



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN *MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE* TERHADAP KARAKTERISTIK PELAT BIPOLAR KOMPOSIT *POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL* (PEMFC)**

**SKRIPSI**

**DIDI PRAYITNO**

**0806321303**

**FAKULTAS TEKNIK**

**DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK**

**JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN *MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE* TERHADAP KARAKTERISTIK PELAT BIPOLAR KOMPOSIT *POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL* (PEMFC)**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar**

**Sarjana Teknik (ST)**

**DIDI PRAYITNO**

**0806321303**

**FAKULTAS TEKNIK**

**DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK**

**JULI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama** : Didi Prayitno

**NPM** : 0806321303

**Tanda Tangan** : 

**Tanggal** : 6 Juli 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Didi Prayitno

NPM : 0806321303

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul Skripsi : **Pengaruh Penambahan *Multi-Walled Carbon Nanotube* Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar Komposit *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*(PEMFC)**

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Yunita Sadeli, M.Sc

Penguji I : Dr. Ir. Bambang Prihandoko MT

Penguji II : Dr. Mochammad Chalid, M.Sc.Eng



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Juli 2012

## KATA PENGANTAR

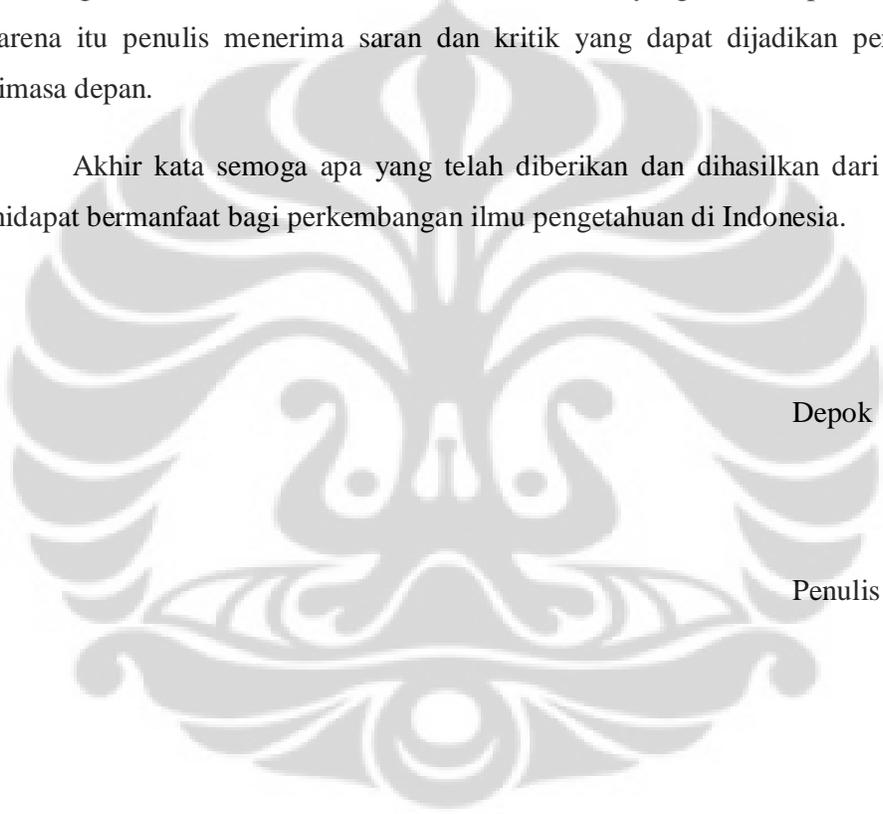
Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini di buat dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan dengan harapan penulisan ini dapat membantu penelitian dan perkembangan lain tentang sumber energi alternatif, khususnya pada bidang *fuelcell* di Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, skripsi ini sangat sulit untuk diselesaikan. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa, karena tanpa kuasa-Nya tidak mungkin penelitian ini dapat berjalan dengan lancar.
2. Kedua orang tua penulis dan kakak-kakak saya yang selalu senantiasa memberikan doa, semangat, dan dukungan kepada penulis.
3. Ir. Yunita Sadeli Msc. selaku dosen pembimbing yang telah berkorban waktu, tenaga dan pikiran untuk membantu penulis dalam hal mengarahkan dan memberi masukan.
4. Ir. Bambang Prihandoko MT selaku pembimbing lapangan.
5. Para dosen dan staf Departemen Metalurgi dan Material, terutama Bang Mamad, Pak Eko, dan Bang Jali, yang senantiasa membantu ketika penulis membutuhkan bantuan.
6. M. Avicenna Dianegara selaku tim pada penelitian ini,
7. Teman – teman dari Metalurgi dan Material angkatan 2008 FTUI yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
8. M. Ekaditya Albar dan Bangkit Indriyana yang merupakan tempat berbagi pengetahuan pada penelitian ini.
9. Ivan selaku mantan tim penelitian ini.
10. Mike Foley dan Pak Subhan yang telah membantu pada penelitian ini.

11. Teman – teman dari Bukit Pisang, Heri Multi, Nova Listyanto, Suprayogi, Andre Coudillo, Prima, Afuza dan lain-lain yang selalu memberikan hiburan – hiburan ketika penulis mengalami kesusahan.
12. Ibu Cece yang selalu memberikan bantuan ketika penulis membutuhkan energi di pagi hari.
13. Pihak – pihak lainnya yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa, dalam penulisan skripsi ini terdapat banyak kekurangan dan kesalahan dikarenakan keterbatasan yang dimiliki penulis. Oleh karena itu penulis menerima saran dan kritik yang dapat dijadikan perbaikan dimasa depan.

Akhir kata semoga apa yang telah diberikan dan dihasilkan dari skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan di Indonesia.



Depok

Penulis

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

---

---

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

Nama : Didi Prayitno  
NPM : 0806321303  
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**Pengaruh Variasi Penambahan *Multi-walled Carbon Nanotube*  
Terhadap Sifat Pelat Bipolar Komposit *Polymer Electrolyte  
Membrane Fuel Cell (PEMFC)***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan 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 : 6 Juli 2012

Yang menyatakan



(Didi Prayitno)

## ABSTRAK

Nama : Didi Prayitno

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul : **Pengaruh Variasi Penambahan *Multi-Walled Carbon Nanotube* Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar Komposit *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*(PEMFC)**

*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) merupakan salah satu energy alternative untuk mengatasi keterbatasan energi fosil, serta ramah lingkungan. Pelat bipolar merupakan komponen penting pada PEMFC sebagai pengumpul dan pentransfer elektron dari anoda menuju katoda. Pada penelitian ini pelat bipolar dibuat dari grafit komposit yang terdiri dari matriks grafit *Electric Arc Furnace* (EAF), *carbon black* dan *multi-walled carbon nanotube* sebagai *filler*, dan resin epoksi sebagai *binder*. Bahasan utama penelitian ini ialah pengaruh penambahan *multi-walled carbon nanotube* yaitu sebanyak 1%, 2%, 3%, 4% dan 5% terhadap konduktivitas karakteristik material pelat bipolar. Karakterisasi pelat bipolar dengan melakukan beberapa pengujian yaitu uji konduktivitas, uji flexural, uji densitas, uji porositas dan pengamatan dengan menggunakan FE SEM. Hasil dari peneltian ini, penambahan *multi-walled carbon nanotube* pelat bipolar dapat meningkatkan sifat konduktivitas hingga menjadi 8.95 S/Cm dan kekuatan flexural bipolar yaitu sebesar 59.11 Mpa. Namun, penambahan *multi-walled carbon nanotube* memiliki titik optimum pada penambahan 3%, penambahan *multi-walled carbon nanotube* diatas 3% dapat menurunkan kembali sifat konduktivitas dan flexural pelat bipolar akibat penggumpalan atau aglomerat dari *multi-walled carbon nanotube*

Kata kunci: PEMFC, pelat bipolar, grafit komposit, *multi-walled carbon nanotube*, *carbon black*, Fraksi Berat MWCNT, konduktivitas listrik, tekuk, densitas, porositas

## ABSTRACT

Name : Didi Prayitno  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : **Effect of addition *Multi-Walled Carbon Nanotube* to the characteristics composite Bipolar Plate *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*(PEMFC)**

*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) is one of the alternative energy to overcome the limitations of fossil energy, as well as environmental friendly. Bipolar plate in PEMFC is an important component as collector and transferor of electron from anode to cathode. In this research the bipolar plate is made from graphite composite consisting of Electric Arc Furnace (EAF) graphite as matrice, carbon black and multi-walled carbon nanotube as filler, and epoxy resin and hardener as binder. The main subject of this research is effect of addition multi-walled carbon nanotube that is as much as 1%, 2%, 3%, 4% and 5% to the characteristics of bipolar plate. Characterization of bipolar plate by doing some testing iare conductivity test, flexural test, density test, porosity test, and observation with FE SEM. Result from this research is addition of multi-walled carbon nanotube can improve the conductivity to be 8.95 S/cm and flexural properties of bipolar plate is 59.11 Mpa. However, the excessive addition of multiwalled carbon nanotube has an optimum point on the addition 3%, the addition multi-walled carbon nanotube over can return decrease the conductivity and flexural properties of bipolar plate because there is agglomeration multi-walled carbon nanotube.

Keywords: PEMFC, bipolar plates, carbon-carbon composite, carbon black, addition of MWCNT, electrical conductivity, flexural strength, density, porosity

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xv
BAB I .....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1 LATAR BELAKANG .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....	4
1.5. Sistematika Penulisan .....	5
BAB II .....	6
DASAR TEORI .....	6
2.1. Sel Tunam ( <i>Fuel Cell</i> ) .....	6
2.1.1. Jenis – Jenis Sel Tunam .....	7
2.2. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) .....	8
2.2.2 Pelat Bipolar .....	10

2.3.	Material Komposit.....	13
2.4.	Material Pelat Bipolar Karbon-Karbon Komposit .....	18
2.4.1.	Grafit .....	18
2.4.2.	<i>Carbon Black</i> .....	20
2.4.3.	<i>Multi-walled Carbon Nanotube</i> .....	22
2.4.4.	Epoksi.....	24
BAB III .....		26
METODOLOGI PENELITIAN .....		26
3.1.	Diagram Alir Penelitian .....	26
3.1.1.	Diagram Alir Fabrikasi Sampel.....	26
3.1.2.	Diagram Alir Karakterisasi Sampel.....	27
3.2.	Komposisi Pelat Bipolar dan Variabel Penelitian .....	27
3.3.	Alat dan Bahan .....	28
3.3.1.	Alat .....	28
3.3.2.	Bahan .....	29
3.4.	Proses Pembuatan Sampel .....	29
3.4.1.	<i>Crushing</i> dan <i>milling</i> grafit.....	29
3.4.2.	Penimbangan.....	30
3.4.3.	Pencampuran.....	30
3.4.5.	Pencetakan Pelat.....	30
3.5	Pembuatan Sampel Uji .....	31
3.6	Prinsip Pengujian.....	31
3.6.1	Pengujian konduktivitas listrik.....	31
3.6.2	Pengujian densitas (rapat massa).....	32
3.6.3	Pengujian porositas.....	33
3.6.4	Pengujian tekuk ( <i>flexural</i> ).....	33

3.6.5 Karakterisasi dengan Menggunakan FE SEM .....	34
BAB IV .....	36
HASIL DAN PEMBAHASAN .....	36
4.1 Pengamatan Hasil Pencetakan Bipolar .....	36
4.2. Hasil Pengujian Konduktivitas.....	37
4.3. Hasil Pengujian Flexural.....	39
4.4. Hasil Pengujian Densitas .....	41
4.5. Hasil Pengujian Porositas .....	42
4.6. Pengamatan Foto FE SEM.....	44
4.7. Perbandingan Sifat Pelat Bipolar .....	49
BAB V .....	51
KESIMPULAN .....	51
DAFTAR REFERENSI .....	52
LAMPIRAN .....	55

