari PAN dan *Pitch*^[11].

2.4.4. Grafit

Grafit terdiri atas lapisan atom karbon yang dapat menggelincir dengan mudah. Grafit amat lembut dan dapat digunakan sebagai minyak

pelumas untuk membuat peralatan mekanis bekerja lebih lancar. Grafit memiliki warna kelabu dan umumnya grafit digunakan sebagai material penghantar listrik atau konduktor listrik. Grafit dinamai oleh Abraham Gottlob Werner pada tahun 1789 dengan mengambil kata dari bahasa Yunani^[11]. Grafit digolongkan menjadi dua jenis, yaitu grafit alami dan grafit sintetik. Grafit sintetik lebih murni dibandingkan grafit alami. Grafit sintetik merupakan produk yang dibuat dari material karbon amorf melalui proses perlakuan khusus pada kondisi temperatur tinggi. Grafit digunakan sebagai bahan pengisi khususnya dalam matriks polimer karena memiliki konduktivitas listrik dan panas yang baik, serta memiliki sifat-sifat pelumasan (lubrikasi) yang baik. Karena strukturnya yang berlapis, grafit memberi sifat kekakuan dan dimensi yang stabil terhadap polimer^[15].

Grafit sintetik digunakan dalam berbagai aplikasi seperti pengecoran logam, karbon elektrik, pelat bipolar *fuel cell*, pelapisan, proses elektrolitik, sebagai bahan pengisi konduktif, campuran karet dan plastik, serta untuk aplikasi pemboran. Partikel grafit sintetik berukuran 2 μm (bubuk) sampai dengan 2 cm (potongan-potongan) dengan kandungan 99% karbon^[13]. Sifat dan karakteristik dari grafit dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.6 Sifat-Sifat Grafit^[13]

Sifat	Nilai
Komposisi Kimia	C (80-99.7%), Fe ₂ O ₃
Kerapatan	1.6-2.25 gr/cm ³
Warna	Hitam keabu-abuan
Konduktivitas Panas	200W/mK
Titik Leleh	4027-4427°C

2.4.5. Anti-oksidan

Anti-oksidan merupakan senyawa kimia yang digunakan untuk mencegah atau menghambat terjadinya reaksi oksidasi dari material plastik^[15]. Untuk mencegah atau mengantisipasi terjadinya reaksi oksidasi

tersebut maka perlu ditambahkan suatu anti-oksidan. Secara umum anti-oksidan dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam, yaitu^[15]:

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

2.4.6. *Multiwall Carbon Nano Tube (MWCNT)*

CNT adalah alotrop karbon dengan struktur nano silinder^[16]. CNT memiliki rasio diameter dan panjang sampai 132.000.000:1, yang secara signifikan lebih besar dibandingkan bahan lainnya. CNT digunakan dalam banyak aplikasi dalam bidang nanoteknologi, elektronik, optik, serta bidang-bidang ilmu material^[17]. CNT memiliki kekuatan yang luar biasa dan unik terutama dalam sifat elektrik dan memiliki tingkat efisiensi yang tinggi dalam hal konduktansi termal^[17]. Secara umum CNT dapat diklasifikasikan menjadi CNT berdinding tunggal (*Single Wall Carbon Nanotube/SWCNT*) dan CNT berdinding multi (*Multi Wall Carbon Nanotube /MWCNT*)^[17].

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 nano tubes* (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^[18]:

Tabel 2.7 Karakteristik *Carbon Nanotubes*^[18]

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	-	-
MWCNT	0.27 – 0.95	11 – 63	-

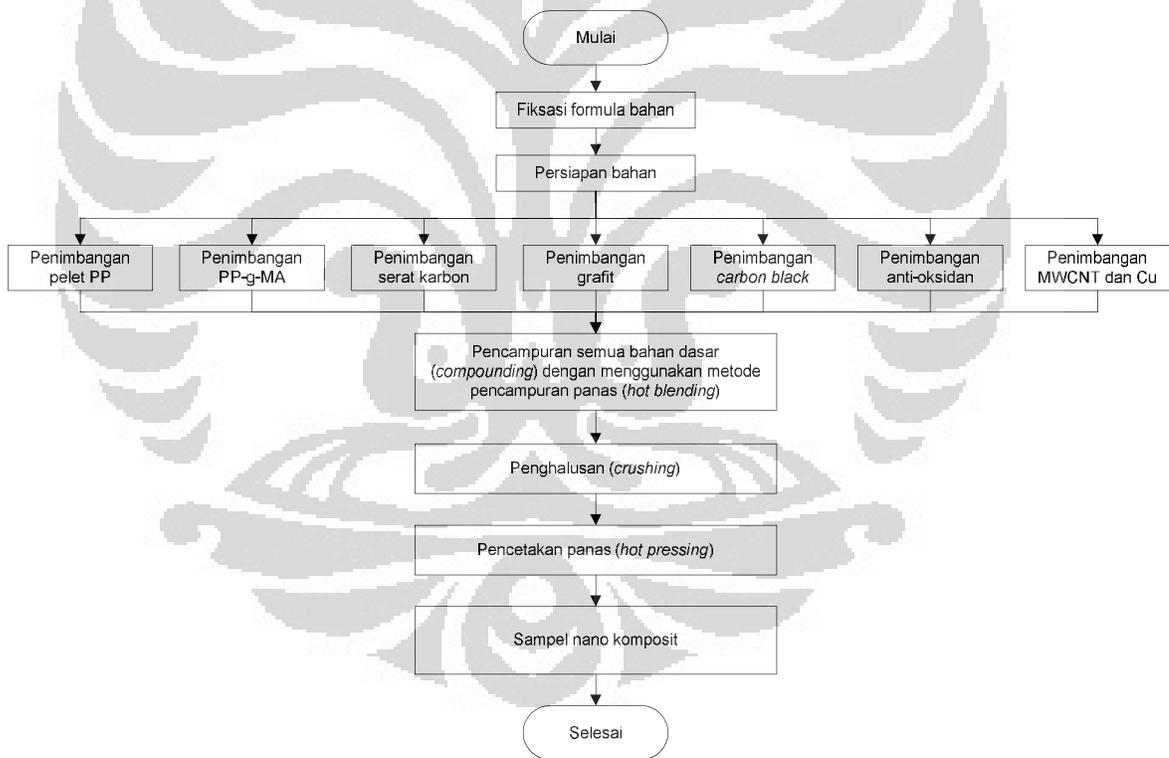
2.4.7 Serbuk Tembaga (Cu)

Serbuk tembaga memiliki penampakan berwarna kecoklatan atau merah bata dengan bentuk *spherical* (melingkar). Serbuk tembaga ditambahkan ke dalam komposit dengan tujuan utama untuk meningkatkan nilai konduktivitas komposit. Selain itu, keistimewaan yang dimiliki serbuk tembaga adalah rendahnya nilai densitas partikel tersebut. Densitas partikel serbuk tembaga adalah sekitar 0.15 – 0.35g/cm³. Pada komposit pelat bipolar, partikel serbuk tembaga ditambahkan sebagai penguat untuk meningkatkan sifat mekanis dan konduktivitas listrik pelat bipolar.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

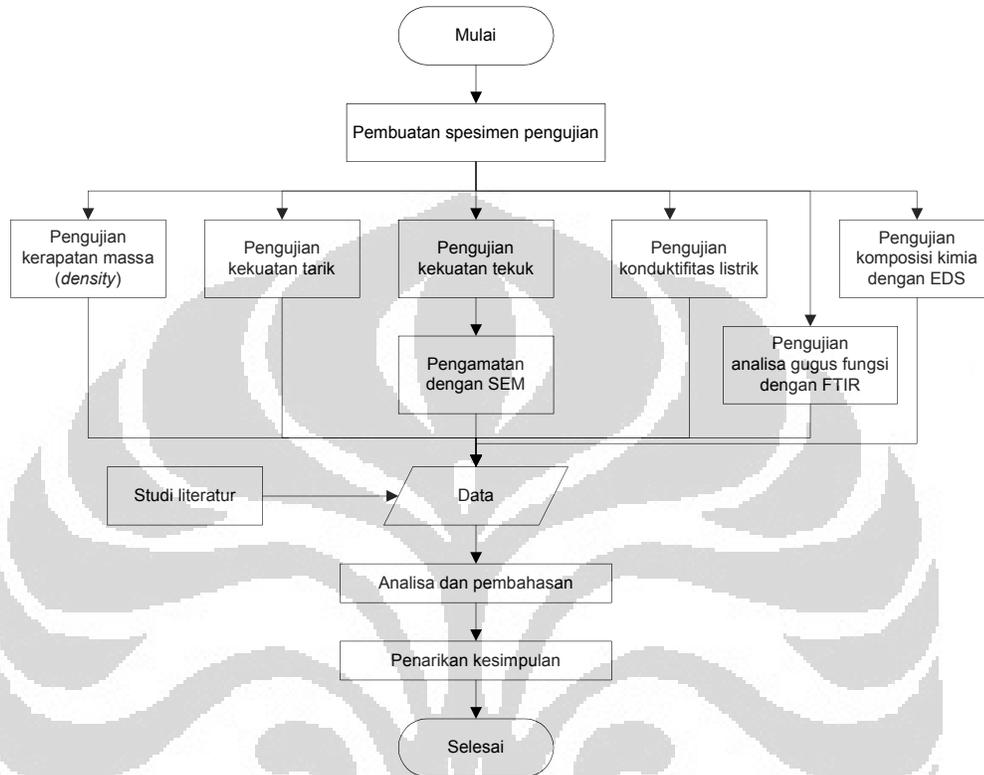
3.1. Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian pengaruh penambahan fraksi volum penguat *multi wall carbon nano tube* (MWCNT) dan serbuk tembaga (Cu) terhadap sifat konduktivitas listrik dan sifat mekanis material pelat bipolar berbasis nano komposit, terdapat dua macam diagram alir penelitian, yaitu diagram alir preparasi dan fabrikasi material pelat bipolar dan diagram alir karakterisasi dan pengujian material pelat bipolar. Diagram alir preparasi dan fabrikasi material pelat bipolar ditunjukkan pada gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3.1 Diagram alir preparasi dan fabrikasi material pelat bipolar.

Sementara diagram alir karakterisasi dan pengujian material pelat bipolar berbasis nano komposit 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 berbentuk apa saja yang ditetapkan oleh seorang peneliti untuk dipelajari sehingga diperoleh informasi tentang hal tersebut, kemudian ditarik kesimpulannya. Variabel penelitian memiliki peran yang penting dalam suatu penelitian, yaitu untuk mempersiapkan alat dan metode pengumpulan data, untuk mempersiapkan metode analisis 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.

Penjelasan terperinci mengenai ketiga macam variabel penelitian tersebut adalah sebagai berikut:

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. Penelitian pelat bipolar berbasis material komposit termoplastik untuk aplikasi PEMFC ini menekankan pada aspek desain material yang tepat sehingga dapat menghasilkan material pelat bipolar dengan konduktivitas listrik dan sifat mekanis yang baik. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini ada dua macam, yaitu fraksi volum penguat material *multi wall carbon nano tube* (MWCNT) dan fraksi volum serbuk tembaga (Cu).

3.2.2. Variabel Terikat

Variabel lainnya yang digunakan dalam penelitian ini adalah variabel terikat. Nama lain dari variabel terikat adalah variabel *output*, variabel efek, variabel terpengaruh, atau variabel tergantung. Secara umum, variabel terikat dapat didefinisikan sebagai variabel penelitian yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat karena adanya variabel bebas. Variabel terikat dari penelitian ini terdiri atas tiga macam, yaitu sifat konduktivitas listrik material pelat bipolar, sifat mekanis material 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 untuk mengkarakterisasi sifat konduktivitas listrik material pelat bipolar.
- Pengujian tarik (*tensile testing*) untuk mengkarakterisasi sifat mekanis material pelat bipolar.

- Pengujian tekuk (*flexural testing*) untuk mengkarakterisasi sifat mekanis material pelat bipolar.
- Pengujian nilai kerapatan massa atau *density* untuk mengkarakterisasi sifat fisik material pelat bipolar.
- Pengujian nilai porositas 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 bahan pengisi dalam material pelat bipolar berbasis komposit termplastik ini.
- Pengujian dengan menggunakan alat *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk menganalisa spektra infra merah gugus fungsi.

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. 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 Anhydride* (PP-g-MA),
- Fraksi volum antioksidan CN-CAT A215,
- Fraksi volum penguat serat karbon.

3.3. Formulasi Penelitian

Formulasi yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi tiga, yaitu formulasi F1, F2, dan F3. Formulasi material yang digunakan untuk memfabrikasi material pelat bipolar berbasis nano komposit ini ditentukan berdasarkan pertimbangan parameter nilai konduktivitas listrik dan densitas dari setiap bahan yang diperoleh baik dari data pada literatur atau spesifikasi yang dikeluarkan oleh produsen bahan. Komposisi material yang digunakan pada setiap formulasi penelitian untuk memfabrikasi material pelat bipolar berbasis nano komposit MWCNT/PP-Cu 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	%	28.8	28.3	27.5
	gram	57.6	56.6	55
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	0.5	1
Serbuk Cu	%	0.1	0.2	0.5
	gram	0.2	0.4	1
Total	%	100	100	100
	gram	200	200	200

3.4. Material

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 material pelat bipolar dan juga sebagai media transfer tegangan dari matriks menuju material penguat (*reinforcements*)^[19]. Penggunaan matriks polipropilen (PP) dalam fabrikasi 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* HI-10-HO yang merupakan polipropilen homopolimer^[20]. Produsen yang memproduksi polipropilen (PP) jenis adalah PT. Chandra Asri Petrochemical Tbk. Polipropilen yang digunakan dalam penelitian ini berwarna putih dan berbentuk butiran pelet. Secara umum sifat dari polipropilen (PP) yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut ini^[20]:

Tabel 3.2 Sifat Polimer *Trilene* HI-10-HO^[20]

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^[21]. 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.

3.4.3. Serat Karbon

Serat karbon merupakan salah satu jenis penguat yang digunakan dalam fabrikasi material pelat bipolar berbasis komposit termoplastik. Serat karbon merupakan jenis penguat yang dapat meningkatkan sifat mekanis dan juga sifat konduktivitas listrik dari material pelat bipolar. Hal ini dapat dicapai dengan mengontrol arah orientasi atau susunan dari serat karbon itu sendiri di dalam material pelat bipolar^[22]. Serat karbon yang digunakan dalam penelitian ini berwarna hitam dan berbentuk seperti rambut halus.

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^[23]. Grafit merupakan salah satu penguat karbon yang paling konduktif. Penggunaan grafit ini juga dapat meningkatkan sifat kemampuprosesan (*processability*) dari komposit termoplastik ini^[23]. 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^[23].

3.4.5. Anti-Oksidan CN-CAT A215

Penggunaan anti-oksidan ini berperan sebagai agen pencegah terhadap proses degradasi yang dapat dialami pelat bipolar, khususnya degradasi akibat temperatur tinggi pada proses fabrikasi^[19]. 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 3.3 di bawah ini:

Tabel 3.3 Spesifikasi Anti-Oksidan CN-CAT B215^[2]

Bentuk	Bubuk
Warna Serbuk	Putih
Warna Larutan	Bening
Komposisi	A 168 : 61,5% - 71,5% A1010 : Sisanya

3.4.6. MWCNT (*Multiwall Carbon Nano Tube*)

Penggunaan *Multi Wall Carbon Nano Tube* (MWCNT) dalam fabrikasi material pelat bipolar berbasis nano komposit ini didasarkan atas sifat dari CNT yang memiliki nilai konduktivitas yang tinggi dan sifat mekanisnya yang baik. Spesifikasi dari *Multiwall Carbon Nano Tube* (MWCNT) yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.4 di bawah ini:^[24]

Tabel 3.4 Spesifikasi *Multiwall Carbon Nano Tube* (MWCNT)^[24]

Jenis CNT	<i>Multiwall</i>
Diameter luar (<i>outer diameter</i>)	13-18 nm
Panjang (<i>length</i>)	1-12 um
Kemurnian MWCNT	> 99 wt%
Kandungan <i>Ash</i>	0 wt%
SSA	> 233 m ² /gram
Konduktivitas listrik	> 100 S/cm

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

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 3.5 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) – PUSPIPEK	

Tabel 3.5 Peralatan Preparasi Sampel Pengujian (lanjutan)

<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 sampel material pelat bipolar yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3.6 Peralatan Karakterisasi Sampel

Nama Alat	Spesifikasi	Foto Alat
<p><i>Four Point Probe Electrical Conductivity Instrument</i></p>	<p>Lab. <i>Fuel Cell</i> Pusat Penelitian Fisika LIPI Kawasan PUSPIPTEK</p>	
<p><i>Tensile Tester</i></p>	<p>Shimadzu Universal Testing Machine AGS-100kNG ASTM D3039 (Uji Tarik)</p>	
<p><i>Flexural Tester</i></p>	<p>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>JEOL/EO JSM 6390 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^[25]:

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^[26]. 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^[26]. Pada mesin ini, *chamber* pencampuran berada pada pelat kedua yang dapat dibersihkan untuk mendapat *master batch* hasil proses *hot blending*^[26]. Adapun kondisi operasi yang digunakan pada proses pencampuran panas (*hot blending*) ini adalah^[26]:

- 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^[45]:

1. Periksa apakah alat dalam keadaan siap untuk digunakan.
2. Penggunaan *mixer*:
 - Bukalah *valve* aliran udara pendingin pada saluran utama yang terletak pada dinding bawah *exhaust fan*.
 - Buka *valve* udara pendingin pada alatnya, yaitu pada perangkat *gear box* dengan memutar berlawanan arah jarum jam hingga udara keluar dari *nozzle* yang akan terdengar suara berdesis.
3. "ON" kan stop kontak *power* pada dinding di bagian bawah dan sekaligus "ON" kan juga stop kontak cabang yang berada di lantai sebanyak 2 buah stop kontak.

4. "ON" kan *power software* Rheocord 90 dengan menggunakan kuncinya yang diputar searah jarum jam sambil ditarik sedikit ke depan sampai lampu indikator menyala. Tunggu beberapa saat sampai layar monitor menampilkan menu.
5. Setelah menu tampil pada layar monitor, *cursor* akan berada pada posisi *set up*, maka:
 - Pindahkan posisi *cursor* ke posisi *calibration* kemudian *enter* dan tekan *yes*.
 - Tampilan menu *calibration* untuk *pressure* yang keseluruhannya menunjukkan angka nol, kemudian tekanlah *enter* satu per satu sampai angka terakhir.
 - Muncul tulisan "*red zero point*" secara berkedip-kedip, tunggu beberapa saat karena ini sedang berlangsung proses kalibrasi sampai kemudian muncul tulisan "*closed contact*" sesaat kemudian akan hilang dan proses kalibrasi telah selesai.
6. Pindahkan posisi *cursor* ke posisi *set up* kemudian *enter* lalu muncul menu "*identification*" dan tekan *enter*. Ketiklah identifikasi material yang akan diproses, jenis material, jenis aditif yang ditambahkan, persentase aditif, tanggal pelaksanaan *blending*, nomor NP dan nomor PK pada inisiasi pelaksana secara ringkas dan jelas. Jika telah selesai maka tekan *enter*.
7. Pindahkan posisi *cursor* ke posisi "*max time*" dan kemudian tekan *enter*.
 - Ketik waktu yang dibutuhkan untuk *blending*, yaitu 15 menit dan kemudian tekan *enter*.
 - Ketik *maximum torque*, yaitu level tertinggi pada grafik yang akan tampil dan kemudian tekan *enter*.
 - Ketik *total torque*, yaitu batasan maksimum untuk *safety* di mana jika *torque* telah mencapai angka tersebut maka *rotor* secara otomatis akan berhenti berputar dan kemudian tekan *enter*.
 - Ketik batasan maksimum untuk temperatur, yaitu sebesar 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 yang berada pada *loading tray* ke dalam *chamber* melalui *loading clute* secara perlahan sehingga tidak ada material yang tumpah ataupun tercecer.
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 seperti ini tentu saja akan sangat sukar untuk dilakukan proses pencetakan panas (*hot pressing*). Untuk mengatasi permasalahan ini maka produk hasil proses pencampuran panas (*hot blending*) harus mengalami proses *crushing* terlebih dahulu sebelum dilakukan proses pencetakan spesimen pengujian tarik dan pengujian tekuk dengan metode pencetakan panas (*hot pressing*). Produk hasil proses *crushing* ini berbentuk granula dengan berbagai variasi ukuran. Adapun tahapan kerja proses *crushing* bahan ini adalah sebagai berikut^[26]:

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 (*Hot Pressing*) dengan *Compression Moulding*

Setelah proses *crushing* selesai dilakukan untuk ketiga formulasi penelitian maka selanjutnya dilakukan proses pencetakan panas (*hot pressing*) dengan metode *compression moulding* untuk mencetak sampel pelat bipolar yang selanjutnya akan dilakukan pengujian tarik dan pengujian tekuk. Proses pencetakan panas (*hot pressing*) ini dilakukan di Sentra Teknologi Polimer (STP) dengan menggunakan mesin COLLIN P300P *Hydraulic Hot Pressing*. Proses pencetakan panas (*hot pressing*) dilakukan dengan memasukkan granula komposit hasil proses *crushing* ke dalam cetakan logam (*mold*) yang berbentuk lingkaran sehingga menghasilkan pelat lingkaran dengan diameter pelat 14 cm dan ketebalan ± 4 mm. Proses pencetakan panas (*hot pressing*) ini dilakukan melalui 5 fase dengan parameter temperatur proses, tekanan proses dan waktu proses yang berbeda untuk setiap fasenya. Parameter proses pencetakan panas (*hot pressing*) untuk semua formulasi adalah sama. Parameter proses pencetakan panas (*hot pressing*) untuk setiap fase dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3.7 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:

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

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

3.6.6. Preparasi Spesimen Pengujian Tekuk

Selain dilakukan proses preparasi spesimen pengujian tarik, material 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 material pelat bipolar berbasis komposit termoplastik ini terhadap mekanisme pembebanan lentur (*flexural loading*). Pada aplikasinya sebagai material 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 standar ASTM D790 untuk preparasi spesimen pengujian tekuk berbasis material plastik.

3.6.7. Conditioning Spesimen Pengujian Tarik dan Pengujian Tekuk

Setelah proses preparasi spesimen pengujian tarik dengan standar ASTM D3039 dan preparasi spesimen pengujian tekuk dengan standar 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*). Proses pengkondisian spesimen pengujian tarik dan spesimen pengujian tekuk ini dilakukan dalam suatu lemari pengkondisian (*conditioning chamber*) dengan parameter proses sebagai berikut:

Tabel 3.8 Parameter proses pengkondisian spesimen uji tarik dan uji tekuk

Parameter Proses	Nilai	Satuan
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 luruh (*yield strength*), modulus luruh (*yield modulus*), elongasi, dan lain sebagainya^[21]. Secara umum tujuan utama dilakukannya pengujian tarik terhadap suatu material adalah untuk menganalisa respon atau perilaku material pada saat mengalami pembebanan mekanis^[21].

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 material 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 3.9 di bawah ini:

Tabel 3.9 Parameter Proses Pengujian Tarik

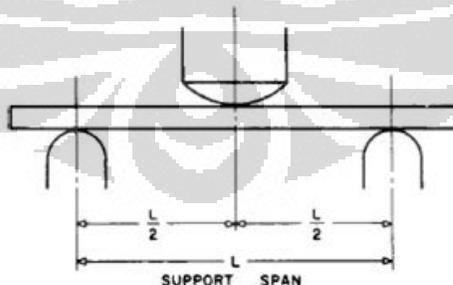
Parameter	Nilai
Temperatur Pengujian	23°C
Kelembaban Udara	62%

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

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

3.6.9. 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 3.3 di bawah ini menunjukkan skema pengujian tekuk dengan metode *three-point bending test*^[21].



Gambar 3.3 Skema Metode *Three-Point Bending Test*^[21]

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 standar ASTM D790 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 pelat bipolar ini adalah sebagai berikut^[44]:

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 atau kerapatan massa dapat dilakukan dengan menggunakan prinsip perbandingan massa material di udara dengan massa material di dalam air. Massa material di dalam air akan berbeda dengan massanya di udara akibat adanya gaya ke atas atau gaya Archimedes. Pengujian densitas dan porositas terhadap material pelat bipolar ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Kimia, Universitas Indonesia. Adapun prosedur atau tahapan kerja pengujian densitas dan porositas yang dilakukan terhadap material pelat bipolar adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan sampel material pelat bipolar yang akan diuji nilai densitasnya.

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

Dari hasil penimbangan tersebut maka massa sampel di air (M_a) adalah massa sampel di air dikurangi dengan massa kawat di air. Sedangkan nilai kerapatan massa sampel bisa diperoleh dari persamaan 3.1 berikut^[21]:

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

Sementara untuk menghitung nilai porositas hasil percobaan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut^[21]:

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

Dimana:

ρ teoritis = densitas teoritis (gr/cm³)

ρ percobaan = densitas percobaan (gr/cm³)

Nilai densitas teoritis dari sampel pelat bipolar ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan hukum campuran komposit 3.3 sebagai berikut^[27]:

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

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^[28,29]. Apabila nilai hambatan jenis dari suatu bahan diketahui maka nilai dari konduktivitas listrik bahan tersebut dapat dihitung.

Dalam pengujian dengan metode ini dimensi merupakan faktor yang sangat mempengaruhi hasil pengujian^[29]. Spesimen dibentuk sedemikian rupa hingga berbentuk persegi dengan panjang sisi 1cm. Proses pengampelasan terhadap permukaan spesimen uji juga merupakan faktor yang tidak kalah penting karena permukaan spesimen uji yang rata dan datar (*flat*) merupakan parameter yang harus dipenuhi dalam pengujian dengan metode ini^[29]. Berikut adalah tahapan kerja pengujian nilai konduktivitas listrik sampel bahan dengan metode *four point probe*^[29]:

1. Siapkan sampel pelat bipolar yang akan dilakukan pengujian nilai konduktivitas listrik dengan metode *four point probe* dan pastikan permukaan spesimen cukup rata dan datar.
2. Lakukan pengampelasan dengan *grid* halus terhadap permukaan spesimen hingga permukaannya benar-benar datar dan rata.
3. Ukur ketebalan spesimen dan catat hasilnya
4. Ukur diameter spesimen jika spesimen berbentuk lingkaran atau ukur panjang sisi spesimen jika spesimen berbentuk persegi panjang dan catat hasilnya.
5. Dengan menggunakan perekat *adhesive* berbasis *epoxy* rekatkan spesimen uji pada permukaan papan mika berbentuk persegi berukuran panjang sisi sekitar 10 cm.

6. Pastikan perekatan spesimen uji pada papan mika dilakukan secara perlahan sehingga menghasilkan kontak permukaan yang datar dan rata (*flat*).
7. Nyalakan perangkat *four point probe*.
8. Pilih 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 3 hasil pengujian.
16. Untuk mendapatkan nilai konduktivitas bahan maka dapat dilakukan dengan persamaan 3.4 sebagai berikut:

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

dimana:

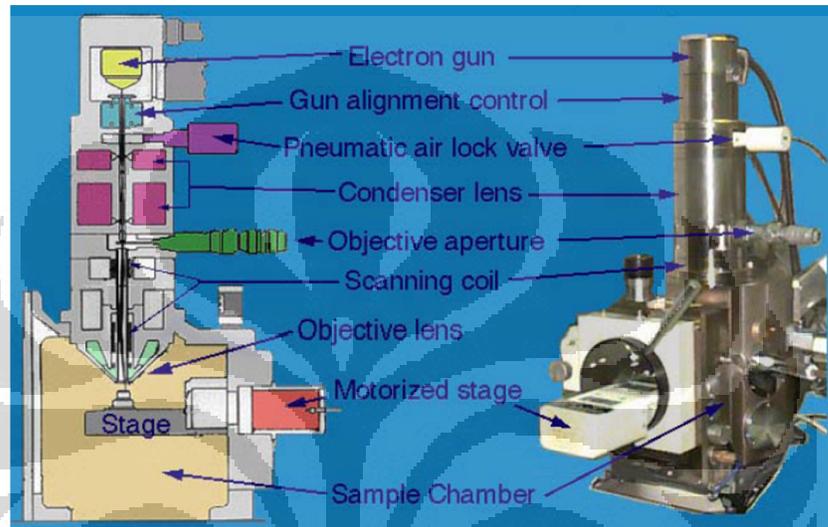
σ = Konduktivitas listrik bahan (S/cm)

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

17. Carilah 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 material pelat bipolar dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pengujian ini dilakukan di Lab.Uji Mekanik DTMM FTUI. Gambar 3.4 Scanning Electron Microscope (SEM) ^[30].



Gambar 3.4 Scanning Electron Microscope (SEM) ^[30]

Tujuan karakterisasi material 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 *Multiwall 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:

1. Lakukan preparasi sampel pelat bipolar yang akan dikarakterisasi dengan cara pemotongan sampel sehingga spesimen dapat dimasukkan ke dalam *speciment chamber* SEM.
2. Letakan spesimen uji di dalam 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 pelat bipolar.
6. Pengambilan gambar dilakukan pada beberapa titik untuk melihat kondisi morfologi permukaan 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)^[52]. 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 peat bipolar formula lainnya.

3.6.13. Karakterisasi Gugus Fungsi dengan FTIR

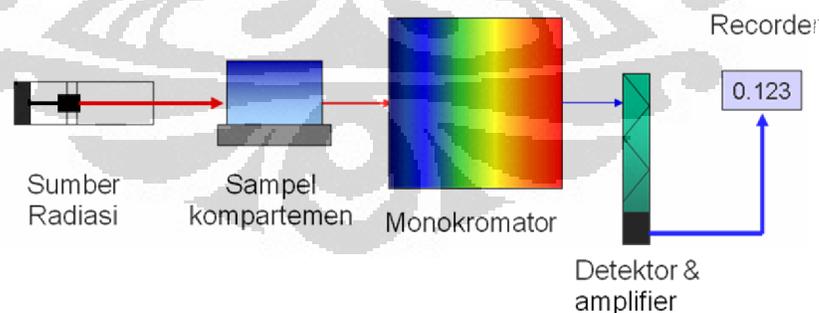
Sebagian besar senyawa yang memiliki ikatan kovalen, baik senyawa organik maupun senyawa anorganik, akan menyerap berbagai frekuensi radiasi elektromagnetik dalam daerah spektrum inframerah. Untuk tujuan kimia, akan tertuju pada bagian vibrasi dari daerah inframerah. Daerah ini terletak dalam panjang gelombang (λ) antara $2.5\mu\text{m}$ dan $15\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$). Daerah $0.8\text{-}2.5\mu\text{m}$ disebut inframerah dekat dan daerah $15\text{-}200\mu\text{m}$ disebut inframerah jauh^[31,32].

Molekul akan tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi bila molekul tersebut dapat menyerap radiasi inframerah. Penyerapan radiasi inframerah merupakan proses kuantisasi. Hanya frekuensi tertentu dari radiasi inframerah yang akan diserap oleh molekul. Penyerapan radiasi inframerah sesuai dengan perubahan energi yang memiliki orde dari 2 –

10KKal/mol. Radiasi dalam kisaran energi ini sesuai dengan kisaran frekuensi vibrasi rentangan (*stretching*) dan vibrasi bengkokan (*bending*) dari ikatan kovalen dalam kebanyakan molekul. Dalam proses penyerapan maka energi yang diserap akan menaikkan amplitudo gerakan vibrasi ikatan dalam molekul^[31,32].

Karena setiap tipe ikatan yang berbeda mempunyai sifat frekuensi vibrasi yang berbeda dan karena tipe ikatan yang sama dalam dua senyawa berbeda terletak dalam lingkungan yang sedikit berbeda, maka tidak ada dua molekul yang berbeda strukturnya akan mempunyai bentuk serapan inframerah atau spektrum inframerah yang tepat sama^[31,32].

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 panjang gelombang transmisi 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 yang mempengaruhi sifat konduktivitas dan sifat mekanisnya. Prinsip kerja FTIR dapat dilihat pada gambar 3.5 di bawah ini^[32].