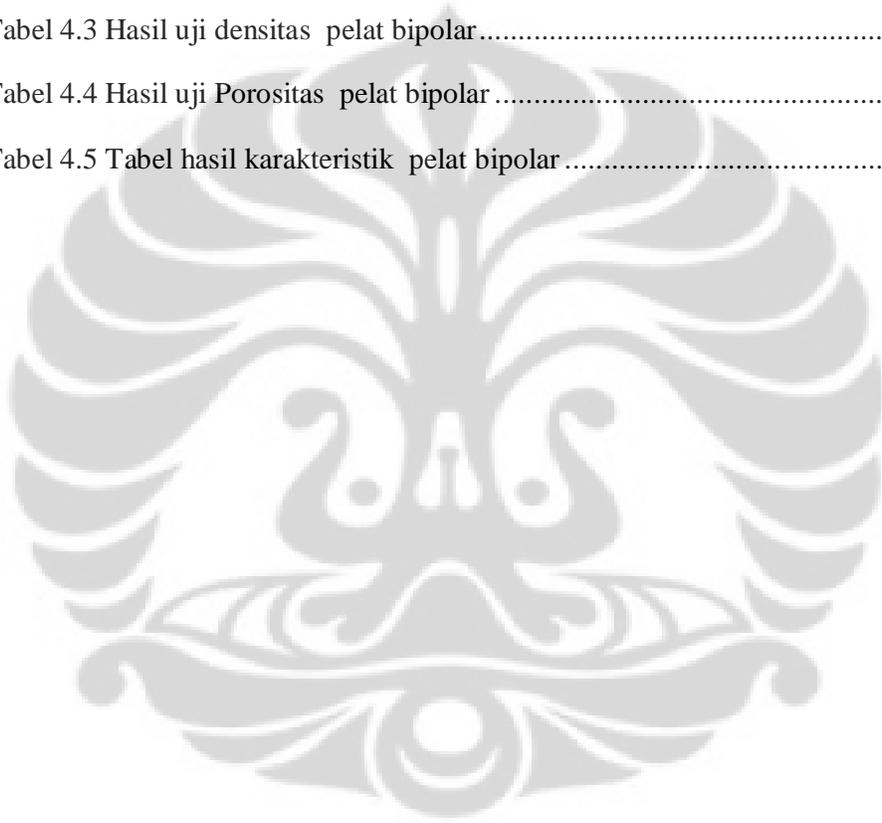
## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Laju Konsumsi Produksi Bahan Bakar Fosil .....	1
Gambar 1.2 Proses Pengolahan Baja .....	3
Gambar 2.1 Operasi Dasar Sel Tunam .....	6
Gambar 2.2 Komponen PEMFC .....	9
Gambar 2.3 Pelat Bipolar dengan <i>Flow Channel</i> .....	10
Gambar 2.4 Material yang Digunakan Sebagai Pelat Bipolar .....	11
Gambar 2.5 Klasifikasi Komposit Berdasarkan Bentuk dari Matriks-nya .....	14
Gambar 2.6 Fenomena Antarmuka .....	15
Gambar 2.7 Sudut kontak Pembasahan .....	16
Gambar 2.8 Fenomena Antarfasa .....	17
Gambar 2.9 Jenis Komposit berdasarkan Bentuk Penguat .....	17
Gambar 2.10 Struktur Kristal Grafit.....	19
Gambar 2.11 Eleltroda Grafit Pada Dapur Busur Listrik .....	20
Gambar 2.12 Struktur <i>Carbon Black</i> .....	21
Gambar 2.13 Dispersi <i>Carbon Black</i> pada Polymer .....	21
Gambar 2.14 Struktur MWCNT .....	22
Gambar 2.15 <i>Multi-walled carbon nanotube</i> sebagai <i>conductive path</i> .....	23
Gambar 2.16 Aglomerasi <i>Multi-walled Carbon Nanotube</i> .....	23
Gambar 2.17 Struktur Dasar Epoksi.....	24
Gambar 2.18 Diagram <i>curing</i> Epoksi .....	25
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian (Fabrikasi Sampel) .....	26
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (Karakterisasi Sampel).....	27
Gambar 3.3 <i>High Speed Mixer</i> .....	30
Gambar 3.4 Proses Pencetakan PELat dengan Hot Press .....	31

Gambar 3.5 Skema Uji Konduktivitas .....	32
Gambar 3.6 Skema Uji Fleksural .....	34
Gambar 4.1 Hasil Pencetakan pelat Bipolar .....	36
Gambar 4.2 Grafik Hasil Konduktivitas pelat bipolar .....	38
Gambar 4.3 Grafik Nilai Fleksural Pelat Bipolar.....	40
Gambar 4.4 Grafik Nilai Densitas pelat Bipolar .....	42
Gambar 4.5 Grafik hasil Persen Porositas pelat bipolar .....	43
Gambar 4.6 Permukaan patahan pelat bipolar penambahan MWCNT 1% .....	44
Gambar 4.7 Permukaan patahan pelat bipolar penambahan MWCNT 2% .....	45
Gambar 4.8 Permukaan patahan pelat bipolar penambahan MWCNT 3% .....	45
Gambar 4.9 Permukaan patahan pelat bipolar penambahan MWCNT 4% .....	46
Gambar 4.10 Permukaan patahan pelat bipolar penambahan MWCNT 5% .....	46
Gambar 4.11 Aglomerat MWCNT pada penambahan 4% .....	48
Gambar 4.12 Aglomerat MWCNT pada penambahan 5% .....	49

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis-Jenis <i>Fuel Cell</i> .....	7
Tabel 2.2 Komponen Penyusun PEMFC .....	9
Tabel 3.1 Komposisi Pelat Bipolar dan Variasi Penambahan MWCNT .....	27
Tabel 4.1 Hasil uji konduktivitas pelat bipolar .....	37
Tabel 4.2 Hasil pengujian kekuatan flexural pelat bipolar .....	39
Tabel 4.3 Hasil uji densitas pelat bipolar.....	41
Tabel 4.4 Hasil uji Porositas pelat bipolar .....	43
Tabel 4.5 Tabel hasil karakteristik pelat bipolar .....	50



## DAFTAR LAMPIRAN

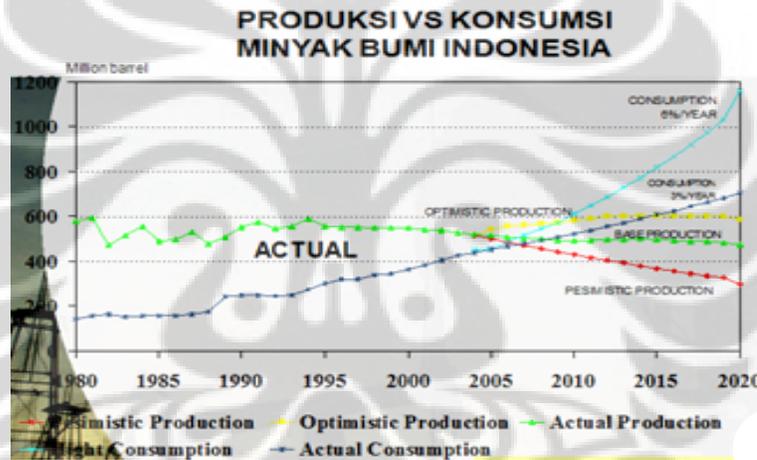
Lampiran 1 komposisi Pelat Bipolar .....	55
Lampiran 2 Tabel Hasil Uji Densitas .....	56
Lampiran 3 Tabel Hasil Uji Flexural.....	57
Lampiran 4 Tabel Hasil Uji Konduktivitas.....	58
Lampiran 5 Tabel Hasil Uji Porositas.....	59
Lampiran 6 Spesifikasi MWCNT.....	60
Lampiran 7 Spesifikasi Resin Epoxy.....	61
Lampiran 8 Spesifikasi Resin Hardener .....	62
Lampiran 9 Spesifikasi Grafit EAF PT. Krakatau Steel.....	63
Lampiran 10 MWCNT sebelum di mixing perbesaran 20.000x .....	65
Lampiran 11 MWCNT sebelum di mixing perbesaran 100.000x .....	66
Lampiran 12 MWCNT sebelum di mixing perbesaran 50.000x .....	67
Lampiran 13 MWCNT, CB dan GEAF setelah mixing Perbesaran 5000x .....	68
Lampiran 14 MWCNT, CB dan GEAF setelah mixing Perbesaran 10.000x .....	69
Lampiran 15 MWCNT, CB dan GEAF setelah mixing Perbesaran 20.000x .....	70

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Perkembangan zaman yang semakin maju yang diikuti dengan berkembangnya teknologi yang semakin modern mengakibatkan kebutuhan energi yang di konsumsi oleh manusia semakin meningkat. Peningkatan penggunaan bahan bakar ini berbanding terbalik dengan ketersediaan bahan bakar minyak tersebut, yang semakin sedikit. Seperti yang diperlihatkan pada Gambar .1 yang menggambarkan perbandingan laju konsumsi bahan bakar minyak semakin meningkat sedangkan ketersediaan bahan bakar yang semakin sulit<sup>[1]</sup>.



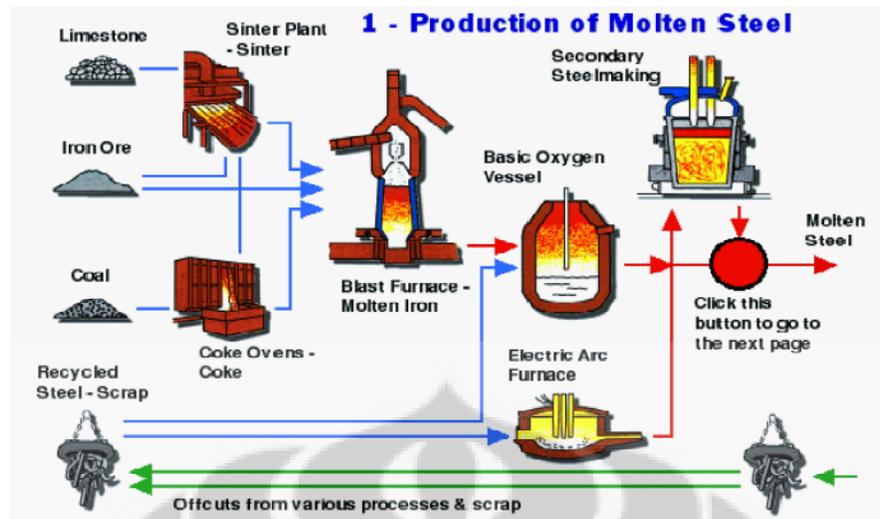
Gambar 1. 1 Laju konsumsi produksi bahan bakar fosil<sup>[1]</sup>

Yang menjadi tantangan terbesar yang dihadapi dalam bidang energi adalah bagaimana memenuhi permintaan akan energi selain itu dapat mengurangi efek emisi gas rumah kaca seperti yang dihasilkan oleh penggunaan energi dari bahan bakar minyak. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan di bidang teknologi untuk menghindarkan krisis energi dengan cara mencari dan mengembangkan energi alternatif. Salah satu energi alternatif yang potensial untuk dikembangkan yaitu sel tunam. *Fuel cell* (sel tunam) merupakan salah satu teknologi penghasil energi listrik paling bersih dan efisien. Karena sel tunam menggunakan hidrogen (H) dan oksigen (O<sub>2</sub>) sebagai bahan bakar dan hasil pembuangan berupa air (H<sub>2</sub>O) yang ramah dengan lingkungan<sup>[2]</sup>. Penggunaan sel

tunam sebagai energi alternatif dapat berdampak terhadap berkurangnya pemakaian bahan bakar minyak (BBM), terpenuhinya kebutuhan energi, dan menurunkan tingkat emisi yang dihasilkan sehingga turut menjaga kelestarian bumi dari ancaman pemansan global.

Sel tunam sendiri dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan jenis elektrolitnya dapat, namun saat ini yang lebih banyak dikembangkan adalah *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Jenis sel tunam ini memiliki bahan dasar berupa polimer dengan fungsi sebagai alat konversi kimia yang mengubah gas hidrogen dan oksigen menjadi sumber energi listrik, panas, dan air. Teknologi ini memiliki efisiensi tinggi, tidak bising dan *transportable* yang dapat digunakan pada kendaraan bermotor, ponsel, komputer, alat rumah tangga maupun pembangkit listrik (*power plant*). Dimana PEMFC sendiri terdiri dari beberapa komponen penting, seperti pelat bipolar, pelat penutup, *membrane electrolyte assembly* (MEA), dan penyimpan arus. Komponen yang banyak mendapat perhatian adalah pelat bipolar dikarenakan komponen ini hampir mempengaruhi 80% volume, 70% berat dan 60% harga dari sel tunam<sup>[3]</sup>. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan teknologi untuk material pelat bipolar sel tunam ini. Saat ini sedang dikembangkan pelat bipolar yang terbuat dari komposit karbon. Penggunaan komposit karbon sebagai penguat pelat bipolar hal ini dikarenakan sifat dari grafit sendiri yang memiliki sifat konduktivitas yang tinggi, ringan dan tahan terhadap oksidasi, sehingga cocok untuk penggunaan bagi pelat bipolar pada sel tunam<sup>[4]</sup>.

Pada penelitian ini akan dipelajari karakteristik dari pelat bipolar yang dibuat dari limbah grafit *Electric Arc Furnace* (GEAF). Pada proses peleburan besi dan baja, khususnya menggunakan tungku busur listrik EAF, dibutuhkan suatu elektroda grafit yang memiliki konduktivitas tinggi berfungsi untuk menghantarkan arus yang besar sehingga dapat melebur besi spons (*sponge iron*) dan besi tua (*scrap*) sebagai bahan baku utama pembuatan besi dan baja<sup>[5]</sup>. Pemilihan dan pemanfaatan limbah grafit dari pabrik baja ini bertujuan dapat menjadi material substitusi dari grafit sintetis sehingga dapat mereduksi biaya produksi selain itu untuk membantu tercapainya daur ulang limbah industri di Indonesia.



Gambar 1. 2 Proses pengolahan Baja<sup>[5]</sup>

## 1.2 Perumusan Masalah

Pada Penelitian ini akan mempelajari karakteristik pelat bipolar berbasis karbon yaitu grafit limbah EAF yang ditambahkan resin epoksi sebagai *binder* dan *carbon black* serta *multi-walled* serta *carbon nanotube* sebagai *filler*. Akan tetapi material pelat bipolar ini memiliki permasalahan yang muncul, yaitu rendahnya konduktivitas listrik dari polimer yang bersifat isolator. Untuk diperlukan penambahan material yang memiliki konduktivitas baik seperti *multi-walled carbon nanotube* untuk meningkatkan sifat konduktivitas yang dihasilkan material pelat bipolar ini<sup>[6]</sup>.