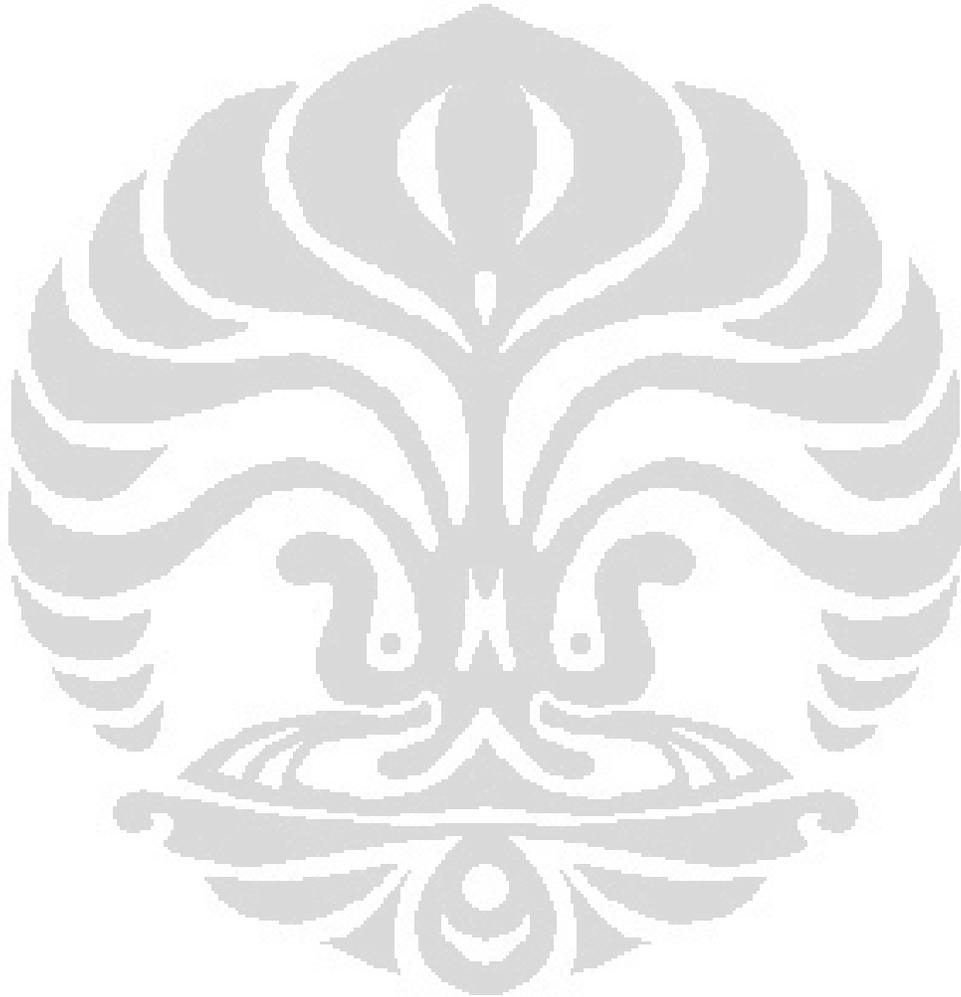


Gambar 3.5 Prinsip pengujian FTIR^[32]

Tahapan pengujian FTIR adalah sebagai berikut:

1. Timbang sampel pelat bipolar hasil crushing sebanyak 2.5 gram
2. Larutkan sampel tersebut di dalam larutan garam KBr

3. Masukkan sampel yang telah dilarutkan tersebut ke dalam *chamber* FTIR
4. Tutup *chamber*, lalu tembakkan sumber radiasi inframerah
5. Hasil *absorbance* dan transmittan dari radiasi inframerah dapat terlihat pada software di komputer



BAB 4

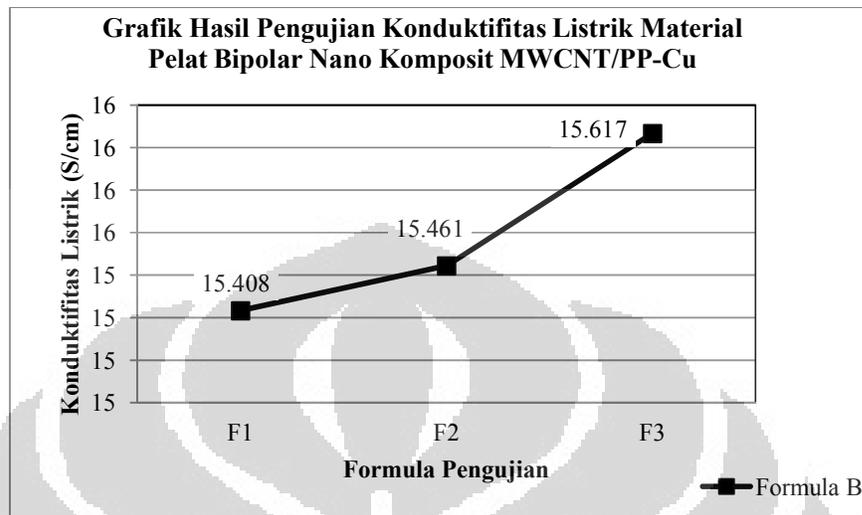
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT dan Cu 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. Material 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 material 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 $100 \text{ S/cm}^{[10]}$. Nilai konduktivitas listrik ini dapat dicapai dengan pemilihan material serta desain pemrosesan material yang tepat. Salah satu fokus utama dari penelitian ini adalah mengetahui efektivitas dari penambahan fraksi volum penguat MWCNT dan Cu terhadap peningkatan sifat konduktivitas listrik material pelat bipolar berbasis nano komposit MWCNT/PP-Cu.

Dari grafik pada Gambar 4.1, didapatkan nilai konduktivitas listrik tertinggi pada komposisi F1, yaitu $15,617 \text{ S/cm}$. Secara umum penambahan fraksi volum penguat MWCNT dan Cu dapat meningkatkan nilai konduktivitas listrik komposit MWCNT/PP-Cu^[4]. MWCNT pada sistem komposit MWCNT/PP-Cu berperan sebagai suatu penghubung yang membentuk saluran (*channeling path*) baru agar jalur aliran elektron (*electron path*) menjadi lebih banyak^[1,4]. Sistem komposit yang mengandung dispersi MWCNT mampu membentuk *conduction path* lebih banyak dari sistem komposit tanpa MWCNT^[4]. Akibatnya, elektron akan lebih mudah mengalir karena jalur yang terbentuk semakin banyak. Menurut penelitian sebelumnya^[1], derajat kristalinitas dari polimer dapat mempengaruhi dispersi

MWCNT yang berakibat pada besarnya nilai konduktivitas listrik dari material pelat bipolar^[1].



Gambar 4.1 Grafik perbandingan nilai konduktivitas listrik F1, F2, dan F3 material pelat bipolar

Polimer yang memiliki 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. Selain itu, MWCNT juga cenderung membentuk agregat dengan ikatan *Van der Waals* karena *compatibility* yang buruk dengan matriks polimer kristalin^[1,4]. Hal ini berbeda dengan polimer dengan derajat kristalinitas yang rendah (amorf) yang dapat menghasilkan dispersi MWCNT yang lebih merata tanpa adanya agregat^[1,4]. Dispersi MWCNT tanpa adanya agregat ini dikarenakan oleh adanya gaya adhesi yang lebih baik pada antarmuka *filler* dan matriks polimer. Umumnya polimer dengan struktur amorf juga mampu melapisi material-material konduktif seperti grafit secara seragam^[33].

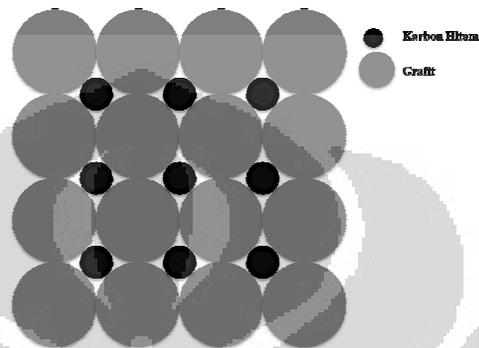
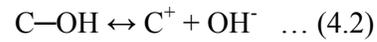
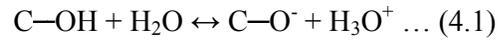
Polimer polipropilen yang digunakan dalam penelitian memiliki derajat kristalinitas medium sehingga struktur lamela yang terkandung dalam polimer tidak terlalu banyak dan MWCNT masih mampu terdispersi pada

matriks meskipun tidak sebaik dispersi MWCNT pada polimer dengan derajat kristalinitas rendah. MWCNT dalam matriks membentuk suatu *surface contact* antara MWCNT dan *filler* lain serta matriks polimer^[33]. Penambahan fraksi volum MWCNT sebesar 1% (2gram) meningkatkan *specific surface area* sebesar $\sim 466\text{m}^2$. Artinya, ada *surface contact area* seluas 466m^2 dalam tiap gram komposit. Fenomena ini memungkinkan *conduction path* meningkat sehingga konduktivitas pelat bipolar F2 dan F3 lebih tinggi dibandingkan F1. Gambar 4.3 dan 4.4 berturut-turut menjelaskan pengaruh derajat kristalinitas polimer terhadap konduktivitas listrik material pelat bipolar dan pengaruh dispersi MWCNT terhadap konduktivitas listrik material pelat bipolar.

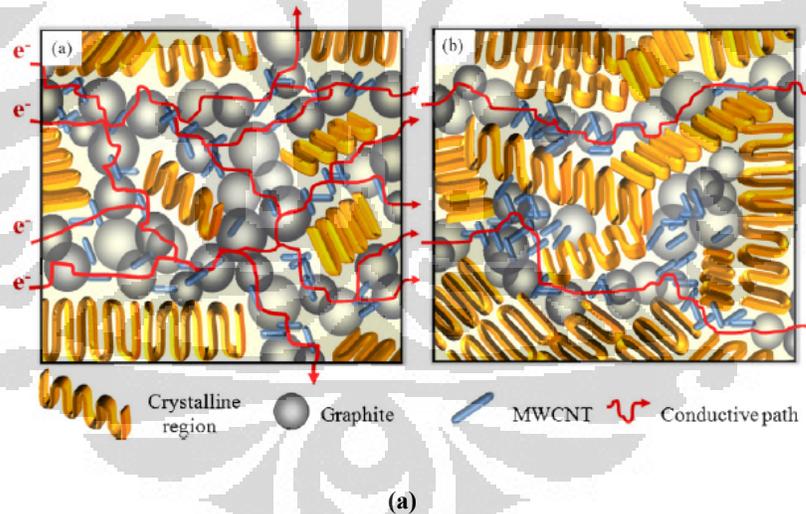
Cu dengan konduktivitas yang baik^[25], yaitu sebesar $5.96 \times 10^5 \text{ S/cm}$ meningkatkan nilai konduktivitas material pelat bipolar. Fenomena ini menyebabkan komposit dengan MWCNT dan Cu lebih tinggi memiliki konduktivitas yang lebih baik. Kehadiran partikel penguat *carbon black* juga berperan secara fisik dalam meningkatkan konduktivitas listrik material pelat bipolar.

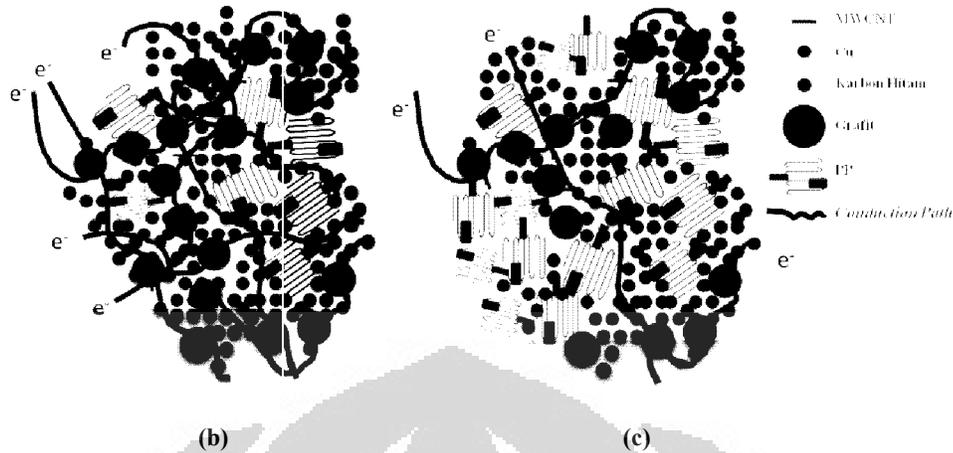
Carbon black merupakan *minor conductive filler* yang ditambahkan pada material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP-Cu dengan konduktivitas sebesar 4 S/cm ^[34]. *Carbon black* mampu mengisi celah antara berbagai *filler* yang terkandung dalam komposit^[34]. Ukuran partikel *carbon black* yang lebih kecil dari grafit memungkinkan partikel *carbon black* mengisi celah-celah diantara partikel grafit sehingga meningkatkan kepadatan material pelat bipolar yang berperan secara minor dalam meningkatkan jumlah *conduction path*^[35]. Hal ini dapat dijelaskan melalui gambar 4.3 dimana *carbon black* merubah daerah yang berongga menjadi daerah lebih padat dengan mengisi rongga tersebut sehingga luas daerah yang dapat menjadi alternatif *conduction path* meningkat^[35]. Partikel *carbon back* berukuran kecil menyebabkan dispersi *carbon black* dalam polimer matriks meningkat akibat dari adanya gugus karboksil (COOH) pada permukaanya^[34,36]. Persamaan 4.1 dan 4.2 menggambarkan skema terbentuknya gugus hidroksil pada permukaan

carbon black^[34,35]. Peran *carbon black* dalam sistem komposit MWCNT/PP-Cu dapat dilihat pada ilustrasi yang ada pada Gambar 4.2^[1,4].

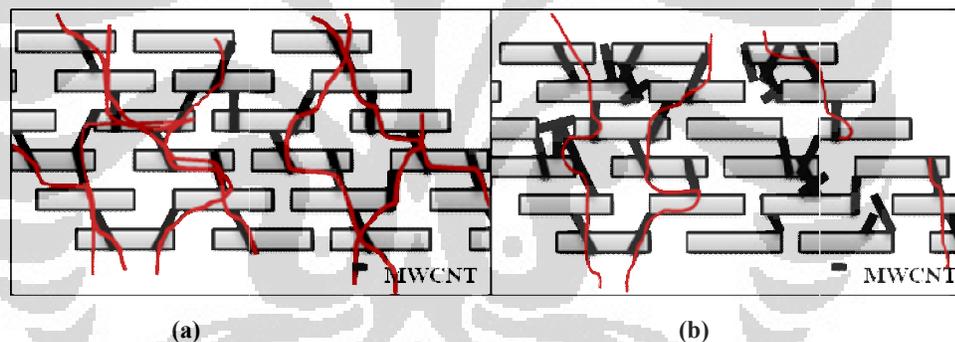


Gambar 4.2 Ilustrasi peran *carbon black* dalam mengisi celah pada sistem komposit^[1,4].





Gambar 4.3 Model *Conduction path* pada komposit bermatriks polimer (a) ilustrasi menurut penelitian sebelumnya^[1,4], dispersi MWCNT yang baik pada matriks PP dengan kristalinitas rendah (kiri) dan agregasi MWCNT pada matriks PP dengan kristalinitas tinggi (kanan), sedangkan (b) dan (c) ilustrasi *conduction path* pada sampel material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu pada *high cristalinity* dan *low cristalinity*.



Gambar 4.4 Ilustrasi *conduction path* pada komposit yang mengandung (a) MWCNT terdispersi sempurna pada matriks dan (b) MWCNT yang beragregat^[1,4].

Berdasarkan penelitian sebelumnya^[1,4], penambahan serat karbon pada material pelat bipolar berbasis nanokomposit MWCNT/PP-Cu dapat mengurangi resistivitas dari komposit sehingga didapat komposit bermatriks polimer yang konduktif. Peran serat karbon terhadap konduktivitas komposit bermatriks polimer bergantung pada konsentrasi serat serta orientasi serat dalam komposit^[37]. Dalam penelitian ini, orientasi serat karbon tidak menjadi fokus utama dalam meningkatkan nilai konduktivitas^[37]. Seperti halnya

carbon black, serat karbon dipakai sebagai minor *filler* dalam usaha mencapai nilai konduktivitas pelat material bipolar MWCNT/PP-Cu.

Grafit merupakan material dengan konduktivitas yang tinggi, yaitu 680 S/cm^[38]. Namun, grafit memiliki sifat getas yang akan menurunkan sifat mekanis komposit secara keseluruhan^[1,4]. Oleh karena itu, grafit yang dipakai hanya sepertiga dari jumlah *filler* secara keseluruhan. Penambahan fraksi volum grafit sebesar 27.5% mampu menghasilkan polimer yang konduktif tanpa mengorbankan *flexural strength* komposit.

Dari hasil yang didapatkan, dapat disimpulkan bahwa fraksi volum MWCNT sebesar 1% dan fraksi volum Cu sebesar 0.5% dalam sistem komposit bermatriks polipropilen mampu menghasilkan suatu sistem komposit yang memiliki formula F3, dengan konduktivitas sebesar 15,617 S/cm.