Pada penelitian ini, komposisi pelat bipolar yang digunakan yaitu sebesar 20% epoksi dan *hardener* dengan perbandingan 1:1, dan 80% untuk grafit limbah EAF, *carbon black* serta *multi-walled* serta *carbon nanotube*. untuk grafit limbah EAF sendiri yang digunakan sebanyak 95%, sedangkan *filler* atau pengisi yang ditambahkan yaitu sebanyak 5 % dengan pebandingan *multi-walled carbon nanotube* dan *carbon black* yaitu 1:4, 2:3, 3:2, 4:1 dan 5:0. Sehingga untuk mengetahui pengaruh yang terjadi terhadap sifat dan karakteristik dari material pelat bipolar seperti konduktivitas dan sifat-sifat penting lain seperti densitas, kekuatan tekuk, dan permeabilitas juga harus diperhatikan dalam menentukan komposisi yang akan digunakan sebagai pelat bipolar.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mempelajari pengaruh penambahan *multi-walled carbon nanotube* sebagai *filler* dengan variasi variasi komposisi 1, 2, 3, 4, 5 wt.% pada pelat bipolar terhadap sifat konduktivitas listrik yang dihasilkan penelitian terdahulu.
2. Mendapatkan pengaruh penambahan *multi-walled carbon nanotube* terhadap karakteristik lain seperti densitas, porositas, dan kekuatan tekuk dari pelat bipolar yang berbahan dasar grafit EAF.
3. Mendapatkan optimasi karakteristik pelat bipolar akibat penambahan *multi-walled carbon nano tube*.

### 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Pada penelitian ini, diformulasikan karakteristik komposit pelat bipolar yang memenuhi tuntutan aplikasi dengan berat yang lebih ringan tanpa mengurangi performa yang diinginkan. Material yang penyusun yaitu grafit limbah EAF, *Multi Walled Carbon Nanotube*, dan *Carbon Black* serta epoksi sebagai, dengan perbandingan komposisi dari berat total material yang digunakan yaitu :

- a) 80%wt karbon yang terdiri dari campuran grafit EAF berukuran <44  $\mu\text{m}$  sebanyak 95%, dan 5% *filler* yaitu variasi *carbon black* konduktif berukuran 44  $\mu\text{m}$  dan *multi-walled carbon nanotube*. dimana perbandingan *carbon black* dan *multi-walled carbon nanotube* 4:1, 3:2, 2:3, 1:4, dan 0:5.
- b) 20%wt. terdiri dari resin epoksi dan *hardener* dengan perbandingan 1:1

Dimana komposisi *carbon black*, *multi-walled carbon nanotube* yang digunakan sebagai *filler* dalam penelitian ini sebanyak 5wt%, namun untuk mengetahui pengaruh penambahan *multi-walled carbon nanotube* pada pelat bipolar ini dilakukan variasi komposisi *multi-walled carbon nanotube* (*MWCNT*) yang ditambahkan. Dimana pada variasi penambahan *multi-walled carbon nanotube* (*MWCNT*) sebagai *filler* variasi komposisi mulai dari 1%, 2%, 3%, 4% dan 5 % komposisi. Semua bahan dicampur dengan menggunakan *high speed mixer* dengan kecepatan putaran 25000 rpm. Pembuatan pelat bipolar dilakukan dengan metode *compression moulding* yang menggunakan tekanan 55 MPa, dengan temperatur cetakan 100°C selama 4 jam. Setelah proses pembuatan

pelat, dilakukan pengujian untuk mengetahui sifat yang dihasilkan. Karakterisasi material yang akan dipelajari pada penelitian ini adalah pengujian konduktivitas (*four pointprobe test*- ASTM B193), pengujian densitas (ASTM D792), pengujian porositas (ASTM C20), pengujian SEM (ASTME 1829-97) dan pengujian tekuk (ASTM D790) untuk mengetahui sifat mekanis dan sifat konduktivitas listrik dari pelat bipolar tersebut.

### **1.5. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan laporan skripsi ini dapat dilihat pada uraian berikut:

#### **BAB 1: PENDAHULUAN**

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penelitian.

#### **BAB 2: TEORI PENUNJANG**

Bab ini berisikan uraian tentang studi literatur berkaitan dengan penelitian yang dilakukan.

#### **BAB 3: METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini berisikan prosedur penelitian, daftar peralatan dan komposisi bahan yang digunakan dalam penelitian.

#### **BAB 4: HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisikan pengolahan data dan analisa hasil penelitian sesuai studi literatur.

#### **BAB 5: KESIMPULAN**

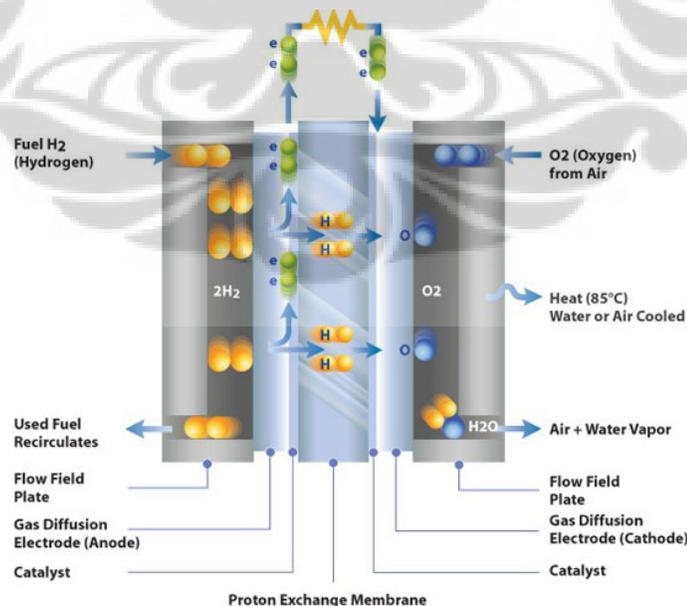
Bab ini berisikan kesimpulan akhir berdasarkan pengolahan data dan analisa hasil penelitian.

## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1. Sel Tunam (*Fuel Cell*)

Sel tunam (*Fuel cell*) adalah perangkat elektrokimia yang mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik secara langsung, dan dapat digunakan sebagai pembangkit listrik dengan efisiensi tinggi serta dampak terhadap lingkungan yang rendah. Sel tunam menghasilkan listrik dengan polutan yang minimal karena tidak terjadi pembakaran<sup>[7]</sup>. Hal ini dikarenakan penggunaan sel tunam ini tidak menggunakan energi fosil yang tidak dapat diperbaharui melainkan menggunakan bahan bakar dari alam seperti hidrogen dan oksigen yang banyak tersedia di alam. Penggunaan bahan bakar hidrogen dan oksigen ini akan menghasilkan proses rekasi oksidasi dan reduksi yang menghasilkan air ( $H_2O$ ) sehingga tidak menimbulkan polusi dan lebih ramah lingkungan. Sel tunam memerlukan pengisian ulang seperti halnya dengan baterai, tetapi sel tunam akan terus mengalirkan listrik selama terdapat suplai bahan bakar terus diberikan.



Gambar 2. 1 Operasi dasar sel tunam<sup>[8]</sup>

Gambar 2.1 menunjukkan skema operasi dari sel tunam tunggal. Prinsip kerja dari yaitu dengan cara mensuplai bahan bakar hidrogen ke katalis anoda (kutub negatif) sementara oksigen juga di suplai ke katoda katalis ( kutub positif) dari sel tunam dimana akan terjadi reaksi kimia, dimana hidrogen akan tereduksi menjadi elektron dan proton. Melalui sebuah elektrolit, proton akan berdifusi dari anoda (kutub negatif) ke katoda (kutub positif). Sedangkan elektron tidak dapat melalu elektrolit tersebut dan akan mengalir melalui suatu rangkaian dengan yang akan menghasilkan aliran listrik<sup>[7]</sup>.

### 2.1.1. Jenis – Jenis Sel Tunam

Sel tunam dapat dibedakan dari beberapa jenis, salah satunya yaitu dibedakan berdasarkan elektrolit yang digunakan. Elektrolit yang digunakan menentukan tempat terjadi reaksi kimia pada sel, persyaratan katalis, range temperatur pada saat operasi sel tunam, dan faktor-faktor lainnya<sup>[9]</sup>. Jenis-jenis sel tunam berdasarkan elektrolit yang digunakan dapat dilihat pada tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Jenis-jenis Sel Tunam<sup>[9]</sup>

Jenis	Elektrolit	Temperatur Operasi (°C)
Alkaline Fuel Cell (AFC)	KOH	60- 120
Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	Phosphoric Acid (H <sup>+</sup> )	160-200
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	Lapisan keramik (O <sup>2-</sup> )	800-1000
Molten carbonate Fuel Cell (MCFC)	Molten Carbonate(CO <sub>2</sub> <sup>2-</sup> )	500-650
Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)	Polymer Electrolyte (H <sup>+</sup> )	60-100
Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)	Electrolyte Polymer (H <sup>+</sup> )	60-120

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

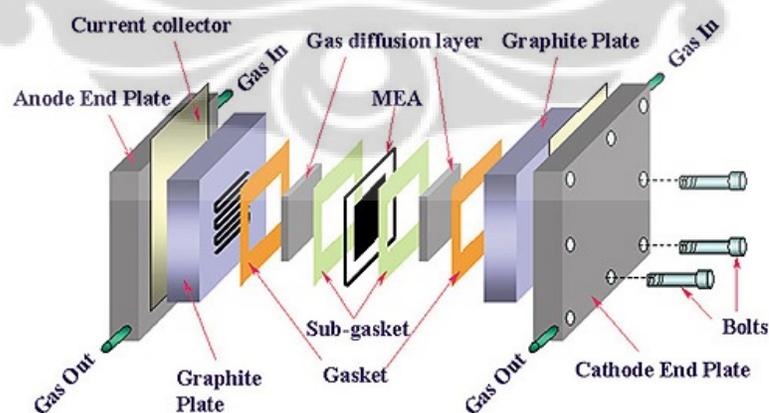
*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC), juga dikenal sebagai *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), merupakan salah satu jenis sel tunam yang memiliki bahan dasar berupa polimer dengan fungsi sebagai alat konversi kimia yang mengubah gas hidrogen dan oksigen menjadi sumber energi listrik, panas, dan air<sup>[10]</sup>.

Jenis sel tunam ini yang sedang banyak mendapat perhatian dari peneliti di dunia. Hal ini dikarenakan penggunaan bahan polimer sebagai membran padat pada komponen sel tunam, menyebabkan PEMFC digunakan untuk aplikasi yang relatif rendah ( $60^{\circ} - 80^{\circ} \text{ C}$ ) dan memiliki ketahanan terhadap korosi yang lebih baik, meskipun beroperasi pada pH 2-3<sup>[11]</sup>. Sehingga PEMFC dapat meminimalisir terjadinya korosi pada pelat bipolar serta suplai bahan bakar yang baik, dan daya tahan yang baik<sup>[12]</sup>. PEMFC memiliki densitas daya yang tinggi dan mempunyai kelebihan dalam hal berat dan volum dibandingkan dengan jenis lain, sehingga PEMFC merupakan teknologi sel tunam yang memiliki prospek yang baik untuk aplikasi transportasi atau alat *portable*. Tetapi kehilangan tegangan dan overpotensial selama pengoperasian membuat efisiensinya berkurang. Salah satu kendala dari penggunaan PEMFC adalah rendahnya kadar hidrogen di udara sehingga perlu pengembangan di bidang itu<sup>[11]</sup>.

Komponen penyusun PEMFC terdiri dari membran padat polimer sebagai elektrolit dan elektoda (anoda dan katoda) karbon yang mengandung katalis perak, pelat bipolar, pelat penutup (*end plate*) dan pengumpul arus. Masing-masing komponen penyusun tersebut memiliki fungsi tersendiri untuk menjadikan PEMFC sebagai suatu kesatuan sebagai penghasil energi listrik yang baik dan efisien. Pada Tabel 2.2 berikut ini, dapat terlihat fungsi dari masing-masing komponen penyusun suatu PEMFC<sup>[3]</sup>. Gambar 2.2 menunjukkan susunan dari komponen-komponen PEMFC.