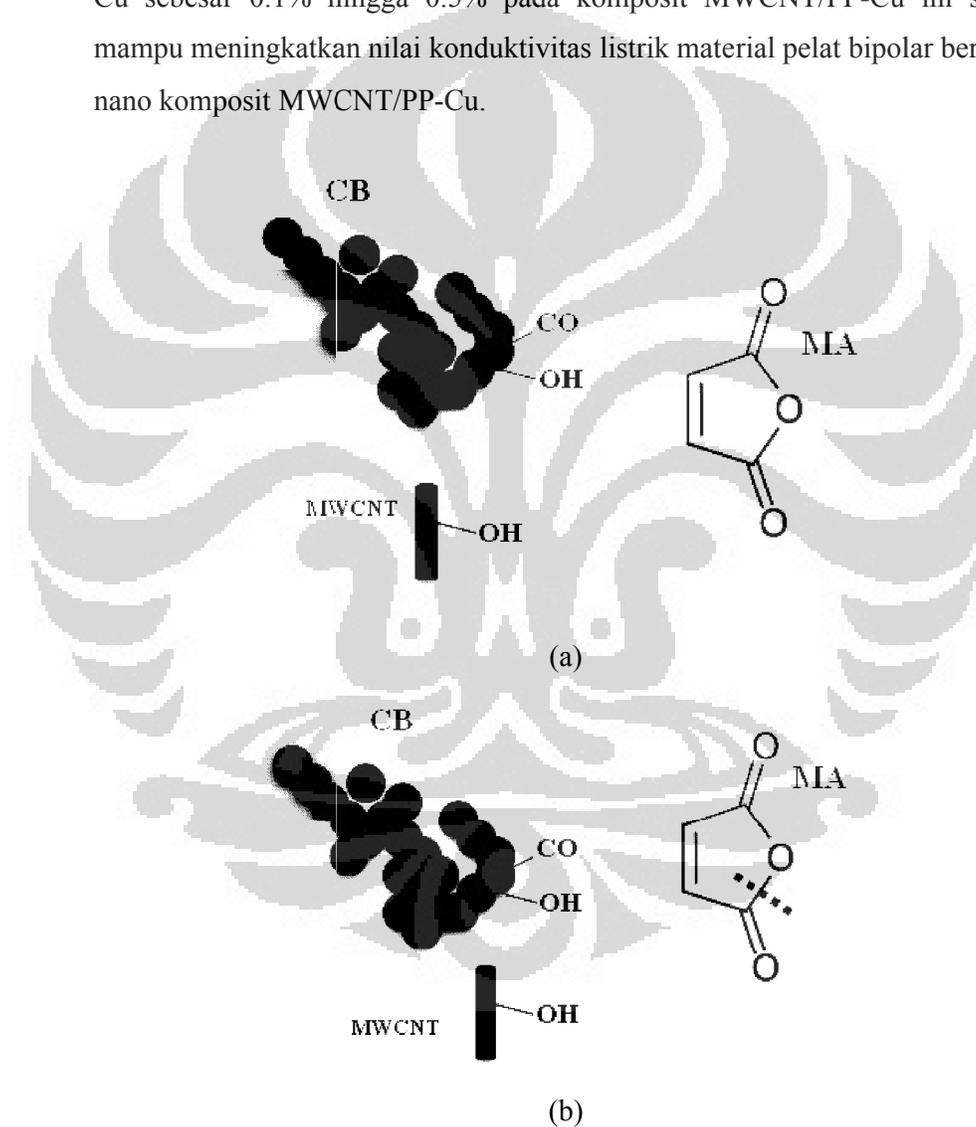
Nilai konduktivitas listrik material pelat bipolar pada penelitian ini masih di bawah target DOE USA yang mensyaratkan nilai konduktivitas minimum dari pelat bipolar adalah sebesar 100 S/cm^[10]. Hal ini dapat dijelaskan melalui suatu mekanisme yang dilustrasikan pada gambar 4.5.

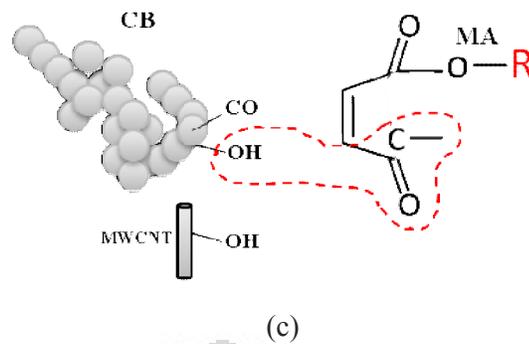
Pada gambar 4.5c, gugus MA (*Maleic Anhidride*) mengikat gugus hidroksil yang berada pada permukaan *carbon black*. Hal tersebut dikarenakan konsentrasi *carbon black* yang terkandung dalam komposit MWCNT/PP-Cu dibanding dengan MWCNT ialah 1:30 sehingga jumlah gugus hidroksil milik *carbon black* yang tersedia dalam sistem lebih banyak 30 kali untuk satuan luas permukaan yang sama.

MA (*Maleic Anhidride*) dalam komposit berfungsi sebagai *compatibility agent* yang berperan untuk mencegah MWCNT membentuk agregat dengan cara mengikat gugus hidroksil pada permukaan MWCNT sedangkan gugus PP-g- akan mengikat matriks polimer. Namun, dalam kasus ini, gugus hidroksil yang lebih banyak diikat oleh gugus MA (*Maleic Anhidride*) dari PP-g-MA adalah gugus hidroksil dari permukaan *carbon black* sehingga MWCNT berada dalam kondisi tidak terlapisi permukaanya

dan cenderung membentuk agregat akibat adanya gaya *van der waals*. Pengikatan gugus hidroksil oleh gugus MA (*Maleic Anhidride*) menghasilkan gugus ester dan karboksilat yang dikonfirmasi melalui pengujian FTIR. Grafik hasil pengujian FTIR yang menunjukkan adanya gugus ester dan karboksilat dapat dilihat pada gambar 4.18.

Jadi, fraksi volum MWCNT sebesar 0,1% hingga 1% dan fraksi volum Cu sebesar 0.1% hingga 0.5% pada komposit MWCNT/PP-Cu ini sudah mampu meningkatkan nilai konduktivitas listrik material pelat bipolar berbasis nano komposit MWCNT/PP-Cu.



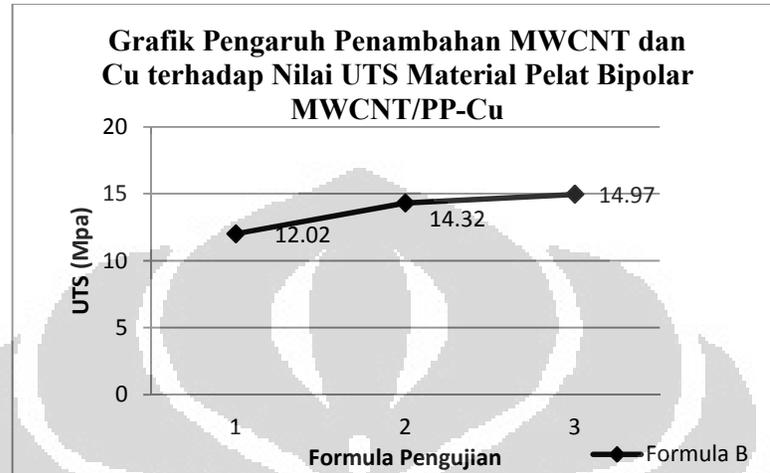


Gambar 4.5 Mekanisme pengikatan gugus hidroksil pada permukaan *carbon black* oleh gugus *maleic anhidride* akibat dari konsentrasi *carbon black* yang lebih banyak dari MWCNT. (a) gugus fungsi pada permukaan MWCNT dan *carbon black*, (b) pemutusan ikatan antara C dan O, dan (c) C_{α} memilih mengikat gugus hidroksil dari *carbon black* dibandingkan MWCNT.

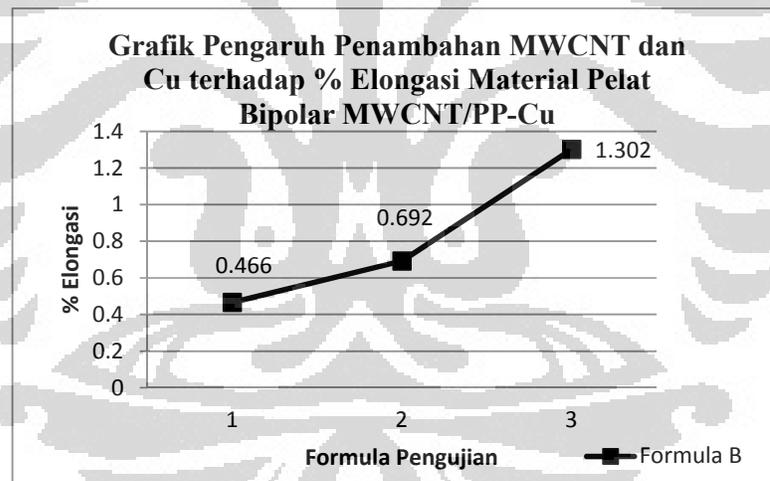
4.2 Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT terhadap Kekuatan Tarik dan % Elongasi Material Pelat Bipolar

Sifat mekanis material pelat bipolar merupakan parameter penting yang menentukan besar kekuatan material pelat bipolar untuk menerima pembebanan minimal hingga terjadinya deformasi plastis. Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui pengaruh % volum MWCNT dan Cu terhadap kekuatan tarik dan % elongasi komposit pelat bipolar MWCNT/PP-Cu. Pengujian dilakukan berdasarkan standar ASTM D3039. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Shu-Hang^[1,41], penambahan fraksi volum penguat berbasis karbon seperti MWCNT, serat karbon, karbon hitam (*carbon black*), dan grafit yang terdispersi sempurna dalam matriks polimer maka kekuatan mekanis dari material pelat bipolar berbasis komposit MWCNT/PP-Cu akan meningkat. Meningkatnya nilai tegangan material secara linear diimbangi dengan peningkatan nilai regangan (% elongasi) yang bergantung pada nilai gradien grafik kurva tegangan-regangan^[39,40]. Serat karbon merupakan sumber kekuatan mekanis yang utama dari material pelat bipolar bermatriks polimer^[37,41]. Kekuatan mekanis yang dipengaruhi oleh serat karbon antara lain kekerasan, *fracture toughness*, dan kekuatan tekuk. Pada penelitian ini, sifat mekanis dari komposit MWCNT/PP-Cu difokuskan pada penambahan fraksi volum MWCNT dan Cu, sedangkan % volum serat karbon tetap tiap

formula pengujian. Grafik pengaruh penambahan MWCNT dan Cu terhadap nilai UTS dan % elongasi material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu ditunjukkan oleh gambar 4.6 dan gambar 4.7.



Gambar 4.6 Grafik pengaruh penambahan MWCNT dan Cu terhadap nilai UTS material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu.

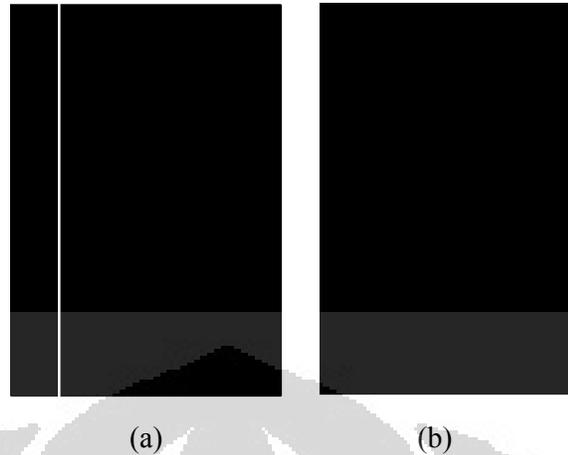


Gambar 4.7 Grafik pengaruh penambahan MWCNT dan Cu terhadap % elongasi material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu.

Dari penelitian yang telah dilakukan, data yang didapatkan menunjukkan bahwa penambahan MWCNT dan Cu dapat meningkatkan nilai UTS dan % elongasi pelat bipolar MWCNT/PP-Cu. Penambahan MWCNT tanpa modifikasi permukaan mampu meningkatkan nilai UTS dan % elongasi pelat bipolar Berturut-turut dari 12.02 MPa dan 0.466% pada penambahan

0.1% volum MWCNT dan 0.1% volum Cu menjadi 14.97 Mpa dan 1.302% pada penambahan 1% volum MWCNT dan 0.5% volum Cu. Dapat disimpulkan bahwa penambahan MWCNT tanpa modifikasi permukaan dan Cu dapat meningkatkan nilai UTS dan % elongasi material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu sebesar 24.5%. Namun, pengaruh MWCNT dan Cu pada nilai UTS dan % elongasi pelat bipolar MWCNT/PP-Cu tidak terlalu signifikan^[42].

Nilai UTS tertinggi yang mampu dicapai ialah sebesar 14.97 MPa. Tujuan utama penambahan MWCNT ialah untuk menghasilkan nilai kekuatan tarik komposit pelat bipolar yang baik. Namun, apabila MWCNT tidak dapat terdispersi sempurna dalam matriks polimer, distribusi tegangan dari matriks ke MWCNT menjadi tidak maksimal^[41,42]. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada sub bab 4.1, MWCNT yang tidak terdispersi sempurna pada matriks cenderung membentuk agregat dengan sesamanya akibat adanya gaya non-newton *van der waals*^[41]. Fenomena ini menyebabkan MWCNT dapat menjadi *stress concentration* pada sistem^[44]. Dengan kata lain, apabila semakin banyak agregat yang terbentuk, semakin banyak kemungkinan *stress concentration* pada sistem komposit pelat bipolar MWCNT/PP-Cu. Akibatnya, sistem tidak dapat mengakomodasi *stress concentration* yang ada sehingga saat diberikan beban, transfer tegangan menjadi terganggu dan material lebih cepat mengalami kegagalan dibandingkan komposit dengan distribusi MWCNT yang baik^[44]. Skema transfer tegangan pada komposit diilustrasikan pada gambar 4.8^[27].



Gambar 4.8 Ilustrasi *stress concentration* pada material material (a) tanpa pori dan (b) berpori^[27].

MWCNT memiliki kecenderungan untuk membentuk agregat dengan sesamanya akibat adanya gaya *van der waals* sehingga permukaan MWCNT perlu dimodifikasi menggunakan suatu pereaksi yang berfungsi sebagai *surface modifier*^[41]. Tanpa adanya *surface modifier*, interaksi antara MWCNT dan matriks polimer tidak akan maksimal bahkan MWCNT dapat menjadi *stress concentration* akibat ukurannya yang kecil dan memanjang, hal ini menyebabkan keberadaan MWCNT menjadi tidak menguntungkan dalam sistem komposit^[1,44]. Selain itu, polimer yang digunakan memiliki derajat kristalinitas medium. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada sub bab 4.1 bahwa MWCNT memiliki dispersi yang buruk pada area kristalin dan memiliki dispersi yang baik pada area amorf. Namun, efek dari penambahan MWCNT terhadap kekuatan tarik dan tentu saja % elongasi komposit MWCNT/PP-Cu tidak hanya ditentukan oleh ikatan antarmukanya, tetapi juga ditentukan oleh kekakuan dan sifat *high aspect ratio* MWCNT^[45]. Sedangkan, nilai % elongasi yang mampu dicapai dengan penambahan 1% MWCNT dan 0.1% Cu ialah 1.302%. Nilai % elongasi komposit material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu masih berada dibawah standar yang ditetapkan DOE 3% – 5%^[10].

DOE tidak mempersyaratkan nilai minimum untuk kekuatan tarik material pelat bipolar, akan tetapi, penelitian yang dilakukan oleh Shu-Hang^[1,4] menyebutkan bahwa *range* kekuatan tarik suatu komposit polimer

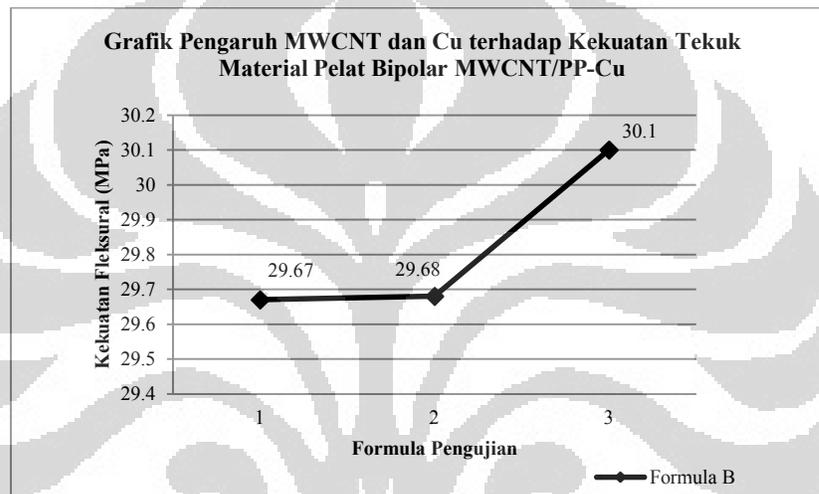
dengan penguat karbon umumnya rendah dan memiliki *range* antara 8 – 35 MPa untuk % volum *filler* 60-80%. Nilai komposit yang didapatkan pada penelitian ialah 12.02 MPa, 14.32 MPa, dan 14.97 MPa, nilai ini masih berada pada *range* tersebut namun sudah mendekati batas bawah.

4.3 Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT dan Cu Terhadap Kekuatan Tekuk Material Pelat Bipolar

Pengujian tekuk dilakukan untuk mengetahui ketahanan material pelat bipolar tersebut terhadap mekanisme pembebanan tekuk. Standar pengujian tekuk untuk material pelat bipolar ini adalah ASTM D790. Spesimen dikondisikan dalam suatu *conditioning chamber* pada temperatur 23°C dan kelembaban relatif sebesar 50% selama lebih dari 48jam untuk memberikan waktu relaksasi pada material. Pengujian tekuk (*flexural testing*) spesimen material pelat bipolar dilakukan dengan kecepatan penekanan, $v = t c$ (mm/menit) dimana t merupakan tebal material dan c bernilai 0.427. Pengujian tekuk (*flexural testing*) dilakukan dengan kondisi temperatur aktual sebesar 22°C dan kelembaban relatif sebesar 62%.