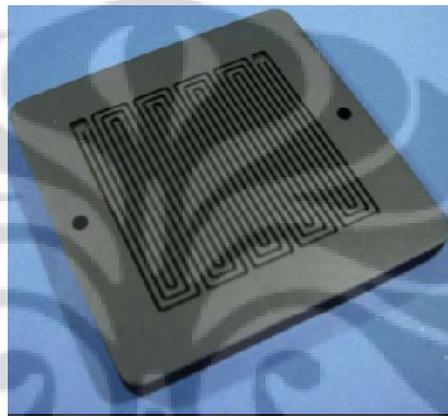
**Tabel 2.2.** Komponen Penyusun PEMFC

Komponen	Fungsi
<i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sebagai pemisah antara anoda dan katoda</li> <li>- Pentransfer proton dari anoda ke katoda</li> <li>- Mendistribusikan gas reaktan pada lapisan difusi gas ke dalam lapisan katalis</li> </ul>
Pelat Bipolar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Memindahkan elektron dari anoda ke katoda</li> <li>- Mendistribusikan gas reaktan ke membran</li> <li>- Memindah air dari setiap sel</li> </ul>
<i>Enda plate</i>	Memungkinkan penyusunan terintegrasi dalam tumpukan PEMFC
Pengumpul arus	Mengumpulkan dan memindahkan arus dan rumpukkan PEMFC je sirkuit eksternal

**Gambar 2. 2** Komponen PEMFC<sup>[3]</sup>

### 2.2.2 Pelat Bipolar

Pelat bipolar atau disebut juga *flow field plate* merupakan suatu komponen penting dalam sistem operasi PEMFC. Hal ini dikarenakan pelat bipolar berkontribusi terhadap 80% volum, 70% berat, dan 60% biaya dari sel tunam<sup>[13]</sup>. Oleh karena itu, pelat bipolar harus dibuat tipis, ringan, ekonomis, dan mudah dibentuk guna mengoptimalkan fungsinya. Pelat bipolar yang akan digunakan harus memiliki karakteristik material yang memenuhi standar kelayakan sifat bipolar<sup>[14]</sup>. Gambar 2.3 menunjukkan bentuk dapelat bipolar denga *flow channel*.

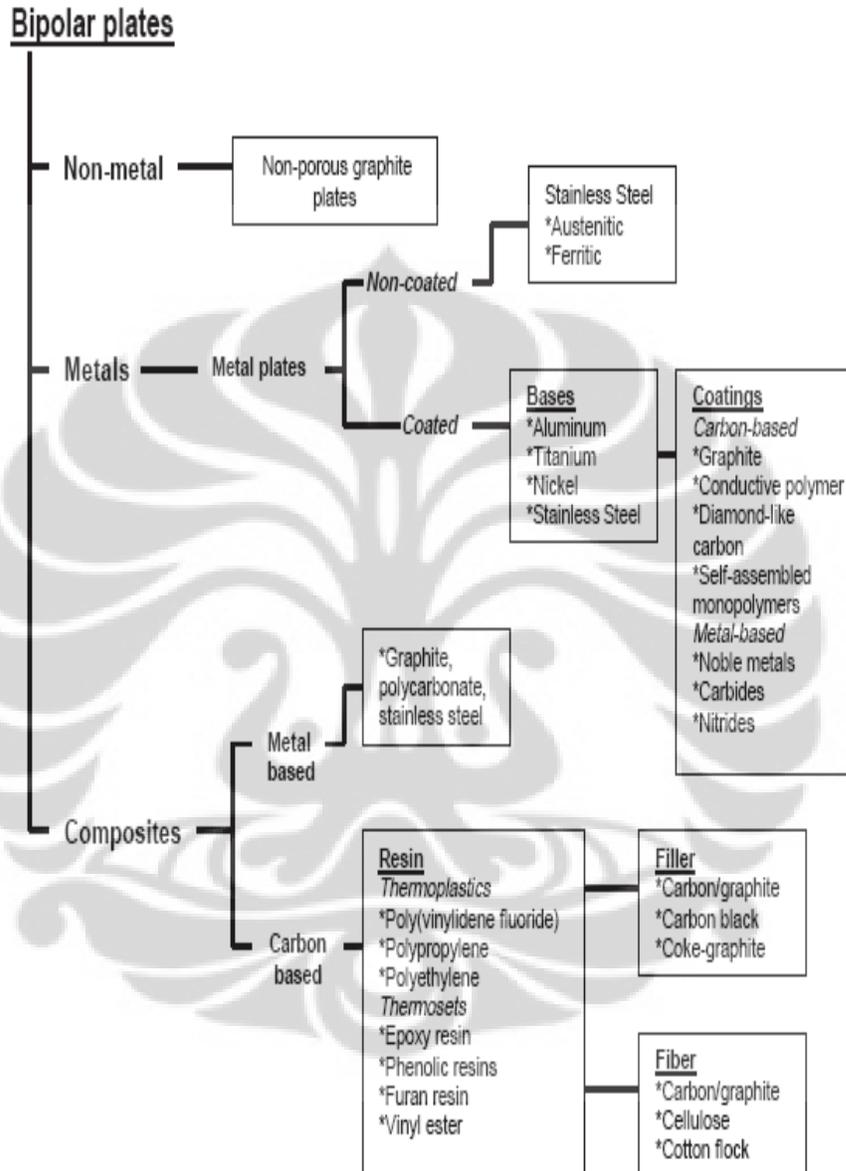


Gambar 2. 3 Pelat Bipolar dengan *Flow channel*<sup>[14]</sup>

Sedangkan pelat bipolar sendiri memiliki fungsi yang ganda, yaitu mengalirkan gas dan udara secara merata ke lapisan difusi gas melalui *flow channel* dan mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda. Oleh karena kegunaan dan peran penting dari pelat bipolar ini, pengembangan material dari pelat bipolar banyak dilakukan utnuk mendapatkan pelat bipolar yang efektif dan efisien. Suatu material pelat yang akan digunakan harus memiliki karakteristik material yang memenuhi standar kelayakan sifat bipolar<sup>[15]</sup>:

1. Konduktivitas  $>100$  S/c,
2. Kekuatannya harus mampu menahan tekanan hingga 200 Psi
3. Bobot maksimum 200 gram/pelat
4. Volume 1L/kW/stack
5. Kerapatan Arus Decay  $<10\%$  per 5000 jam operasi
6. Permeability maksimum Kebocoran  $H_2$  yaitu  $10^{-4}$

Saat pelat bipolar telah dapat dibuat dari beberapa jenis material dasar diantaranya adalah non-logam, logam dan komposit. Klasifikasinya ditunjukkan Gambar 2.4.



**Gambar 2. 4** Material yang Digunakan Sebagai Pelat Bipolar<sup>[16]</sup>.

Jenis material dasar yang digunakan tentunya mempengaruhi karakteristik pelat bipolar. Pelat bipolar dengan material dasar berbeda memberikan karakteristik yang berbeda pula.

### 2.2.2.1 Pelat Bipolar Logam

Material dasar untuk pelat bipolar ini memiliki yaitu logam. Material ini cocok untuk pelat bipolar dimana seperti yang kita ketahui material logam memiliki sifat yang cukup yang baik yaitu kekuatan yang tinggi dan konduktivitas yang baik. Namun pelat bipolar yang berbahan dasar logam juga memiliki kelemahan yaitu dapat terkorosi yang menghasilkan oksida pada permukaannya yang dapat menurunkan konduktivitas dari pelat bipolar logam itu sendiri, selain itu ion logam yang terlarut akan mengganggu membran PEM sehingga konduktivitas yang dihasilkan menjadi rendah<sup>[17]</sup>.

### 2.2.2.2 Pelat Bipolar Grafit

Pelat bipolar yang telah banyak digunakan dan dikembangkan pada sistem PEMFC adalah pelat berbasis grafit, yang memberikan beberapa keuntungan dalam hal ketahanan terhadap korosi, menghasilkan konduktivitas panas dan listrik yang baik, dan memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan pelat logam<sup>[18]</sup>. Namun, sifat mekanik yang dihasilkan buruk, karena pelat ini sangat getas dan berpori.

Akibatnya, pelat ini membutuhkan suatu proses permesinan yang kompleks dan mengkonsumsi waktu yang lebih lama, sehingga akan menaikkan biaya produksi. Grafit memiliki sifat yang getas sehingga pelat bipolar harus lebih tebal agar menghasilkan kekuatan mekanis yang cukup ketika dilakukan proses pengerjaan pelat dan perakitan sel bahan bakar. Maka dari itu, berat dan volum dari pelat bipolar grafit menjadi lebih besar sehingga susunan sel yang dihasilkan pun menjadi lebih berat. Hal ini akan meningkatkan biaya produksi dari pelat (sekitar > US\$10/pelat) sehingga menjadi pertimbangan dalam penggunaannya pada transportasi.

### 2.2.2.3 Pelat Bipolar Komposit

Jenis pelat ini dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu komposit berbasis logam dan karbon. Biasanya, pelat bipolar dengan material komposit logam menggunakan grafit berpori, plastik polikarbonat, dan *stainless steel*. Sedangkan pada komposit berbasis karbon biasa digunakan pengikat berupa polimer baik

termoplastik seperti polipropilen, polietilen, dan termoset seperti resin epoksi, resin penolik, maupun vinil ester. Komposit karbon biasanya ditambahkan bahan pengisi (*filler*) maupun fiber guna meningkatkan sifat dari pelat bipolar ini <sup>[19]</sup>.

Sifat – sifat yang dihasilkan dari pelat bipolar komposit, antara lain:

- a) Memiliki kekuatan yang cukup baik dibanding dengan material kandidat lain selain logam
- b) Memiliki berat yang lebih ringan
- c) Nilai konduktivitas yang tinggi
- d) Resistansi kontak permukaan yang sangat kecil
- e) *Gas impermeability*
- f) Harga material dan proses relatif kecil
- g) Memungkinkan untuk dibuat *prototype* berbagai dimensi
- h) Tahan korosi

### 2.3. Material Komposit

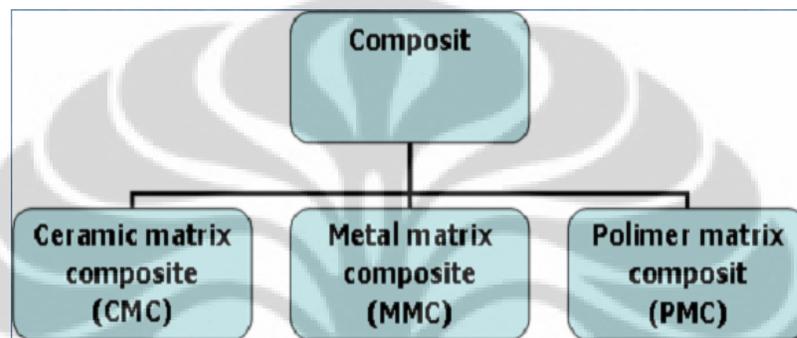
Komposit adalah material hasil kombinasi makroskopik dari dua atau lebih komponen yang berbeda, memiliki *interface* diantaranya dengan tujuan mendapatkan sifat-sifat fisik dan mekanis tertentu yang lebih baik daripada sifat masing-masing komponen penyusunnya<sup>[19]</sup>. Komposit dibuat dengan menggabungkan dua atau lebih bahan-bahan alami atau buatan untuk memaksimalkan sifat unggulnya dan mengurangi kelemahannya. Komposit biasanya digunakan sebagai pengganti logam karena mereka sama-sama kuat tapi jauh lebih ringan.

Komposit merupakan perpaduan dari dua material atau lebih yang memiliki fasa yang berbeda menjadi suatu material baru yang memiliki sifat lebih baik dari keduanya, atau dengan kata lain, komposit dibentuk dari dua atau lebih material yang berbeda menjadi satu material, untuk meningkatkan sifat mekanik dari setiap material yang dimilikinya. Komposit Terdiri atas dua bagian utama<sup>[19]</sup>, yaitu:

- 1.Reinforcement
- 2.Matrik

Salah satu bagian utama dari komposit adalah *reinforcement* (penguat) yang berfungsi sebagai penanggung beban utama pada komposit. Sedangkan matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volum terbesar (dominan). Jenis dari matriks yang digunakan dapat menentukan tipe komposit<sup>[19]</sup>.

Material komposit dapat dibagi menjadi 3 jenis sesuai dengan matriks yang digunakan seperti yang di tunjukkan gambar 2.5. pembagian material komposit berdasarkan matriksnya.



**Gambar 2. 5** Klasifikasi komposit berdasarkan bentuk dari matriks-nya

Secara umum karakteristik dari suatu material komposit dipengaruhi oleh 3 hal<sup>[19]</sup>, yaitu:

- a. Jenis material penyusunnya,
- b. Kemampubasahan matriks terhadap penguatnya
- c. Persebaran material penguat dalam material matriks.

Karena material komposit adalah material yang menggabungkan karakteristik dari material – material penyusunnya, maka karakteristik dari material penyusunnya pun sangatlah diperhitungkan. Untuk memprediksi kekuatan akhir dari material komposit, digunakan *rule of mixture*<sup>[19]</sup>.

$$E_C = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.1)$$

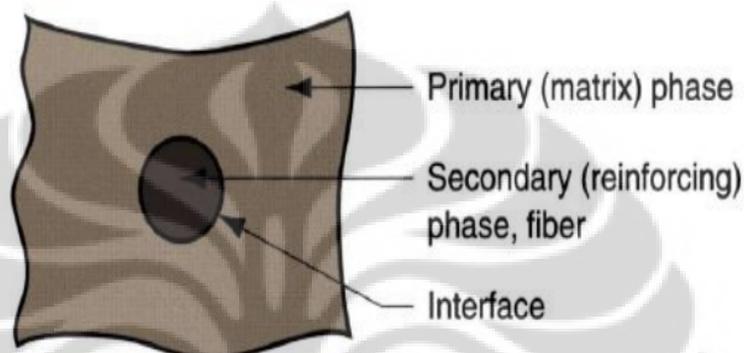
Keterangan: C Komposit; F Penguat; M Matriks

E : Modulus Elastisitas [MPa]

V : Fraksi Volume [%]

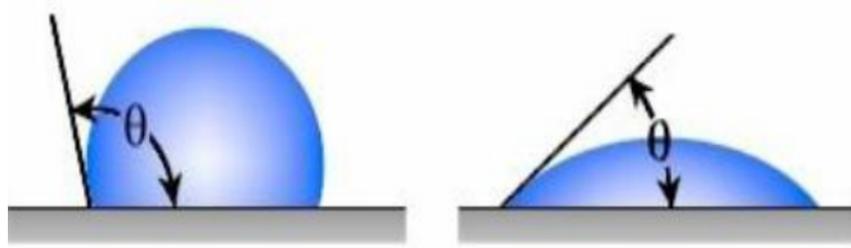
Semakin banyak jumlah suatu material dalam komposit, maka semakin besar pengaruh material tersebut terhadap sifat komposit.