Kekuatan tekuk dari komposit MWCNT/PP umumnya meningkat dengan adanya material grafit karena grafit memiliki sifat yang lebih kaku dibanding matriks polipropilen^[46]. Karbon hitam, seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 4.1, merupakan *minor conductive filler* yang ditambahkan pada komposit material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu mampu mengisi celah atau *voids* antara berbagai *filler* yang terkandung dalam komposit^[1]. Adanya karbon hitam sebagai pengisi celah ini juga berperan dalam kenaikan pada nilai kekuatan tekuk komposit MWCNT/PP-Cu. Pada sub bab 4.2 telah disinggung bahwa serat karbon merupakan sumber kekuatan mekanis yang utama dari pelat bipolar bermatriks polimer^[41]. Kekuatan mekanis yang dipengaruhi oleh serat karbon antara lain kekerasan, *fracture toughness*, dan kekuatan tekuk. Pada penelitian ini, sifat mekanis dari komposit MWCNT/PP-Cu difokuskan pada penambahan fraksi volum MWCNT dan Cu, sedangkan, % volum serat karbon tetap tiap formula pengujian. Grafik pengaruh penambahan MWCNT dan Cu terhadap kekuatan tekuk material pelat bipolar

MWCNT/PP-Cu ditunjukkan oleh gambar 4.9. Apabila kompatibilitas MWCNT pada matriks baik, dan terbentuk suatu *interface bonding* antara MWCNT dan matriks polipropilen maka akan didapatkan suatu struktur *filler-polymer network* yang memungkinkan proses transfer beban dari matriks polimer ke MWCNT dan *filler* lainnya secara efisien^[47]. Oleh karena itu, material pelat bipolar berbasis nano komposit dengan kompatibilitas yang baik antara *filler* dan matriks polimer akan menghasilkan kekuatan tekuk yang baik^[44].

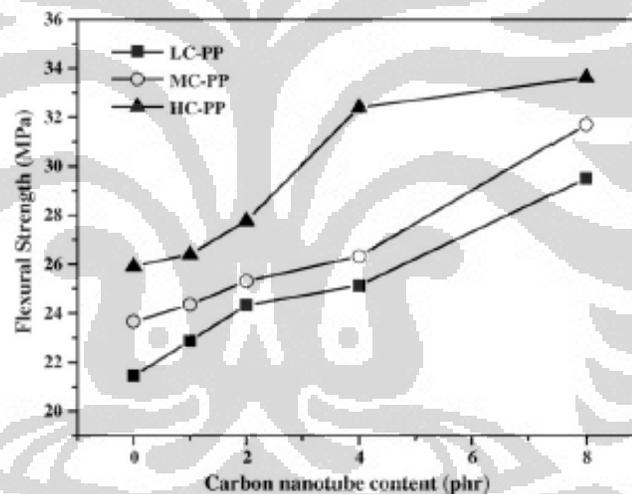


Gambar 4.9 Grafik Pengaruh MWCNT dan Cu terhadap kekuatan tekuk Pelat Bipolar MWCNT/PP-Cu.

Dari gambar 4.8 didapatkan nilai kekuatan tekuk tertinggi material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu ialah sebesar 30.1 MPa pada formula pengujian 3 yang mengandung fraksi volum MWCNT sebesar 1%. Menurut Gerhard^[3], sama halnya dengan konduktivitas listrik, kekuatan tekuk komposit dengan *filler* MWCNT umumnya meningkat seiring dengan penambahan MWCNT. Pada penelitian ini, kekuatan tekuk maksimum terjadi pada penambahan fraksi volum MWCNT sebesar 1%.

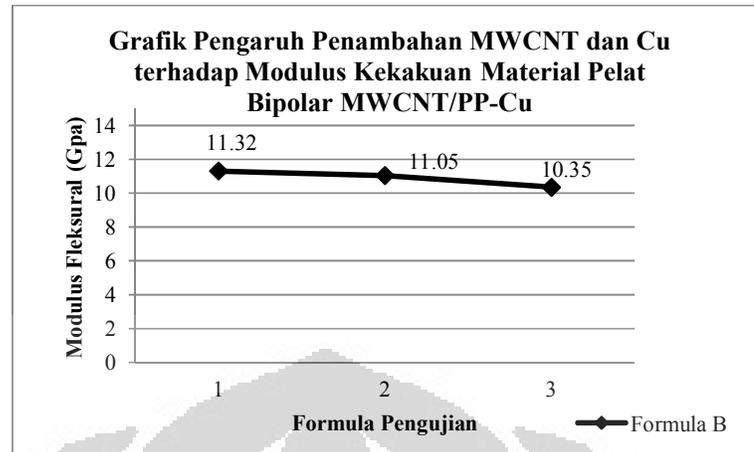
Secara umum, nilai kekuatan tekuk komposit material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu dipengaruhi banyak faktor, yaitu temperatur, orientasi molekul, dan derajat kristalinitas matriks. Temperatur tinggi akan meningkatkan elongasi, tetapi menurunkan kekuatannya. Polimer akan

merubah struktur molekulnya sehingga sifatnya yang kaku dan getas berubah menjadi lunak dan *ductile (softening)*^[48]. Disisi lain, hasil dari proses tertentu akan menentukan orientasi molekul. Proses *hot blending* dan *compression molding* akan memberikan orientasi molekul searah mesin (*machine direction*) yang sifatnya anisotropik dimana pada arah tersebut akan meningkatkan kuat tekuk^[49]. Sedangkan, semakin tinggi derajat kristalisasi akan meningkatkan kekuatannya karena keteraturan yang dimiliki memudahkan proses transfer tegangannya^[48]. Derajat kristalisasinya dapat diketahui melalui pengujian DSC (*Differential Scanning Calorimetry*), tetapi tidak dilakukan pada penelitian ini. Pengaruh penambahan fraksi volum penguat MWCNT terhadap nilai kekuatan tekuk komposit MWCNT/PP berdasarkan data pada literatur dapat dilihat pada gambar 4.10^[4].



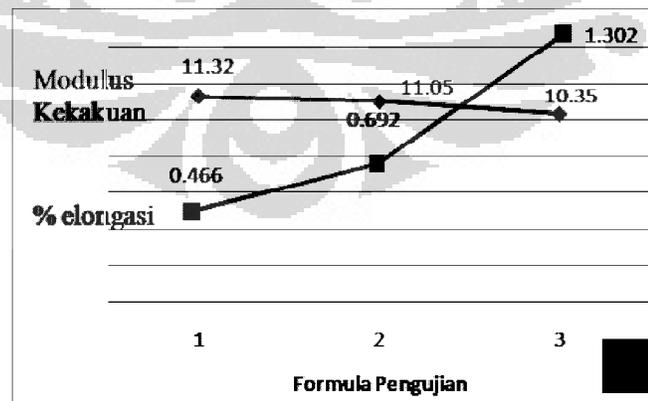
Gambar 4.10 Data literatur pengaruh MWCNT terhadap kekuatan tekuk material pelat bipolar^[4]

Selain memberikan informasi mengenai kekuatan tekuk, pengujian *flexural* juga memberikan informasi mengenai modulus kekakuan material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu. Nilai modulus kekakuan material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu dapat dilihat pada gambar 4.11. Dari gambar 4.11, nilai modulus kekakuan material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu menurun seiring dengan penambahan fraksi volum MWCNT dan Cu.



Gambar 4.11 Grafik pengaruh penambahan MWCNT dan Cu terhadap modulus kekakuan material pelat bipolar.

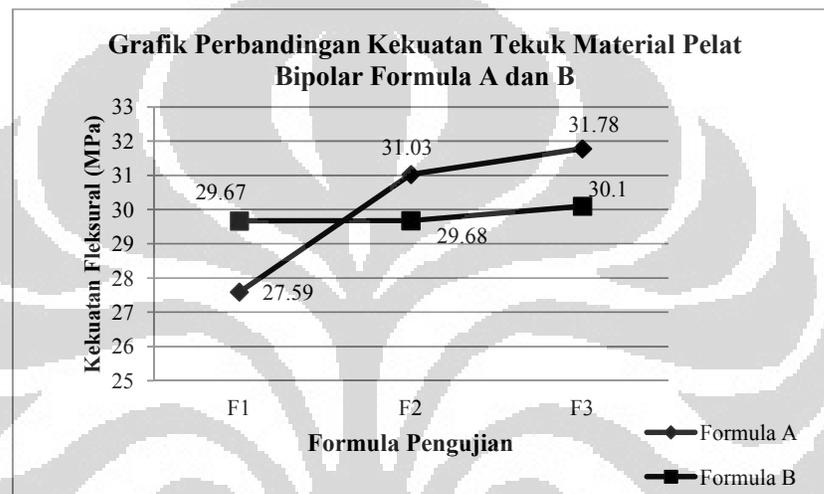
Penambahan fraksi volum penguat karbon dan Cu pada komposit MWCNT/PP-Cu menurunkan modulus tekuk komposit MWCNT/PP-Cu. Hal ini menunjukkan bahwa 0,1%–1% fraksi volum penguat MWCNT yang ditambahkan dalam komposit MWCNT/PP-Cu mampu menurunkan modulus tekuk komposit MWCNT/PP-Cu sehingga formula pengujian dengan % volum MWCNT lebih banyak memiliki sifat elastis yang lebih tinggi. Hal ini dikonfirmasi oleh hasil pengujian % elongasi material komposit MWCNT/PP-Cu yang meningkat dengan peningkatan % volum penguat MWCNT. Hubungan antara % elongasi dan nilai modulus kekakuan dapat dilihat pada gambar 4.12.



Gambar 4.12 Hubungan antara % elongasi dan nilai modulus kekakuan material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu berdasarkan hasil pengujian.

Tabel 4.1 Perbandingan Nilai Kekuatan Tekuk Komposit Pelat Bipolar MWCNT/PP Formula A dan B.

Kekuatan Tekuk		
Formula	A	B
F1	27.59	29.67
F2	31.03	29.68
F3	31.78	30.10



Gambar 4.13 Grafik perbandingan kekuatan tekuk material pelat bipolar formula A dan B.

Pada penelitian ini, didapatkan bahwa penambahan Cu tidak memiliki pengaruh terhadap kekuatan tekuk komposit MWCNT/PP-Cu. hal ini dikonfirmasi melalui pengujian tekuk material pelat bipolar dengan formula pengujian A (formula pengujian tanpa penambahan Cu). Pada pengujian formula A dan B tidak didapatkan perbedaan pola grafik kekuatan tekuk komposit pada gambar 4.13. Hal ini mengonfirmasi bahwa Cu tidak memiliki peran yang signifikan terhadap nilai kekuatan tekuk komposit. Data nilai komposit formula A dan B dapat dilihat pada Tabel 4.1. Secara keseluruhan, nilai kekuatan tekuk komposit pelat bipolar MWCNT/PP-Cu sudah memenuhi standar yang ditetapkan DOE, yaitu $>25\text{MPa}^{[10]}$.

4.4 Analisa Pengaruh Penambahan MWCNT dan Cu Terhadap Densitas dan Porositas Material Pelat Bipolar

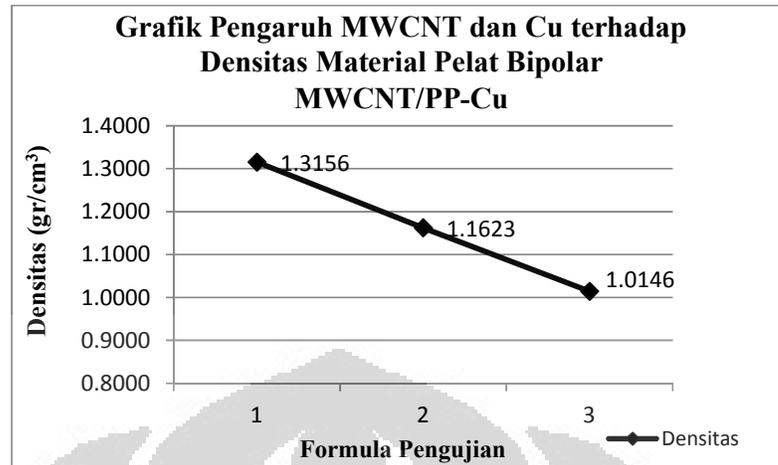
Salah satu parameter penting yang menentukan tingkat keberhasilan dari penelitian ini adalah reduksi berat dari material pelat bipolar. Reduksi berat pelat bipolar mutlak diperlukan agar dapat dihasilkan material pelat bipolar yang ringan sehingga *fuel cell* dapat disusun (*stacking*) dengan jumlah yang optimal dan menghasilkan *output* energi listrik yang lebih besar. Untuk mendapatkan material pelat bipolar dengan berat yang relatif ringan maka parameter yang dapat dijadikan tolak ukur adalah densitas material. Secara umum parameter densitas berbanding lurus dengan parameter berat. Semakin kecil nilai densitas suatu material maka berat dari material tersebut akan semakin kecil pula. Data densitas masing-masing bahan dapat dilihat pada tabel 4.2 dan data densitas teoritis komposit dapat dilihat pada tabel 4.3^[50].

Tabel 4.2 Data Literatur Nilai Densitas Bahan^[50]

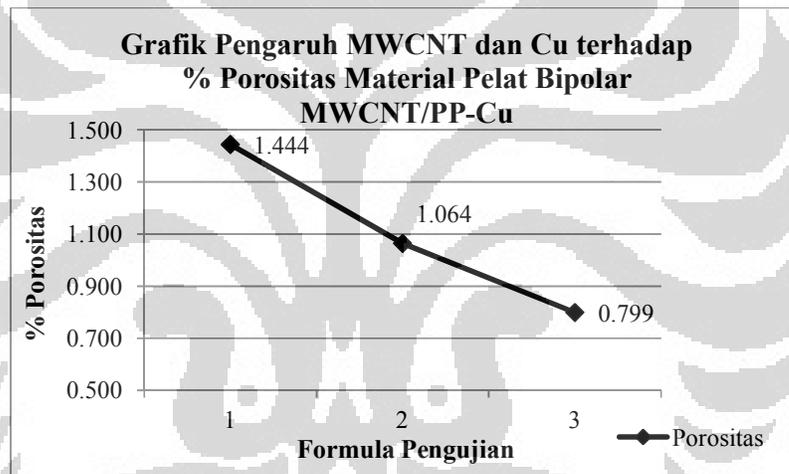
Bahan	Densitas (gram/cm ³)
Polipropilena	0.903
Serat Karbon Fortafile 243	1.75
Grafit 4012	1.26 - 1.69
<i>Carbon Black</i>	1.8 - 2
PP-g-MA	0.91
Anti Oksidan CN-CAT A215	0.85
CNT (<i>Multiwall</i>)	0.037
Cu	8.94

Tabel 4.3 Nilai densitas komposit pelat bipolar MWCNT/PP-Cu teoritis.

Formula Pengujian	Densitas
F1	1.3349
F2	1.1748
F3	1.0228



Gambar 4.14 Grafik pengaruh penambahan MWCNT dan Cu terhadap densitas material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu.



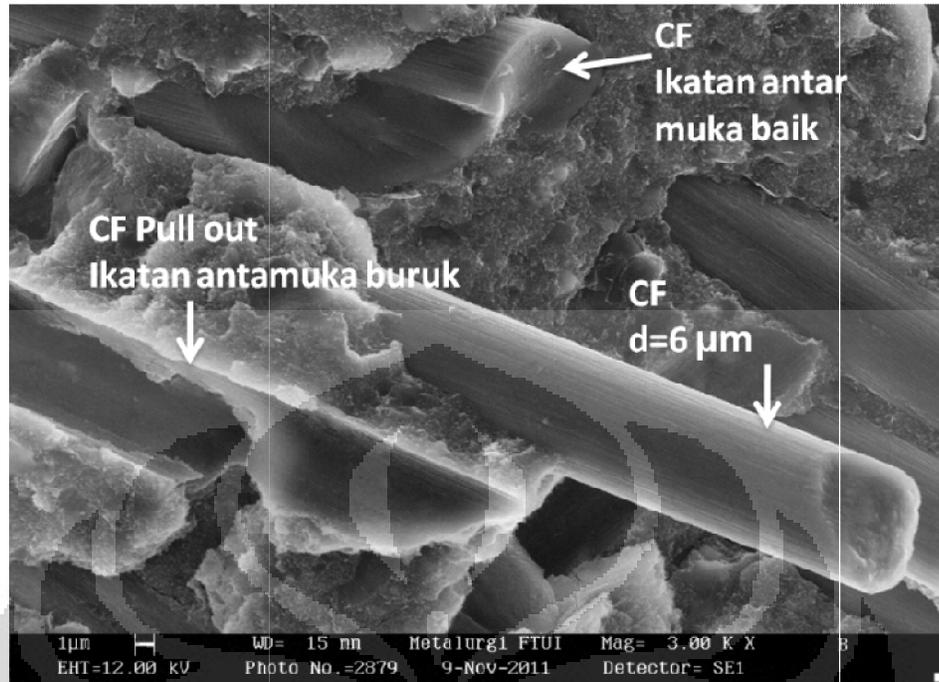
Gambar 4.15 Grafik Pengaruh MWCNT dan Cu terhadap porositas komposit pelat bipolar MWCNT/PP-Cu.