Ikatan antara penguat dan matriks memiliki peran yang besar dalam penentuan sifat komposit. Hal ini berkaitan dengan fenomena antarmuka dan fenomena interfasa. Ikatan antarmuka adalah ikatan yang terbentuk antara dua fasa yang berbeda. Ikatan antarmuka berfungsi sebagai media transfer beban dari matriks dan penguat ilustrasi pada gambar 2.6<sup>[20]</sup>.



**Gambar 2. 6** fenomena antarmuka<sup>[20]</sup>

Ikatan antarmuka sangat berkaitan erat dengan kemampuan (*wettability*) dari permukaan kedua konstituen. Kemampuan dipengaruhi oleh tegangan permukaan dari ikatan tersebut. Untuk Semakin luas bidang sentuh antara permukaan, semakin besar efek yang dihasilkan dari ikatan tersebut sehingga meningkatkan sifat ikatan dari material komposit yang diinginkan. Ikatan antarmuka ini mempengaruhi kekuatan, kekakuan, dan degradasi akibat lingkungan pada material komposit<sup>[19]</sup>. Pembasahan yang baik, dibutuhkan tegangan permukaan dari penguat yang lebih tinggi daripada matriks, sehingga matriks dapat membasahi penguat dengan baik. Kemampuan dapat dilihat melalui sudut kontak (*contact angle*) dari pembasahan tersebut. Apabila sudut kontak di bawah  $90^\circ$ , maka kemampuan dari ikatan antarmuka tersebut baik, sedangkan pembasahan tidak akan terjadi apabila sudut kontak lebih dari  $90^\circ$ . Seperti yang ditunjukkan gambar 2.7<sup>[20]</sup>.



**Gambar 2. 7** Sudut Kontak. (a)  $>90^\circ$ , (b)  $<90^\circ$ <sup>[20]</sup>

Ikatan antarmuka yang terjadi ditentukan oleh sudut kontak yang terbentuk antara matriks dan penguatnya. Kemampubasahan dari permukaan padat terhadap permukaan cair dapat diketahui berdasarkan persamaan Young :

$$\gamma S = \gamma L \cos \theta + \gamma SL \quad (2.2)$$

*Work of adhesion* (WA) dari tetesan cairan pada substrat dinyatakan oleh persamaan Dupré's:

$$A = \gamma S + \gamma L - \gamma SL \quad (2.3)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.2) dan (23) maka didapat persamaan Young- Dupré:

$$A = \gamma(1 + \cos\theta) \quad (2.4)$$

dimana,  $\gamma_{SV}$  = energi bebas per unit area pada permukaan padat dan gas

$\gamma_{LV}$  = tegangan permukaan antara permukaan cair dan gas

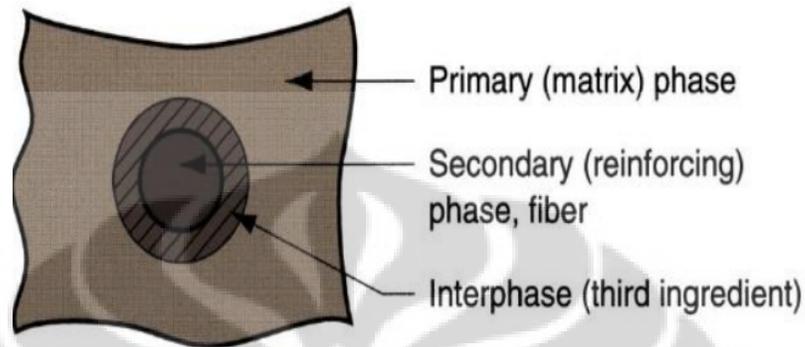
$\gamma_{SL}$  = energi interfacial

$\theta$  = sudut kontak

Ikatan antarmuka yang terjadi ditentukan oleh sudut kontak yang terbentuk antara matriks dan penguatnya.

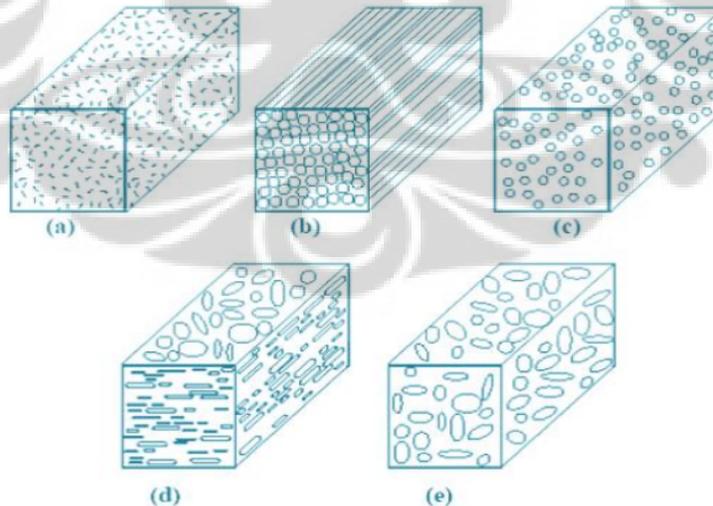
Selain ikatan antarmuka, sifat komposit juga dipengaruhi oleh ikatan antarfasa yaitu, sebuah ikatan dimana terbentuk sebuah lapisan fasa ketiga dalam suatu ikatan antarmuka. Antarfasa dapat terbentuk apabila ikatan antarmuka dari

konstituen penyusun sangat baik dan mampu berdifusi untuk menciptakan fasa ketiga seperti pada Gambar 2.8. Selain itu, dapat digunakan juga sebuah aditif untuk menciptakan ikatan antarfasa ini. Fasa ketiga ini memiliki sifat gabungan dari kedua fasa pembentuknya sehingga sangat berpengaruh terhadap sifat komposit yang terbentuk<sup>[20]</sup>.



**Gambar 2. 8** Fenomena antarfasa<sup>[20]</sup>

Dan yang terakhir adalah persebaran penguat (*reinforcement*) juga mempengaruhi sifat komposit, baik dari distribusi, konsentrasi, orientasi, ukuran maupun bentuk dari fasa, seperti yang terlihat pada Gambar 2.9<sup>[20]</sup>.



**Gambar 2. 9** Jenis komposit berdasarkan bentuk penguat (a) komposit serat pendek acak, (b) komposit serat panjang sejajar, (c) komposit partikulat, (d) komposit serpihan, (e) komposit berpengisi<sup>[20]</sup>

Pengaruh parameter fasa terdispersi<sup>[20]</sup>:

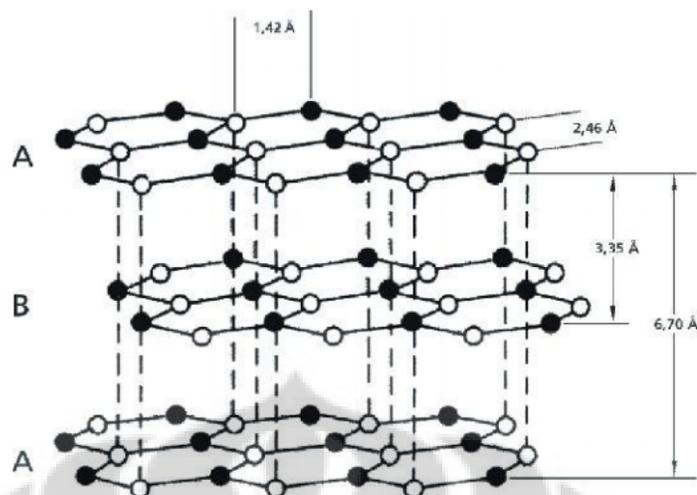
1. Fasa yang terdistribusi secara acak akan memiliki sifat yang lebih baik.
2. Semakin banyak fasa yang terdispersi dalam matriks, maka akan menghasilkan sifat mekanis yang lebih baik
3. Pada sistem komposit, penguat dengan orientasi yang searah dengan pembebanan akan mampu memberikan sifat mekanis yang lebih baik terhadap pembebanan tersebut.
4. Fasa yang memiliki bentuk silinder lebih baik karena tidak mempunyai tegangan sisa, sehingga lebih tahan terhadap pembebanan.
5. Ukuran fasa yang kecil lebih baik karena mampu menahan dan mentransfer beban.

#### **2.4. Material Pelat Bipolar Karbon-Karbon Komposit**

Material penyusun pelat bipolar harus diperhatikan karena sifat dan karakteristik dari pelat bipolar yang dihasilkan bergantung pada material yang digunakan. Material penyusun utama yang digunakan adalah grafit EAF sebagai matriks, resin epoksi sebagai pengikat, dan *multi-walled carbon nanotube* serta *carbon black* sebagai *filler*.

##### **2.4.1. Grafit**

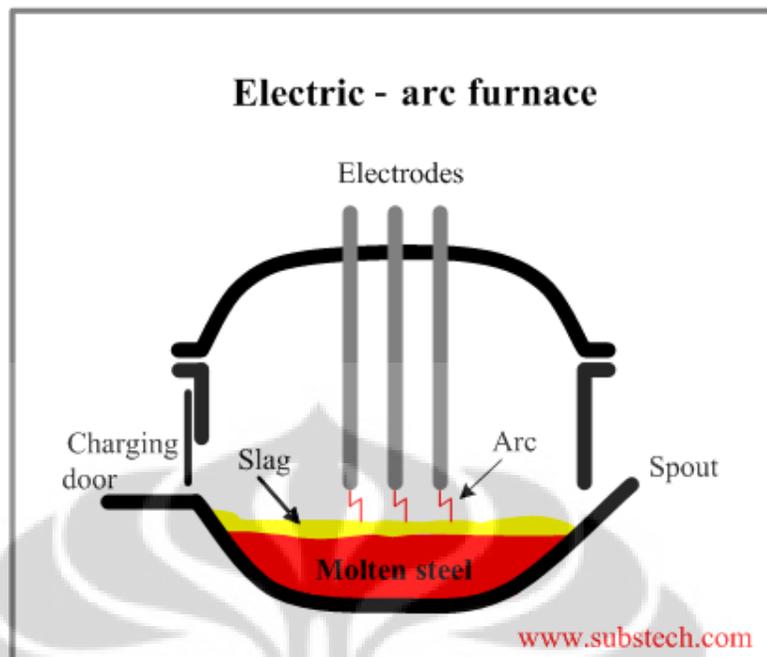
Grafit merupakan salah satu bentuk alotropi atau modifikasi dari karbon yang menyerupai struktur dari intan, tetapi memiliki sifat yang berbeda dengan intan. Grafit merupakan konduktor listrik yang baik, sedangkan intan merupakan isolator yang baik<sup>[21]</sup>. Grafit memiliki sifat kimia dan fisika antara lain antara lain. memiliki konduktivitas panas dan listrik yang sangat baik, memiliki sifat lubrikasi yang baik pada tekanan dan temperatur yang tinggi, ketahanan oksidasi dan daya tahan terhadap unsur kimia tinggi dan kemampuan untuk mengikat molekul kimia diantara lapisan grafit<sup>[22]</sup>.



**Gambar 2. 10** struktur Kristal grafit<sup>[23]</sup>

Gambar 2.10 menunjukkan struktur kristal grafit adalah hexagonal yang tersusun atas atom karbon yang terbentuk dari kisi planar dengan ikatan kovalen dan antar lapisannya memiliki ikatan Van der Waals<sup>[23]</sup>. Perbedaan jenis ikatan ini menciptakan derajat anisotropik pada grafit. Perbedaan jenis ikatan ini berada dalam arah kristalografi yang berbeda. Grafit alami terbentuk akibat tekanan dan panas yang tinggi dari dalam bumi, sedangkan grafit sintesis terbentuk secara mekanis, dimana grafit ini memiliki kekuatan mekanik yang tinggi dan mengandung sedikit abu.

. Pada penelitian ini grafit yang digunakan merupakan limbah dari dari proses *electric arc furnace* (EAF). Dimana pada proses EAF dibutuhkan suatu elektroda yang berfungsi untuk menghantarkan arus yang besar sehingga dapat melebur besi spons (*sponge iron*) dan besi tua (*scrap*) sebagai bahan baku utama pembuatan besi dan baja. Untuk mencapai tujuan ini, maka dibutuhkan suatu material yang memiliki konduktivitas yang tinggi sehingga dapat menghasilkan busur listrik. Oleh karena itu, grafit dipilih sebagai material utama untuk aplikasi elektroda. Gambar 2.11 menunjukan aplikasi dari grafit sebagai elektroda pada *Electric Arc Furnace*.