Berdasarkan hasil penelitian pada gambar 4.14 dan 4.15, penambahan fraksi volum penguat MWCNT dan Cu dapat menurunkan nilai densitas dan porositas komposit pelat bipolar MWCNT/PP-Cu. Nilai densitas dan porositas terendah material pelat bipolar adalah sebesar 1.0146 gr/cm³ dan 0.799% pada F3 dengan penambahan fraksi volum penguat MWCNT sebesar 1% dan Cu 0.5%. Dari hasil penelitian ini didapatkan kecenderungan nilai densitas material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu. Besarnya nilai densitas umumnya turun dengan penambahan partikel nano^[51]. Hal ini disebabkan oleh densitas material nano yang sangat kecil sehingga terjadi penurunan nilai densitas

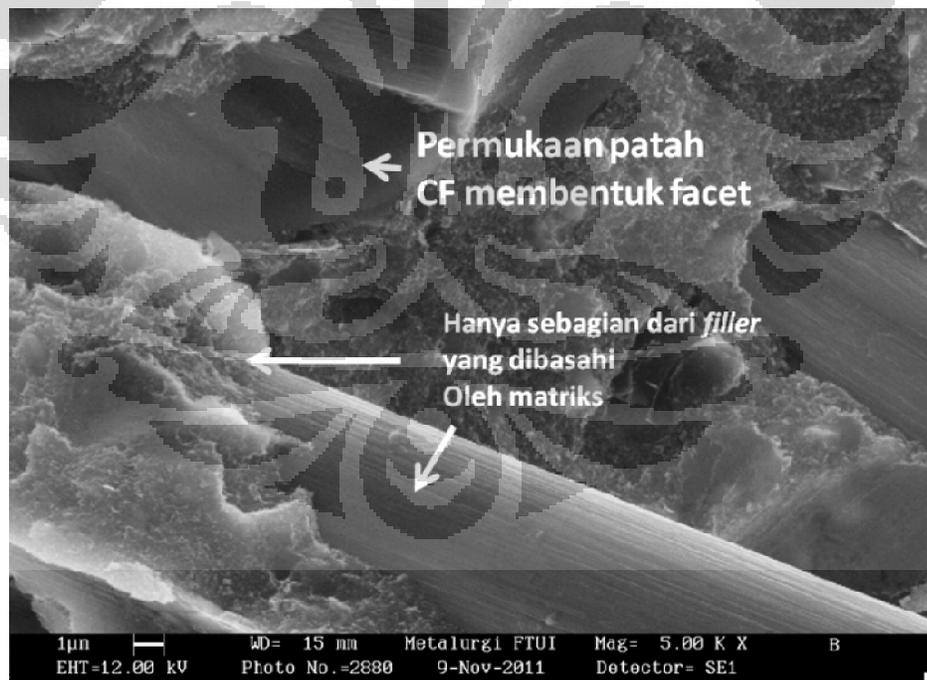
secara keseluruhan. Keuntungan lainnya, penambahan partikel nano dalam material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu mampu menurunkan porositas komposit secara keseluruhan. Fenomena ini terjadi akibat proses pengisian rongga atau celah-celah antar partikel yang baik oleh partikel nano^[52]. Proses reduksi porositas pelat bipolar juga dioptimalkan dengan menggunakan parameter proses yang baik. Parameter proses ini dipilih berdasarkan studi yang dilakukan oleh Yang dan Shi^[53], dalam penelitian tersebut, ditemukan bahwa parameter proses yang baik untuk *hot blending* dan *hot pressing*, parameter proses *hot pressing* ialah seperti yang tertera pada tabel 3.7. Pada proses pencetakan panas dilakukan dengan kondisi penekanan (*compressing*) yang bersiklik yang membuat proses penyatuan antara setiap bahan dapat terjadi lebih optimal. Proses pencampuran panas (*hot blending*) seluruh bahan dilakukan dalam dua tahap, yaitu 15 menit untuk tahap I yang berfungsi tahap pencampuran awal dan 5 menit untuk homogenisasi komposit. Secara umum nilai porositas yang diperoleh pada penelitian sudah mencapai target nilai porositas pelat bipolar PEMFC sesuai standar Departemen of Energi Amerika Serikat, yaitu sebesar $\leq 2\%$ ^[10].

4.5 Analisa Permukaan Patahan Material Pelat Bipolar

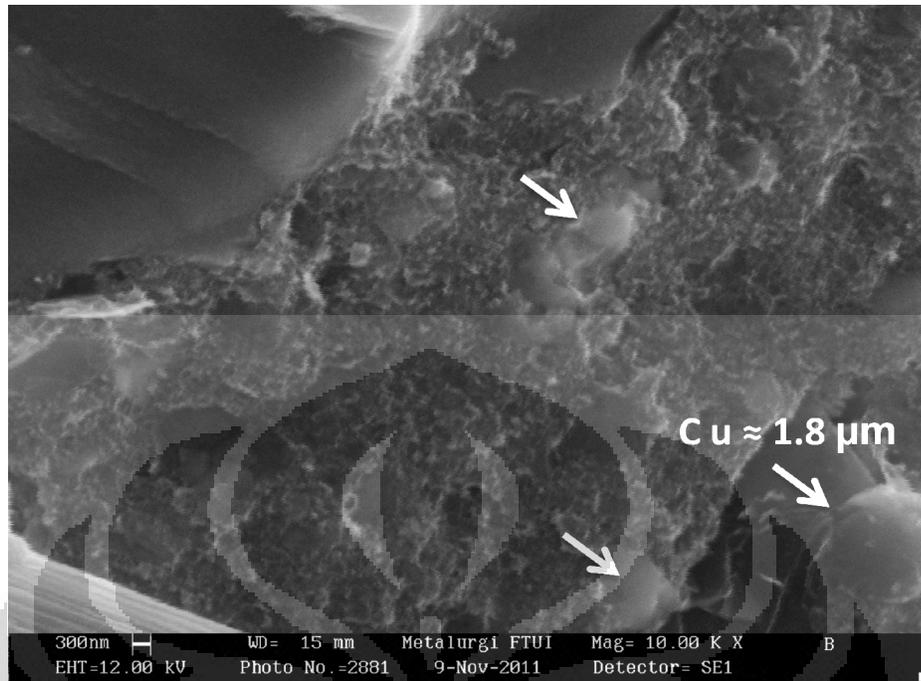
Permukaan patahan tekuk material pelat bipolar dianalisa dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil karakterisasi patahan tekuk material pelat bipolar berupa SEM *micrograph*. Pengamatan permukaan patahan tekuk dengan SEM hanya dilakukan pada F3. Pemilihan F3 dikarenakan formula tersebut menunjukkan nilai tertinggi dalam pengujian sifat mekanis. Selain menganalisa permukaan tekuk, dilakukan analisa komposisi mikro permukaan patahan tekuk F3 dari material pelat bipolar dengan menggunakan EDS. Gambar permukaan patahan tekuk dan hasil analisa mikro F3 dari material pelat bipolar menggunakan Sem dapat dilihat pada gambar 4.16, sedangkan gambar *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT) dari material pelat bipolar menggunakan HRSEM dapat dilihat pada gambar 4.17.



(a)



(b)

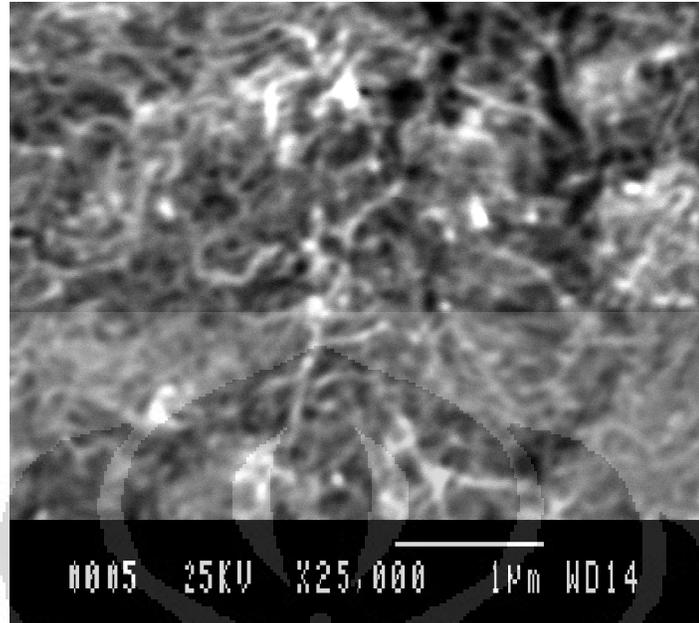


(c)



(d)

Gambar 4.16 Permukaan patahan tekuk sampel F3 yang diamati menggunakan SEM pada perbesaran (a) 3000x, (b) 5000x, (c) 10000x, dan (d) hasil EDS permukaan area (c).



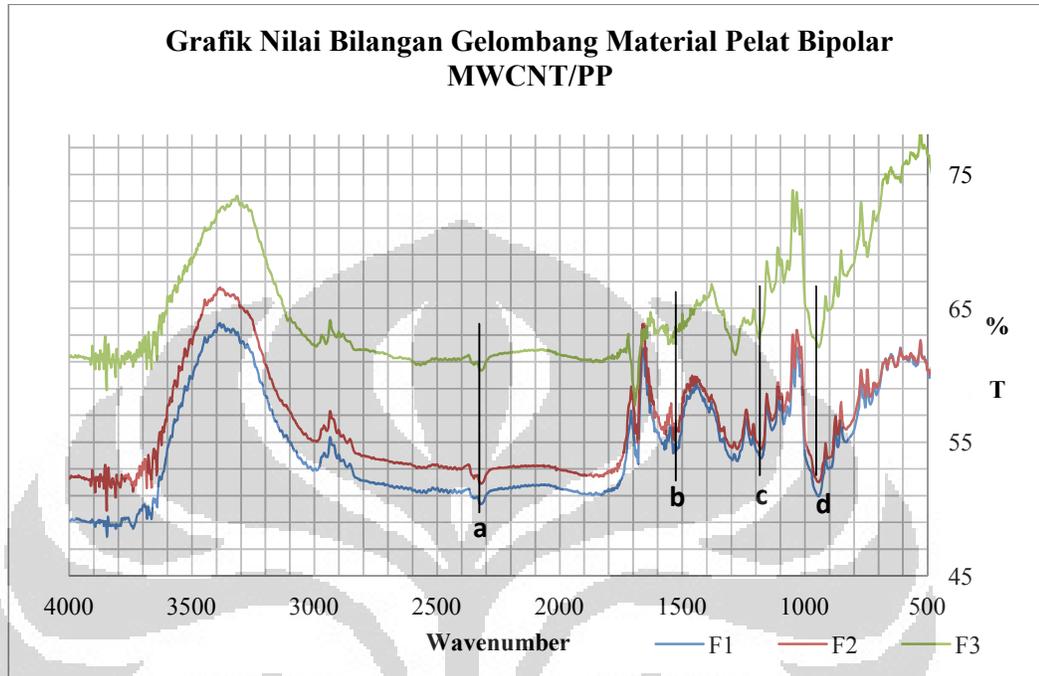
Gambar 4.17 Analisa serbuk MWCNT menggunakan HRSEM.

Berdasarkan gambar 4.16 (a), didapatkan informasi bahwa antarmuka bahan pengisi dengan matriks cukup baik, meskipun pada beberapa bagian bahan pengisi yang tidak terlapisi. Berdasarkan penelitian sebelumnya^[44], bila rasio volum matriks dan bahan pengisi kecil, umumnya akan ada daerah bahan pengisi yang tidak terlapisi. Sehingga akan terjadi *pull out* atau bahan pengisi tercabut dari matriksnya akibat ikatan yang tidak kuat pada antarmukanya (Gambar 4.16b). Permukaan patah bahan pengisi terlihat membentuk *facet* yang mengindikasikan jenis perpatahan *brittle* (Gambar 4.16b). Gambar 4.16c menunjukkan bahwa Cu dalam komposit pelat bipolar MWCNT/PP-Cu terdispersi dengan baik pada matriks dan tidak ditemukan indikasi Cu yang beragregat. Gambar 4.17 menunjukkan agregat dari MWCNT yang permukaannya tidak dimodifikasi dengan menggunakan HRSEM.

4.6 Analisa Gugus Fungsi Material Pelat Bipolar

Analisa gugus fungsi dengan menggunakan metode FTIR dilakukan untuk mengkonfirmasi jenis ikatan yang terjadi setelah proses *hot blending* serta memberikan informasi tentang apa yang terjadi pada masing-masing

komponen yang ditambahkan dalam suatu sistem komposit. Hasil pengujian gugus fungsi tersebut dapat dilihat pada 4.18.



Gambar 4.18 Hasil pengujian FTIR formula 1, 2, dan 3 material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu.

Tabel 4.4. Daftar gugus fungsional yang terdapat didalam komposit^[54].

Label	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi
a	2300, 2320.37, 2322.29	As. karboksilat dari <i>carbon black</i>
b	1680	C=C dari MWCNT
c	1282, 1276	As. karboksilat, ester, anhidrat, -OH
d	943.19	Alkena dari PP

Gambar 4.18 memberikan informasi bahwa bilangan gelombang 1680 ditemukan pada ketiga formula pengujian, seperti yang tertera pada tabel 4.4^[54], bilangan gelombang 1680 merupakan bilangan gelombang C=C alkena yang merupakan gugus fungsi dari material MWCNT. Sedangkan pada bilangan gelombang 943.19 juga terdapat *peak* yang menandakan adanya

gugus alkena, namun, gugus alkena dengan bilangan gelombang 943.19 merupakan gugus yang berasal dari material polipropilen^[54]. Adanya gugus asam karboksilat (COOH), ester (COO-R), anhidrat, -OH pada rentang bilangan gelombang 1276–1282 yang ditemukan dalam ketiga formula komposit MWCNT/PP-Cu menunjukkan bahwa terjadi reaksi antara PP-g-MA dengan gugus hidroksil. Gugus karboksilat dan gugus ester tersebut merupakan gugus yang dihasilkan dari proses pengikatan MA (*Maleic Anhydride*) dengan gugus hidroksil^[54]. Proses pengikatan gugus MA dan gugus hidroksil terdapat pada gambar 4.5 dalam pembahasan sub bab 4.1. Pada rentang *wavenumber* tersebut juga masih ditemukan gugus hidroksil dan gugus anhidrit yang mengindikasikan bahwa tidak semua gugus hidroksil pada sistem komposit MWCNT/PP-Cu terikat oleh gugus MA dari PP-g-MA. Dengan adanya gugus-gugus tersebut pada ketiga sampel material pelat bipolar maka dapat disimpulkan bahwa proses dispersi antara matriks polimer polipropilen dengan berbagai penguat karbon tidak optimal. Artinya, perlu dilakukan modifikasi dalam proses pembuatannya. Hal ini ditandai dengan masih adanya gugus anhidrat yang berasal dari PP-g-MA dan gugus O-H dari penguat karbon yang belum terikat. Selain itu, ditemukan juga hasil pengikatan gugus anhidrat dengan gugus -OH yang menghasilkan gugus fungsi ester dan asam karboksilat. Hasil pengujian FTIR ini mendukung beberapa teori pada pembahasan di sub bab sebelumnya, yaitu PP-g-MA yang digunakan tidak berfungsi secara optimal sehingga sifat konduktivitas listrik maupun sifat mekanis material pelat bipolar MWCNT/PP-Cu tidak maksimal. Selain itu, didapatkan kesimpulan bahwa MWCNT tidak terdispersi sempurna dalam matriks yang memiliki derajat kristalinitas medium.

BAB 5 KESIMPULAN

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 *multiwall carbon nano tube* (MWCNT) dan tembaga (Cu) memiliki pengaruh yang cukup signifikan dalam meningkatkan sifat mekanis dan sifat konduktivitas listrik material pelat bipolar berbasis nano komposit MWCNT/PP-Cu.
2. Nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) tertinggi adalah sebesar 14.97 MPa pada F3. Nilai UTS terendah adalah sebesar 12.02 MPa pada F1.
3. Nilai elongasi tertinggi adalah sebesar 1.302% pada F3. Nilai elongasi terendah adalah sebesar 0.466% pada F1.
4. Nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) tertinggi adalah 30.1 MPa pada F3. Nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*) terendah adalah sebesar 29.67 MPa pada F1. Nilai kekuatan tekuk yang dimiliki oleh pelat bipolar untuk ketiga formula penelitian sudah memenuhi target kekuatan tekuk yang harus dimiliki oleh pelat bipolar PEMFC sesuai dengan target DOE, yaitu minimum 25 MPa.
5. Nilai modulus elastisitas tertinggi adalah sebesar 11.32 GPa pada F3. Nilai modulus elastisitas terendah adalah sebesar 10.35 GPa pada F1.
6. Nilai densitas terendah adalah sebesar 1.0146 gram/cm³ pada F3 dan nilai densitas tertinggi adalah sebesar 1.3156 gram/cm³ pada F1.
7. Nilai porositas terendah adalah sebesar 0.799% pada F3. Nilai porositas tertinggi adalah sebesar 1.444% pada F1.
8. Nilai konduktivitas listrik tertinggi adalah sebesar 15.617 S/cm pada F3. Nilai konduktivitas listrik terendah adalah sebesar 15.408 S/cm
9. PP-g-MA yang berperan sebagai *compatibilizer* dalam nano komposit MWCNT/PP-Cu belum dapat menjembatani ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) secara optimal akibat tidak adanya modifikasi pada permukaan bahan pengisi.