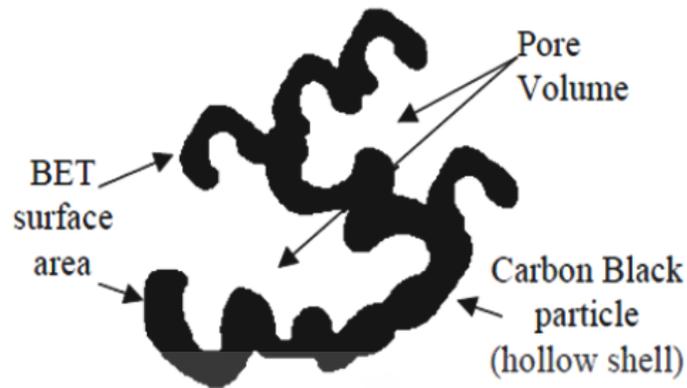


**Gambar 2. 11** Elektroda Grafit pada Dapur Busur Listrik

Grafit limbah proses peleburan besi baja digunakan sebagai matriks pada sistem komposit berbasis karbon dikarenakan harganya yang murah dibandingkan grafit sintesis lainnya dan juga mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah elektroda. Grafit dapat berfungsi sebagai aditif konduktif yang dapat mengurangi resistansi listrik dari komposit pelat bipolar<sup>[23]</sup>.

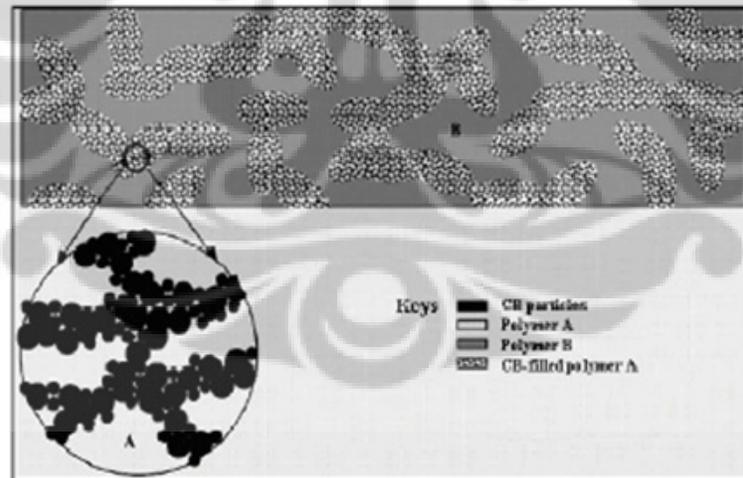
#### 2.4.2. Carbon Black

*Carbon black* merupakan padatan karbon amorf yang dibentuk dengan proses deposisi dari partikel padat dalam fasa gas. Proses deposisi tersebut terjadi karena pembakaran tidak sempurna dari hidrokarbon<sup>[24]</sup>. Struktur karbon mirip dengan struktur grafit yang acak. Ikatan antar atom didalam strukturnya dibentuk oleh ikatan van der Waals, di mana setiap atom karbon dan radikal bebas bereaksi membentuk suatu lapisan dan tersusun menjadi struktur kristal heksagonal. Setiap atom karbon dan radikal bebas dalam *carbon black* bereaksi membentuk suatu lapisan yang tersusun menjadi struktur kristal heksagonal. Struktur yang terbentuk memiliki pori dengan volum tertentu, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12<sup>[24]</sup>.



Gambar 2. 12 Struktur *Carbon Black*<sup>[24]</sup>

Pada karbon-polimer komposit, dispersi *carbon black* akan membentuk jaringan antar karbon dalam polimer. Jaringan ini berfungsi sebagai sirkuit elektrik sehingga dengan mudah dapat mengalirkan arus listrik dan mengurangi efek isolator dari polimer. Jaringan tersebut juga akan meningkatkan kemampuan prosesan komposit dan sifat mekanisnya. Morfologi jaringan secara struktur mikro dari *carbon black* pada matriks polimer dapat dilihat pada Gambar 2.13<sup>[25]</sup>.



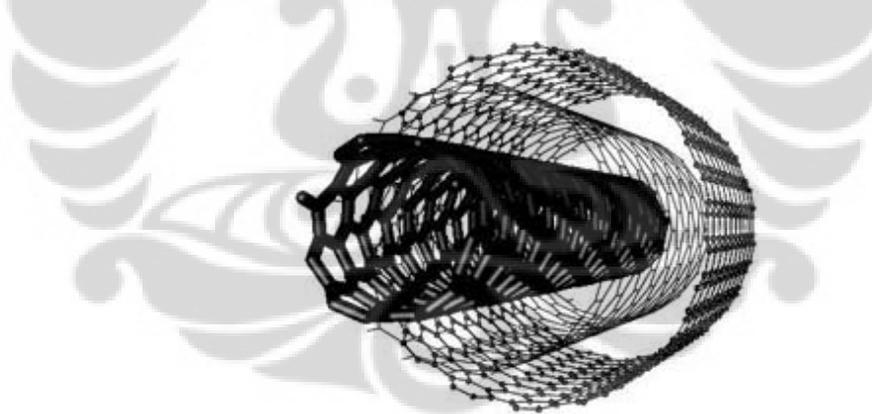
Gambar 2. 13 Dispersi *Carbon Black* pada Polimer<sup>[25]</sup>

Dalam mengoptimalkan fungsi tersebut ukuran dan komposisi dari partikel *carbon black* perlu diperhatikan. Ukuran yang semakin kecil dengan pendispersian yang merata akan mengoptimalkan pembasahan yang terjadi dalam polimer. Hal ini akan mampu meningkatkan sifat mekanis dan konduktivitas listrik karbon-polimer komposit.

### 2.4 3. Multi-walled Carbon Nanotube

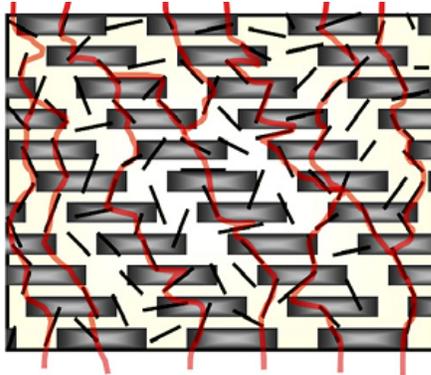
*Carbon Nano tube* merupakan karbon alotropi dengan struktur nano silinder. Bentuk dari *carbon nanotube* ini bebrbetuk tabung dengan rasio panjang diameter yaitu 132.000.000 :1. Secara umum dapat dibedakan berdasarjan jumlah dinding tabung CNT tersebut yaitu berdinding tunggal (Single Walled Carbon Nanotube/ SWCNT) dan berdiding ganda (*Multi-walled Carbon Nanotube/MWCNT*).

*Multiwalled carbon nanotube* terdiri dari lapisan gulung ganda dari grafit, dimana model dari MWCNT terbagi atas 2 yaitu, model *Russian Doll* dan *Pachment*<sup>[26]</sup>. Pada *Russian Doll* lembaran grafit tersusun dalam silinder konsentris sedangkan pada *Parchmant*, satu lembar grafit tergulung sendiri menyerupai gulungan kertas. Jarak antar lapisan dalam MWCNT mendekati jarak antara grapheme dalam grafit  $3.4 \text{ \AA}$ <sup>[26]</sup>. MWCNT memiliki morfologi sifat yang mirip dengan SWNT yaitu kekuatan yang luar biasa tinggi serta konduktivitas yang tinggi<sup>[26]</sup>.



Gambar 2. 14 Struktur MWCNT<sup>[27]</sup>

Pada karbon-polimer komposit, *multi-walled carbon nanotube* membentuk sebuah *conductive path* antara butir grafit dan grafit lainnya, *conductive path* aliran elektron pada material komposit karbon-polimer<sup>[28]</sup>. Gambar 2.15 menunjukkan skema *multi-walled carbon nanotube* membentuk *conductive path*.



Gambar 2.15 *Multi-walled carbon nanotube sebagai conductive path*<sup>[28]</sup>

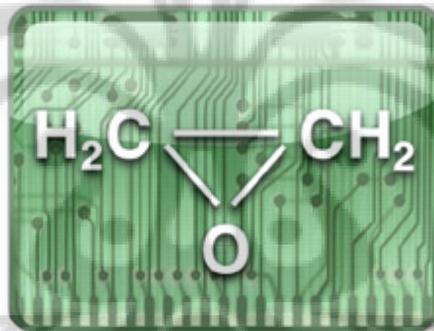
Namun konsentrasi MWCNT yang terlalu banyak dapat menyebabkan terbentuknya aglomerat pada material komposit carbon polimer. Hal ini disebabkan oleh adanya *surface area* yang besar dari *multi-walled carbon nanotube* serta gaya Van der Waals<sup>[28]</sup>, sehingga membentuk aglomerat menggumpal seperti yang di tunjukkan Gambar 2.16. Dengan adanya aglomerasi atau penggumpalan dari *multi-walled carbon nanotube* ini menyebabkan *conductive path* yang terbentuk sehingga untuk mengalirkan elektron semakin sedikit, sehingga menurunkan nilai konduktivitas.



Gambar 2.16 Aglomerasi *multi-walled carbon nanotube*<sup>[28]</sup>

#### 2.4.4. Epoksi

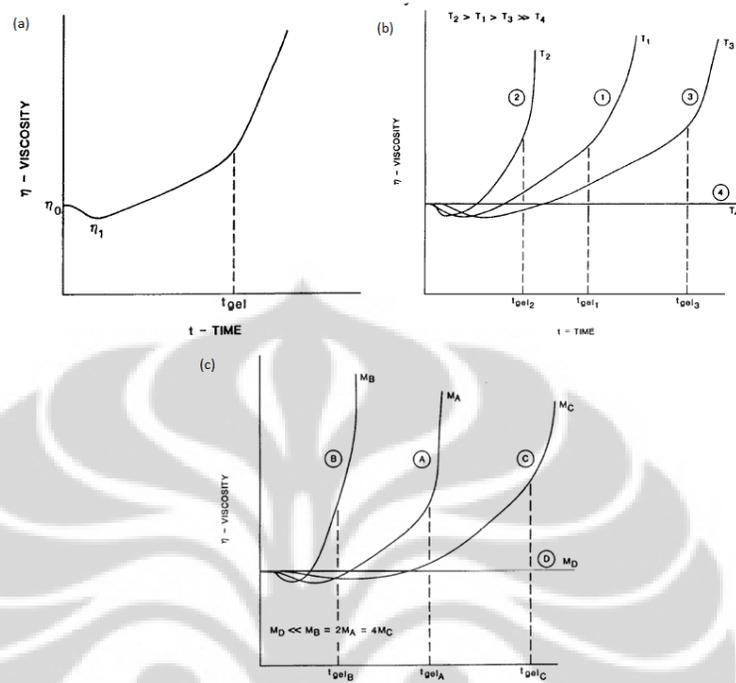
Resin epoksi salah satu jenis polimer termoset yang umum digunakan sebagai matriks atau pengikat melalui proses pemanasan pada temperatur tertentu dan tidak dapat dilakukan pemanasan ulang<sup>[29]</sup>. Epoksi dapat direaksikan dengan *hardener* agar menghasilkan reaksi *curing* dan menjadi polimer keras, yang mempunyai fungsi utama untuk membasahi seluruh permukaan grafit (matriks) agar terjadi ikatan antarmuka yang baik. Termoset sendiri merupakan material polimer yang dapat dibentuk dengan aplikasi dari panas dan tekanan, namun hasil dari reaksi kimia, akan terjadi *crosslink* secara permanen dan tidak dapat dibentuk ulang lebih lanjut dengan aplikasi panas dan tekanan (Goodman dan Schwartz)<sup>[29]</sup>. *Crosslink* adalah ikatan jaring silang ketat dalam polimer. Jenis ikatan ini berakibat epoksi tidak dapat dibentuk ulang apabila telah terjadi *curing*. Gambar 2.17 menunjukkan struktur dasar epoksi



Gambar 2. 157 Struktur Dasar Epoksi<sup>[30]</sup>

Reaksi *curing* ini dapat meningkatkan performa dari epoksi itu sendiri, yaitu dapat meningkatkan titik luluh, kekakuan, dan ketahanan terhadap pelarut. *Curing agent* yang digunakan pada golongan epoksi dapat berupa reaktan atau katalis yang memicu terjadinya ikatan jaring silang. Reaksi *curing* dalam termoset dipengaruhi oleh waktu, temperatur, dan massa seperti terlihat pada Gambar 2.18<sup>[31]</sup>. Pada tahap awal, polimer memiliki viskositas ( $\eta_0$ ). Reaksi terjadinya *crosslink* terpengaruh oleh panas. Panas yang terjadi pada reaksi eksotermis digunakan lagi untuk reaksi selanjutnya. Sehingga apabila terdapat panas dari luar sistem akan membantu mempercepat terjadinya proses *curing*. Begitu pula dengan massa *crosslink*, semakin banyak massa *crosslink* yang terjadi maka semakin

banyak panas eksotermis yang dihasilkan. Hal ini mengakibatkan semakin cepat terjadinya proses *curing*<sup>[31]</sup>.



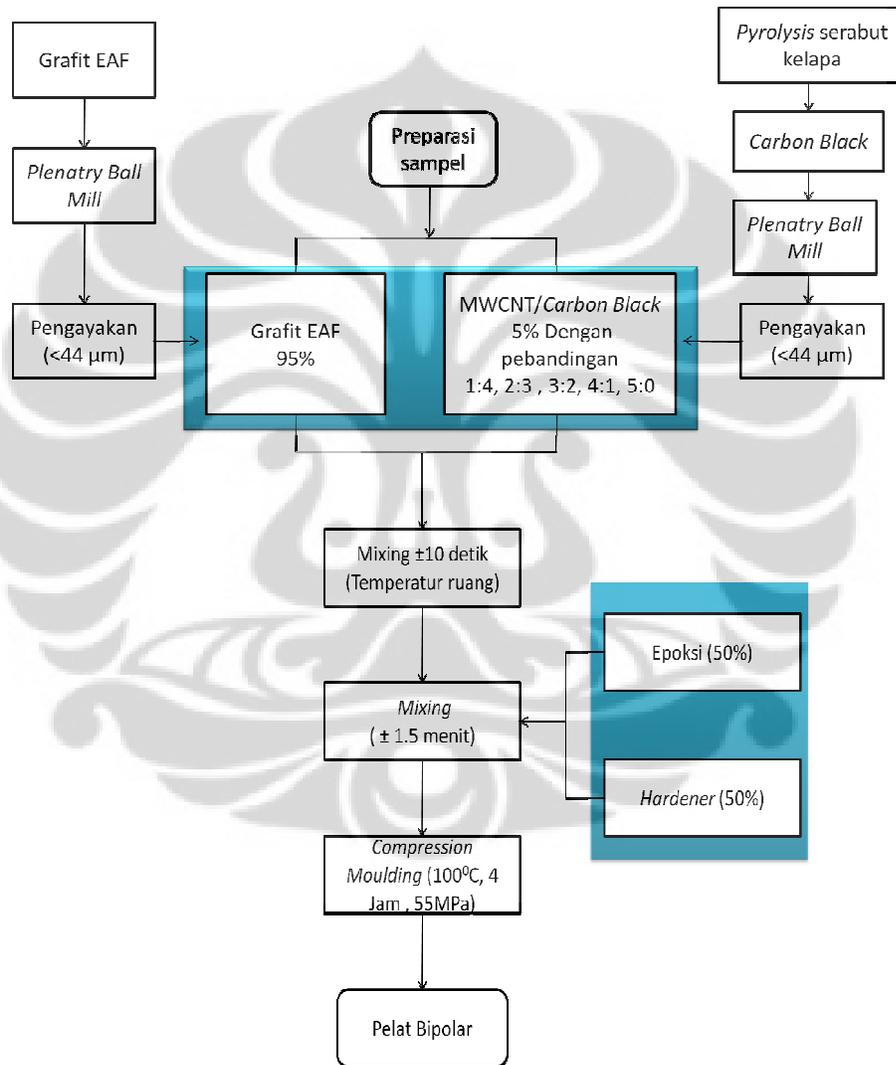
**Gambar 2. 168** Diagram *curing* epoksi pengaruh (a) Waktu ; (b) Temperatur ; (c) Massa Terhadap Viscositas Thermoset<sup>[31]</sup>

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Diagram Alir Penelitian

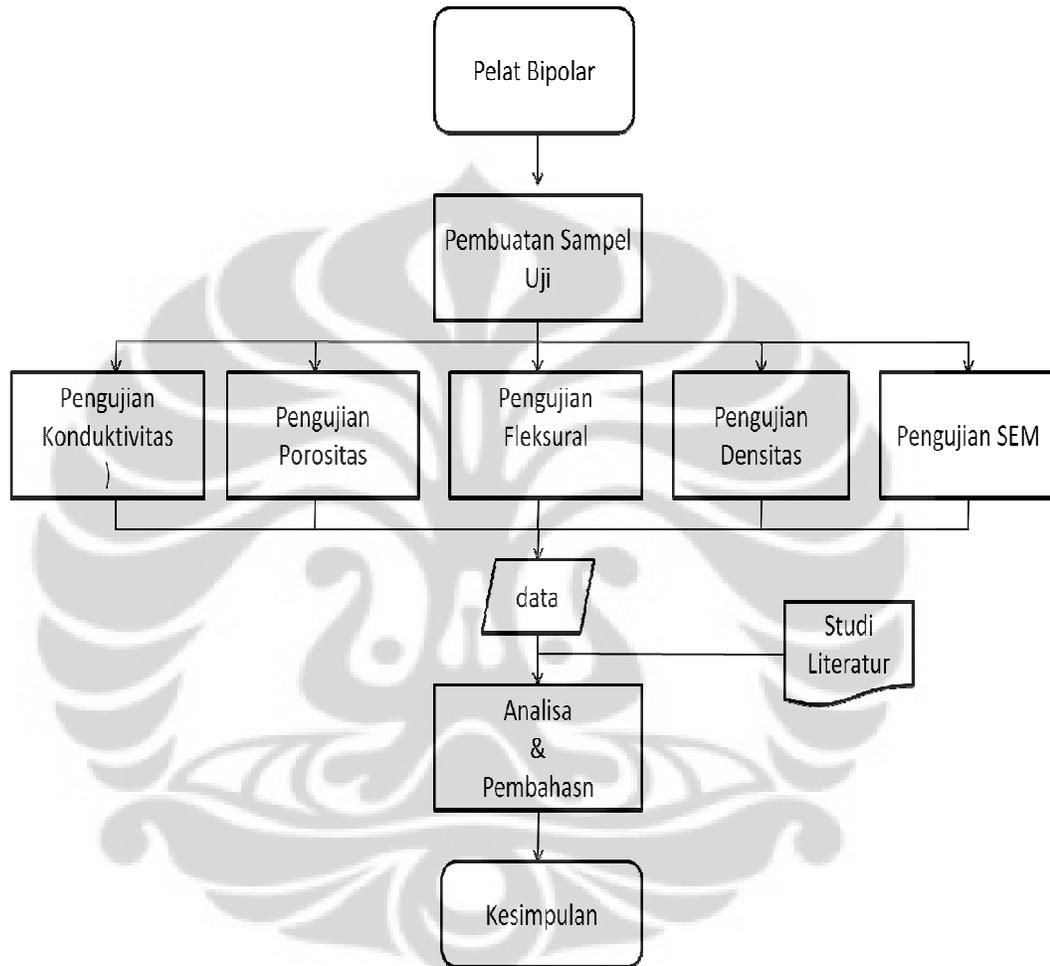
##### 3.1.1. Diagram Alir Fabrikasi Sampel



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian (Fabrikasi Sampel)

### 3.1.2. Diagram Alir Karakterisasi Sampel

Gambar 3.2 adalah diagram alir dalam pengujian grafit matriks komposit pelat bipolar



**Gambar 3. 2** Diagram Alir Penelitian (Karakterisasi Sampel)

### 3.2. Komposisi Pelat Bipolar dan Variabel Penelitian

Pada penelitian kali ini akan dibuat lima sampel dengan variabel berbeda – berbeda. Masing – masing pelat akan memiliki berat 180 gr. Variabel dari masing – masing pelat dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Komposisi Pelat Bipolar dan Variasi Penambahan MWCNT

Kode Sampel	Pelat Bipolar (180gr)					Tekanan [kg/cm <sup>2</sup> ]
	Matriks Grafit (80%= 144gr)			Reinforce Polimer (20%=36 gr)		
	Grafit EAF	<i>Multi-walled Carbon Nanotube</i>	<i>Carbon Black</i>	Epoksi	<i>Hardener</i>	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
A	95	1	4	50	50	550
B		2	3			
C		3	2			
D		4	1			
E		5	0			

### 3.3. Alat dan Bahan

#### 3.3.1. Alat

Alat yang digunakan untuk pembuatan dan karakterisasi pelat bipolar adalah:

1. Sarung Tangan
2. Masker
3. Gergaji
4. Beaker Glass 1000 ml dan 100 ml
5. *High speed mixer*
6. Spatula
7. Pipet Volume
8. Gelas Ukur
9. Thermometer
10. Timbangan Digital
11. Cetakan Pelat ukuran 15 cm x 15 cm
12. Kertas Amplas 200#, 500#, dan 1000#

13. Penggaris
14. Oven
15. Kamera Digital
16. Tissue
17. *Hydraulic Pressure Machine*
18. *Rotary Ball Milling*
19. Alat Uji Kekuatan Kekuatan , *UTM T22K JJ-Loyd Instument* (Bending 3 titik – ASTM D 790)
20. Alat Uji Konduktivitas *Veeco FPP 5000- four point probe detector*
21. Alat Uji Porositas (BET – ASTM C 20)
22. Alat Uji Densitas (ASTM D 792)
23. Pengujian FE SEM

### **3.3.2. Bahan**

Bahan – bahan yang digunakan untuk membuat sampel pelat bipolar adalah:

1. Grafit limbah EAF (*Electric Arc Furnace*)
2. Epoksi
3. *Hardener*
4. *Multi-walled Carbon Nanotube*
5. *Carbon Black*

### **3.4. Proses Pembuatan Sampel**

#### **3.4.1. *Crushing dan milling grafit***

Bongkahan elektroda grafit yang berbentuk limbah dihancurkan untuk menghasilkan ukuran partikel yang homogen dengan grafit sintesis pabrikan, maka dilakukan proses *milling* dengan *planetary ball mill* yang akan menghasilkan ukuran partikel  $< 44 \mu\text{m}$ .

### 3.4.2. Penimbangan

Bahan-bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini ditimbang untuk mendapatkan takaran sesuai formulasi pada Table 3.1. Hasil penimbangan dimasukkan ke dalam *beaker glass* untuk proses selanjutnya.

### 3.4.3. Pencampuran

Tahapan pencampuran adalah sebagai berikut :

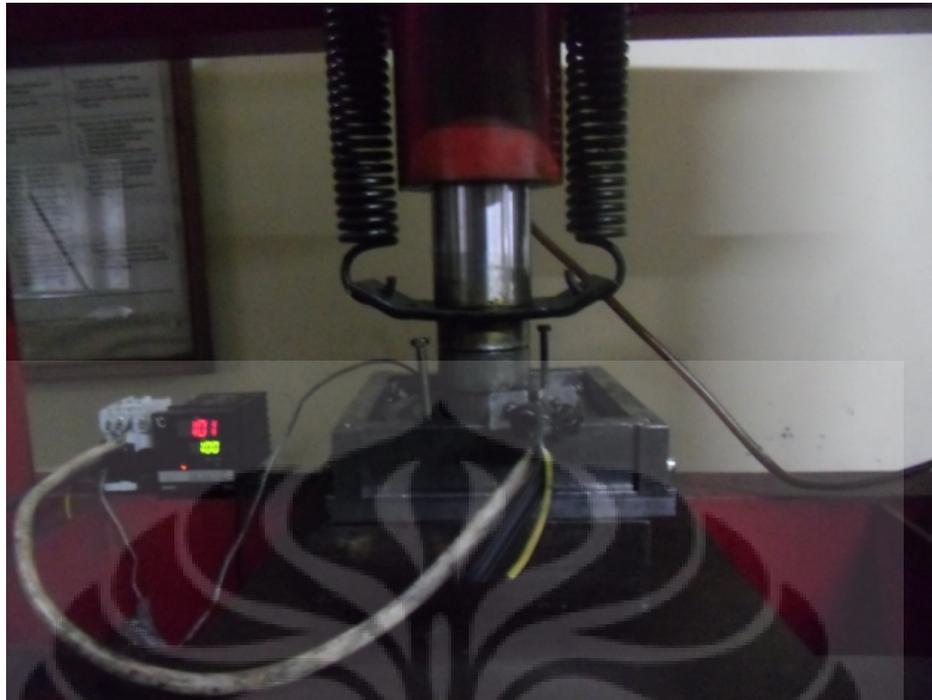
1. Masukkan grafit EAF, *multi-walled carbon nanotube* dan *carbon black* ke dalam *high speed mixer*, lalu di *mixing* hingga 10 detik.
2. Masukkan *epoxy* yang telah ke dalam *beaker glass* 1 L campur dengan hardener dengan perbandingan 1:1 lalu diaduk hingga mencampur rata
3. *Epoxy* dan *hardener* dimasukkan ke dalam *high speed mixer* yang telah berisi grafit EAF, *multi-walled carbon* dan *carbon black*, kemudian *mixing* selama  $\pm$  1.5 menit



Gambar 3. 3 High Speed Mixer

### 3.4.5. Pencetakan Pelat

Tuangkan hasil *mixing* ke dalam cetakan yang berukuran 15 x 15 x 0.4 cm, kemudian dengan mesin *hot press* dilakukan proses *setting* bahan *epoxy* selama 4 jam. Dengan tekanan 550 Mpa, dengan temperatur sebesar 100<sup>0</sup>C.