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. Polipropilena (PP) yang dijadikan sebagai matriks dalam pembuatan material komposit MWCNT/PP-Cu harus memiliki nilai derajat kristanilitas yang rendah sehingga mampu membentuk lebih banyak *conductive path* yang berperan sebagai jalur penghantar pergerakan elektron dalam material komposit MWCNT/PP-Cu yang pada akhirnya akan meningkatkan nilai konduktivitas listrik dari material pelat bipolar.
2. Fraksi volum penguat grafit yang digunakan dalam pembuatan komposit PP/karbon harus ditingkatkan sebagai partikel konduktif yang dapat membentuk *conductive path* sehingga dapat meningkatkan konduktivitas listrik material pelat bipolar.
3. Diperlukan adanya modifikasi permukaan MWCNT agar partikel dapat terdispersi secara sempurna pada matriks PP.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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.
- [2] R.A. Antunes. 2010. Hydrogen Energy 35, 3632–3647.
- [2] Sutoni. 2010. *Studi Pengaruh Penambahan Fraksi Volum Penguat Carbon Nano Tubes (CNT) dan Tembaga (Cu) Terhadap Sifat Mekanis dan Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar Berbasis Nano Komposit PP/C-CNT*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] R Chris and S Scott, *Introduction to Fuel Cell Technology* (Notre Dame: U.S.A Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame, May 2003)
- [6] J. Larminie, A.L. Dicks. 2000. *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley, New York, 308.
- [7] EG & G Services Parsons Inc. 2004. *Fuel Cell Handbook 7th Edition* (West Virginia: U.S. Department of Energy).
- [8] Grove, William Robert. 1842. *on a Gaseous Voltaic Battery*. Philosophical Magazine and Journal of Science vol. XXI, 417-420.
- [9] Dwi Kuncoro, Dhanar. *Simulasi Proton Exchange Membrane Fuel Cell*. Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- [10] U.S. Department of Energy. 2011. *Comparison of Fuel Cell Technologies*. Energy Efficiency and Fuel Cell Technologies Program.
- [11] Bimanyu, Taufik Arya. 2009. *Pengaruh Penambahan Tembaga Terhadap Sifat Mekanik Dan Konduktivitas Pelat Bipolar Komposit PP/C-Cu*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.

- [12] J. M. King dan M. J. O'Day. 2000. *Applying fuel cell experience to sustainable power products*. Journal of Power Sources 86, 16 – 22.
- [13] D. P. Davies, et al. 2000. *Bipolar plate materials for solid polymer fuel cells*, Journal of Applied Electrochemistry 30, 101 – 105.
- [14] K.S. Dhathathreyan and N. Rajalakshmi, *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*. Journal of Fuel Cell.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] L. Du, S.C. Jana. 2007. J. Power Sources 172, 734.
- [18] H.C. Kuan, C.C.M. Ma, K.H. Chen, S.M. Chen. 2004. J. Power Sources 1347.
- [19] Agustinus, Sumadi. 2010. *Kuliah Material Polimer*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [20] Material Polimer HI-10-HO. <http://www.chandra-asri.com>, diakses pada 14 November 2011.
- [21] Callister, William D. 2007. *Materials Science and Engineering: An Introduction 7th Edition*. John Wiley & sons, Inc.
- [22] D. Hull and T.W. Clyne. 1996. *An Introduction to Composite Materials, 2nd edition*. Cambridge University Press, New York.
- [23] M. Szczepanik, J. Stabik, M. Łazarczyk. *Influence of graphite on electrical properties of polymeric composites*. Institute of Engineering Materials and Biomaterials, Silesian University of Technology.
- [24] Carbon Nano Tube (CNT). <http://cnt-cnt.org/carbonnanotubes>, diakses tanggal 13 Desember 2011 pukul 13.00 WIB.

- [25] Laboratorium Metalurgi Kimia. 2010. *Standar Operasional dan Prosedur (SOP) Penimbangan Zat*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [26] Laboratorium Teknik Kimia. 2011. *Standar Operasional dan Prosedur (SOP) Penggunaan Rheomix Haake Haake PolyDrive 3000*. Institut Teknologi Indonesia (ITI), Serpong.
- [27] Zulfia, Anne. 2010. *Kuliah Material Komposit*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [28] P. Schuetze, Andrew. 2002. *A Laboratory on the Four-Point Probe Technique*. Edgewood Academy, San Antonio, Texas.
- [29] Laboratorium Fuel Cells. 2011. *Buku Petunjuk Penggunaan Instrumen Four Point Probe*. Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). Serpong.
- [30] Carbon Nanotubes: Potential Benefits and Risks of Nanotechnology in Nuclear Medicine. 2007. The Journal of Nuclear Medicine (JNM). <http://jnm.snmjournals.org/content/48/7/1039/F1.expansion.html> diakses tanggal 14 Desember 2011 pukul 18.34 WIB.
- [31] Saptono, Rachmat. 2009. *Kuliah Karakterisasi Material 1*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [32] Nurjaya, Dwi Marta. 2010. *Kuliah Karakterisasi Material 2*. Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.
- [33] M. Keizo, W. Kiyosi, J. Eiichiro, A. Hiromi, S. Masao, I. Kinzo. *Electrical conductivity of carbon-polymer composites as a function of carbon content*. Journal of Materials Science 6 (2004) 1610-1616.
- [34] Paul Palumbo. *Surface Modification of Carbon Black*. Boston: Cabot.
- [35] M. L. Gonzá'lez-Martí'n, *Determination of the Carbon Black Surface Free Energy Components from the Heat of Immersion Measurements*. Departamento de Fís'ica, Universidad de Extremadura.
- [36] *Carbon Black: A users guide*. USA: International Carbon Black Association.
- [37] P.B. Jana, A.K. Mallick, S.K. De. *Electrically conductive rubber and plastic composites with carbon particles or conductive fibres, Short fibre-polymer composites*. Cambridge: Woodhead (1996) 168-191.

- [38] N. Chauhan, R.K. Seth, R.B. Mathur, *CNTs nanostructuring effect on the properties of graphite composite bipolar plate*. Carbon Technology Unit, Engineering Materials Division, National Physical Laboratory, CSIR, Dr. K. S. Krishnan Marg, New Delhi 110 012 India.
- [39] A. Boczkowska, J. Kapuciski, Z. Lindemann. *Composites*. Warsaw, OWPW, 2003 (in Polish).
- [40] J. Stabik, A. Dybowska. *Methods of preparing polymeric gradient composites, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 25/1 (2010) 67-70.
- [41] N.J. Lee, J. Jang, M. Park, C.R. Choe. *Characterization of functionally gradient epoxy/carbon fibre composite prepared under centrifugal force*. Journal of Materials Science 8 (1997) 2013-2020.
- [42] Yun Kyun Lee, Seon Ho Jang, Min Soo Kim, and Woo Nyon Kim, *Effect of Multi-Walled Carbon Nanotube on the Electrical, Morphological and Mechanical Properties of Polypropylene/Nickel-Coated Carbon Fiber Composites*. Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea.
- [43] Morinobu Endo, Takuya Hayashi, Yoong Ahm Kim, *Applications of carbon nanotubes in the twenty-first century*. Faculty of Engineering, Shinshu University.
- [44] Yu M, Lourie O, Dyer MJ. *Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load*. Science 2000;287:637–40
- [45] Fang W, Chu HY, Hsu WK. *Polymerreinforced, aligned multiwalled carbon nanotube composites for microelectromechanical systems applications*. Adv Mater 2005;17:2987–96.
- [46] 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.
- [47] L. S. Schadler, S. C. Giannaris, and P.M. Ajayan, *Load transfer in carbon nanotube epoxy composites*, Applied Physics Letters, vol. 73, no. 26, pp. 3842–3844, 1998.

- [48] 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.
- [49] Dhakate SR, Mathur RB, Kakati BK, Dhami TL. *Properties of graphite-composite bipolar plate prepared by compression molding technique for PEM fuel cell*. Int J Hydrogen Energy 2007;32:4537–43.
- [50] Kirk Othmer. 1995. *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4th edition Vol 6. New York: John Wiley.
- [51] Yongzheng Pan a, Lin Lia. *Correlation between dispersion state and electrical conductivity of MWCNTs/PP composites prepared by melt blending*. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University. Singapore.
- [52] Dweiri R, Sahari J. *Electrical properties of carbon-based polypropylene composites for bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)*. J Power Sources 2007;171:424–32.
- [53] K.S.Weil, J.Y. Kim, G. Xia, J. Coleman, Z.G. Yang. 2006. Surf. Coat. Technol. 201, 4436–4441.
- [54] Sastrohamidjojo, Hardjono. *Spektroskopi Infrared*. 1994. PAU Bioteknologi UGM. Jogjakarta. Liberty YK ISBN 979-499-119-S.

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 ditaku-
kan 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 me-
nambah 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.
- 10 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
- 10 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: Foto Bahan dan Sampel



Anti Oksidan



MWCNT



Serat Karbon



Tembaga



Grafit



PP



PP-g-MA

(Lanjutan)



Material hasil *rheomix*



Material Pelat bipolar hasil *compression molding*



Spesimen Uji Tarik

Spesimen Uji Tekuk

Lampiran 3: Data 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	5.562	4.106	0.9855	1.3156
F2	6.617	5.551	0.9855	1.1623
F3	6.325	6.095	0.9855	1.0146

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	1.3349	1.3156	1.4458
F2	1.1748	1.1623	1.0640
F3	1.0228	1.0146	0.8017

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

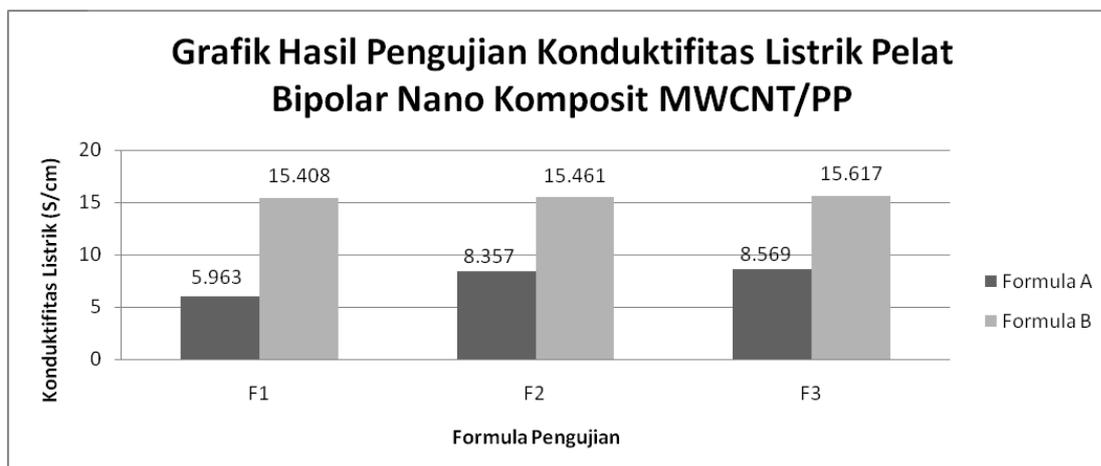
Operator : Subhan
 Pemohon : Albar
 Keterangan : -

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

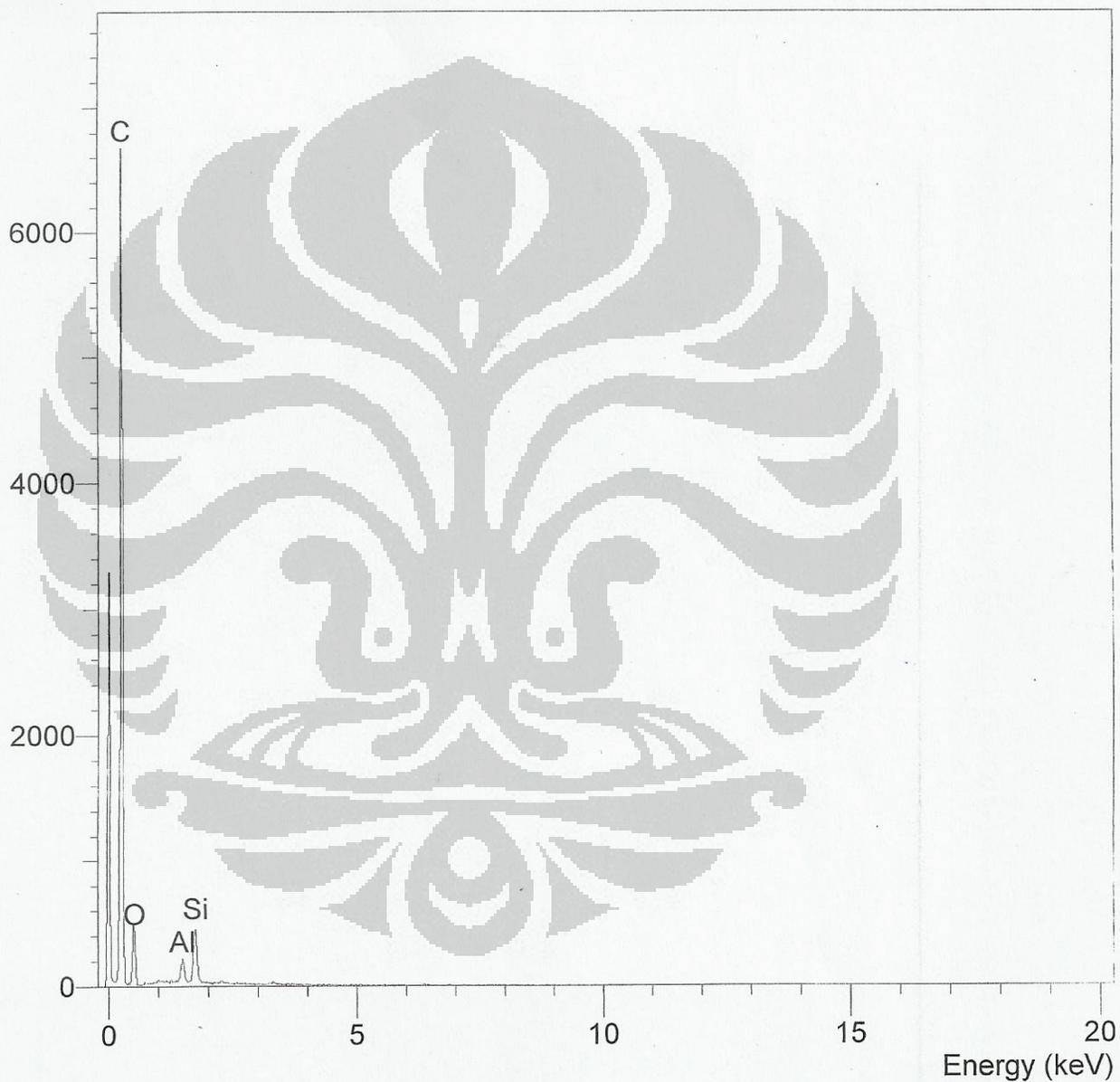
"M.....Tensile strength
 "B.....Strain at Break
 Fmax.....Maximum load
 Comment.....Comment

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-B-area (09/11/11 19:24)

Counts



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

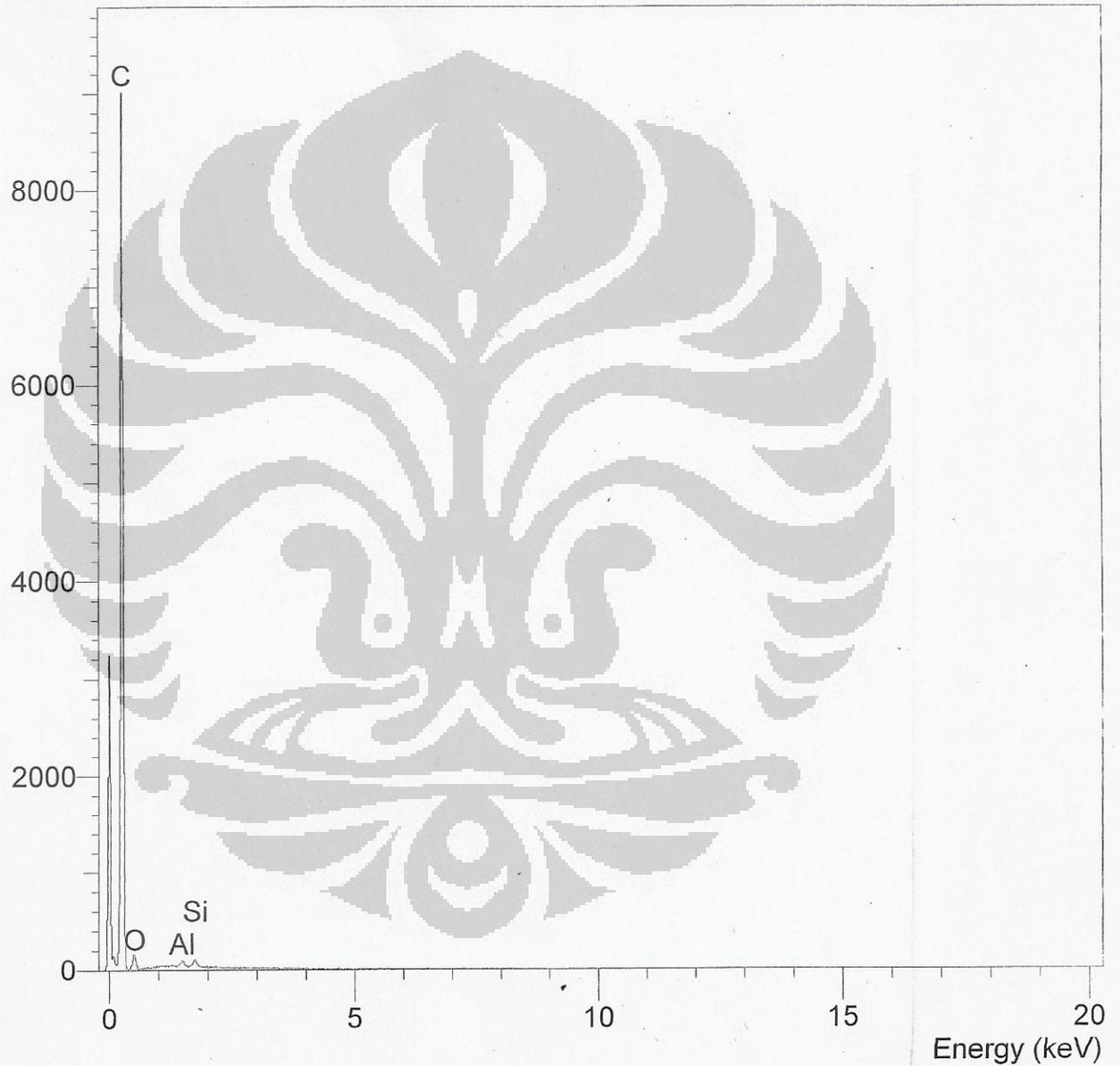
Operator : zakiyuddin

Client : Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia

Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis

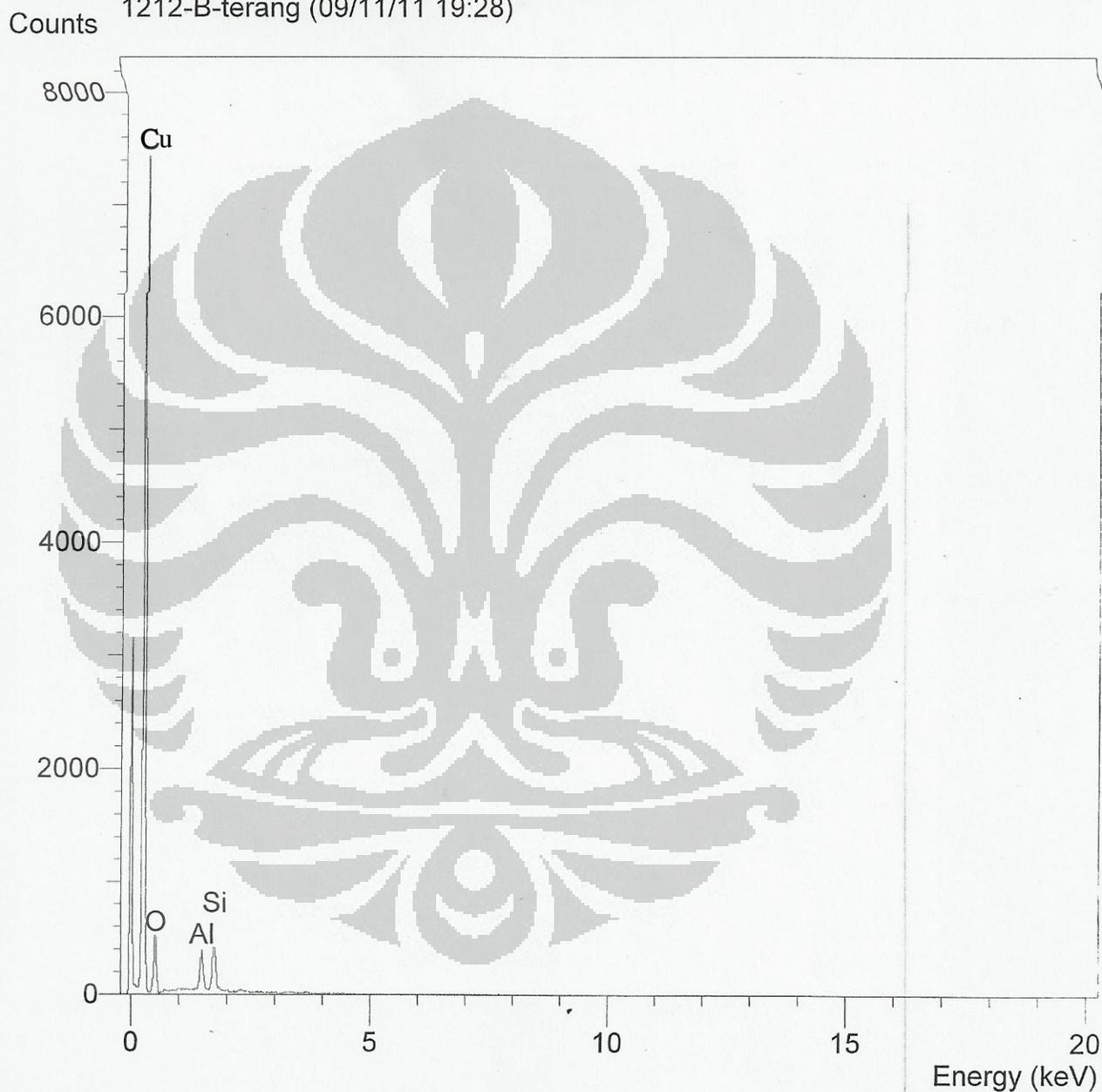
1212-B-gelap (09/11/11 19:30)

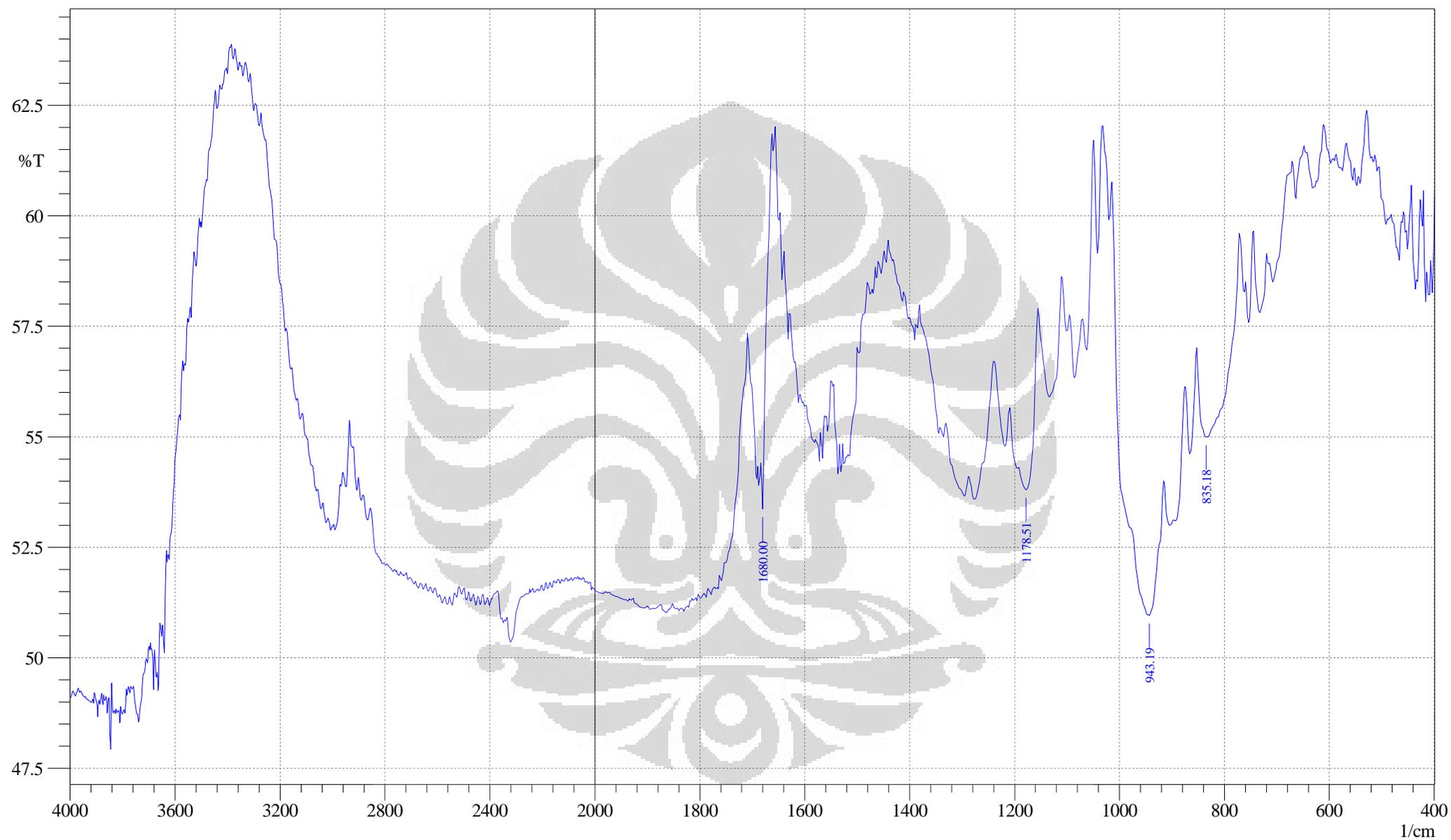
Counts



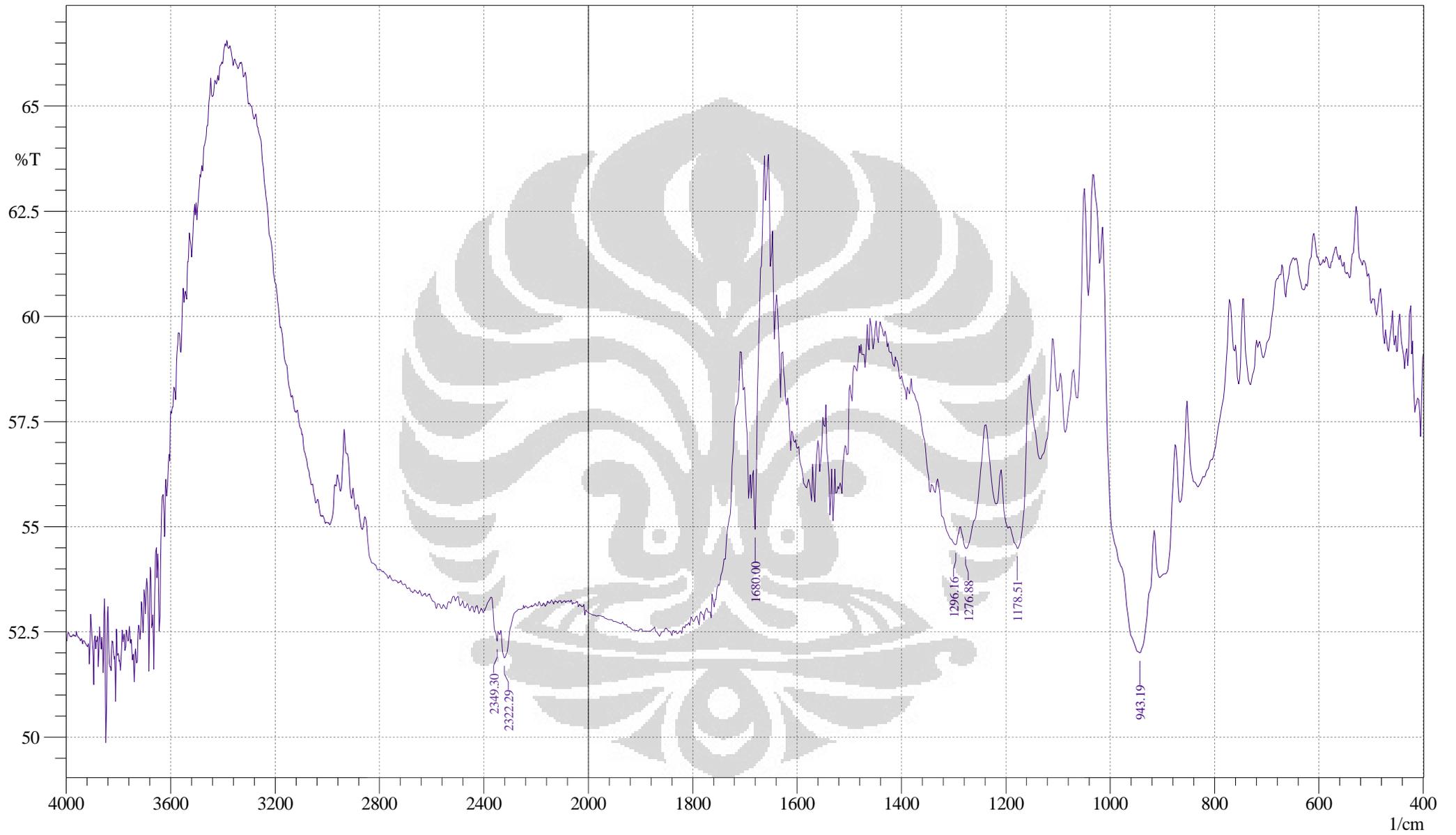
Lampiran 7: Hasil Pengujian Komposisi Kimia dengan EDS (Lanjutan)

Operator : zakiyuddin
Client : Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis
1212-B-terang (09/11/11 19:28)

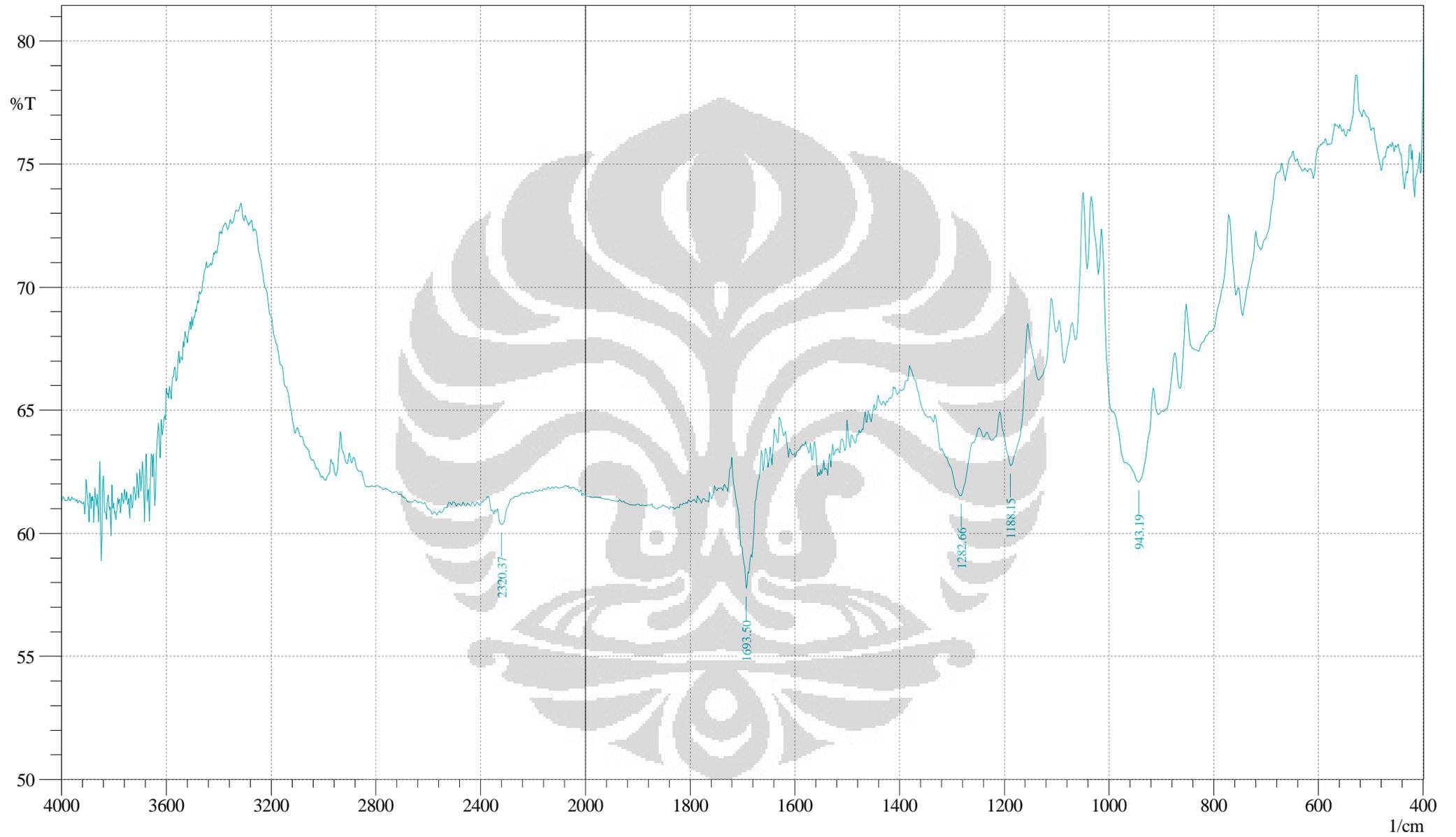




Comment;
flb



Comment;
f2b



Comment;
f3b