Gambar 3. 4 Proses pencetakan Pelat dengan *Hot Press*

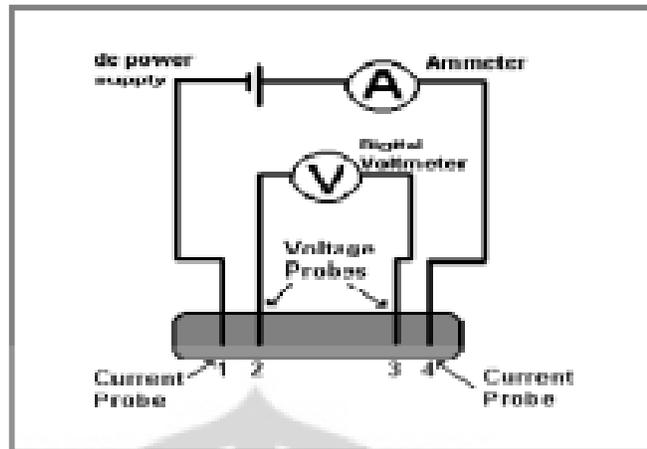
### 3.5 Pembuatan Sampel Uji

Pembuatan sampel uji dilakukan untuk pengujian tekuk, konduktivitas listrik, densitas, dan porositas. Pelat bipolar hasil pencetakan dibentuk ke dalam dimensi tertentu sesuai standar pengujian. Pada pengujian konduktivitas, densitas, dan porositas digunakan sampel berukuran 2 cm x 2 cm. Sedangkan untuk pengujian tekuk digunakan sampel berukuran 12 cm x 1,3 cm x 0,3 cm.

### 3.6 Prinsip Pengujian

#### 3.6.1 Pengujian konduktivitas listrik

Untuk pengujian konduktivitas menggunakan alat *four point probe*. Alat ini menggunakan 4 titik yang terdiri dari titik 1 dan 4 sebagai titik pengukur arus yang dibaca di ammeter, sedangkan titik 2 dan 3 sebagai pengukur tegangan yang akan dibaca di voltmeter. Skema dari alat ini dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Skema Uji Konduktivitas

Pada pengujian akan didapatkan data hasil berupa resistivitas yang selanjutnya akan dikonversi ke dalam nilai konduktivitas dengan menggunakan persamaan

$$C = \frac{1}{\rho} \dots \dots \dots (1)$$

dimana,

C = konduktivitas (S/cm)

$\rho$  = resistivitas ( $\Omega\text{cm}$ )

### 3.6.2 Pengujian densitas (rapat massa)

Pengujian ini mengacu pada ASTM D 792. Prinsip pengujiannya, yaitu dengan membandingkan massa material di udara dengan massa material di dalam air. Massa material di dalam udara akan berbeda dengan massa material di dalam air karena adanya gaya ke atas (gaya Archimedes).

Langkah pengujian adalah sebagai berikut :

1. Timbang massa sampel di udara (A)
2. Timbang massa sampel di dalam air (B)
3. Hitung temperatur air yang digunakan

Menghitung kerapatan massa/densitas dengan menggunakan persamaan, sebagai berikut:

$$\rho \text{ sampel} = \frac{A}{A-B} \times \rho \text{ air} \dots \dots \dots (2)$$

dimana,

A = massa sampel di udara (gr)

B = massa sampel di dalam air (gr)

$\rho$  air = rapat massa air pada suhu tertentu 28.5°C (0.996089 gr/cm<sup>3</sup>)

$\rho$  sampel = densitas sampel (gr/cm<sup>3</sup>)

### 3.6.3 Pengujian porositas

Pengujian ini mengacu pada ASTM C20. Langkah pengujian ini, sebagai berikut :

1. Sampel ditimbang di udara (D)
2. Sampel direndam di dalam air bersuhu 100°C selama 2 jam
3. Dinginkan di dalam air selama 12 jam
4. Timbang sampel di dalam air (S)
5. Keringkan sampel dengan kain katun dan ditimbang (Sw)

Untuk mendapatkan nilai porositas dari sampel digunakan persamaan, sebagai berikut :

$$\% \text{ Porositas} = \frac{S_w - D}{D - S} \times 100\% \dots \dots \dots (3)$$

dimana,

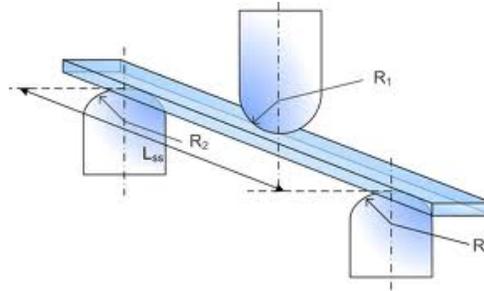
Sw = *saturated weight* (gr) setelah sampel dikeringkan

D = *dry weight* (gr)

S = *suspended weight* (gr) setelah sampel direndam 12 jam

### 3.6.4 Pengujian tekuk (*flexural*)

Pengujian ini mengacu pada ASTM D 790, yaitu “*standars test methods for flexural properties of unreinforced plastics and electrical insulating materials*”. Prinsip pengujian dengan melakukan pembebanan pada 3 titik. Dengan perincian panjang 120 mm, lebar 13 mm, dan tebal 3 mm.



**Gambar 3. 6** Skema Uji Tekuk

Pengujian ini lebih tepat digunakan untuk menentukan kekuatan pelat bipolar daripada pengujian tarik, karena dalam aplikasinya nanti, pelat bipolar lebih banyak menerima beban tekan dari gas kearah luar dibanding beban regang.

Hasil pengujian tekuk selanjutnya diolah dengan menggunakan persamaan, sebagai berikut:

$$\sigma_f = \frac{3 PL}{2 BD^2} \dots \dots \dots (4)$$

dimana,

$\sigma$  = tegangan/kekuatan tekuk (MPa)

P = beban maksimum (P)

L = panjang spesimen (mm)

b = lebar spesimen (mm)

d = tebal spesimen (mm)

### 3.6.5 Karakterisasi dengan Menggunakan FE SEM

Karakteristik struktur dengan menggunakan *Fied Emission Scanning Electron Microscope* (FE SEM) bertujuan untuk menguji menganalisa struktur pada skala mikro atau nano. Tahapan pengujian FE SEM yaitu :

1. Lakukan preparasi sampel pelat bipolar dengan memasukkan ke dalam specimen *Chamber*.
2. Specimen uji kemudian dilapisi dengan emas dalam suatu alat sputtering.
3. Lalu sampel uji diletakan di dalam *sepciment chamber* FE SEM
4. Kemudian *Speciment chamber* FE SEM dikondisikan dalam keadaan vakum.

5. Electron Beam SEM diaktifkan.
6. Dengan menggunakan kontrol komputer arahkan *specimen* sehingga diperoleh pencitraan morfologi pelat bipolar
7. Pengambilan gambar dilakukan pada beberapa titik untuk melihat kondisi morfologi permukaan sampel pelat bipolar secara keseluruhan.

Analisa foto hasil pengujian FE SEM bertujuan untuk melihat distribusi *filler (multi-walled carbonanotube dan carbon black)* pada matriks komposit, daya basah pembasahan antara epoksi dan matiks grafit serta morfologi permukaan hasil pengujian tekuk spesimen pelat bipolar.



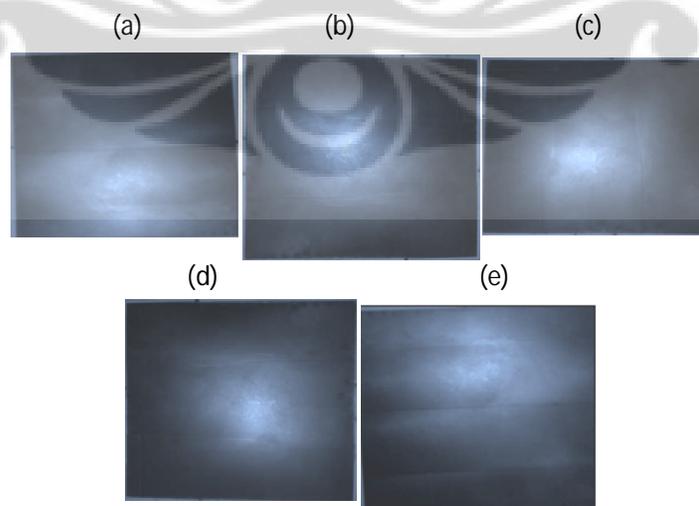
## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pengamatan Hasil Pencetakan Bipolar

Sesuai dengan metodologi yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, material – material penyusun pelat bipolar yang telah di *mixing* atau di campur, setelah itu dilakukan pencetakan pelat bipolar. Bahan-bahan dimasukkan ke dalam cetakan berukuran 15x15 cm kemudian di tekan dengan tekanan sebesar 550 MPa pada temperatur 100 °C selama 4 jam.

Hasil dari pencetakan adalah bentuk pelat bipolar telah sesuai dengan cetakannya yaitu 15 x15 cm dengan ketebalan material berkisar 3-5. Hal ini menandakan, bahwa bahan-bahan mengisi rongga cetakan dengan baik. Secara pengamatan visual, untuk permukaan pelat bipolar yang dihasilkan untuk setiap variasi *multi-walled carbon nanotube* yaitu 1%, 2%, 4% dan 5% hampir semua memiliki permukaan yang halus, tidak berpori dan berwarna hitam kecoklatan sesuai dengan material penyusun terbanyaknya yaitu grafit. Untuk setiap pelat bipolar tidak terlihat perbedaan mencolok antara setiap sampel yang memiliki perbedaan komposisi *multi-walled carbon nanotube* seperti ditunjukkan Gambar 4.1.



**Gambar 4. 1** hasil Pencetakan pelat bipolar dengan variasi komposisi *multi-walled carbon nanotube* (a) 1% MWCNT (b) 2% MWCNT (c) 3% MWCNT (d) 4% MWCNT (e) 5% MWCNT

Pada permukaan pelat bipolar yang dihasilkan memiliki relief yang merupakan jejak dari cetakan baja tahan karat, dimana jejak ini dihilangkan dengan cara diampas. Selain itu, bentuk pelat bipolar ini berbentuk melengkung. Hal ini dikarenakan beban yang digunakan sangat besar yaitu sebesar 550 MPa sehingga menyebabkan baja penahan untuk cetakan mengalami deformasi sehingga melengkung, hal ini menyebabkan pelat bipolar yang dihasilkan juga melengkung.

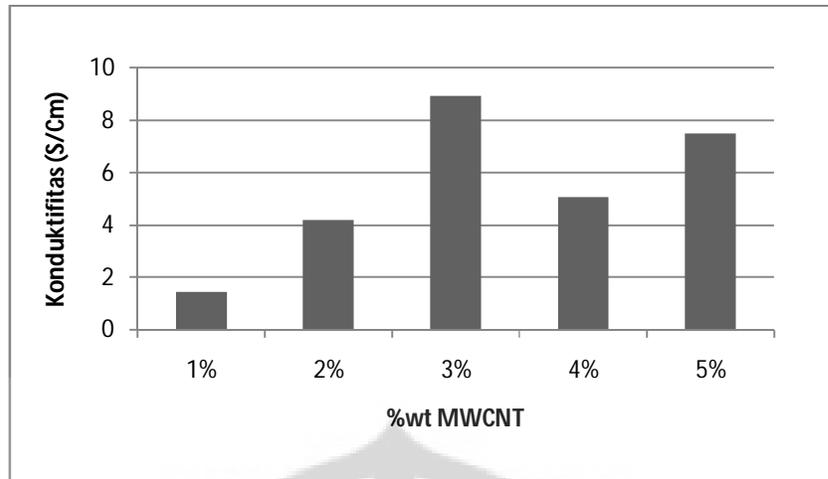
#### 4.2. Hasil Pengujian Konduktivitas

Pelat bipolar merupakan komponen yang penting dalam suatu sel tunam, yaitu sebagai pengumpul dan pembawa elektron dari anoda menuju katoda. Oleh karena itu, nilai konduktivitas dari pelat bipolar merupakan fokus yang penting dari penelitian ini. Persyaratan yang ditetapkan oleh DOE untuk sebuah pelat bipolar yaitu 100 S/cm. Sedangkan untuk nilai konduktivitas dari percobaan ini dapat dilihat pada Tabel 4.1. Dimana nilai konduktivitas ini dihasilkan pengujian *four point probe test*.

**Tabel 4.1** Tabel hasil uji konduktivitas pelat bipolar

MWCNT	Konduktivitas (S/Cm)
1%	1.45
2%	4.18
3%	8.95
4%	5.05
5%	7.51

Dilihat dari nilai konduktivitas yang dihasilkan, nilai konduktivitas masih jauh dari persyaratan DOE yaitu 100 S/cm. Namun, penambahan fraksi berat dari *multi-walled carbon nanotube* berpengaruh terhadap nilai konduktivitas yang dihasilkan.



**Gambar 4. 2** Hasil nilai konduktivitas pelat bipolar pada variasi penambahan fraksi berat multiwalled carbon nanotube 1- 5%

Terlihat pada Gambar 4.2. menunjukkan bahwa nilai konduktivitas pada pelat bipolar semakin meningkat seiring meningkatnya fraksi berat *multi-walled carbon nanotube*. Namun, nilai konduktivitas menurun pada penambahan *multi-walled carbon nanotube* sebanyak 4 %, dan 5%.

Peningkatan nilai konduktivitas pelat bipolar seiring meningkatnya fraksi berat *multi-walled carbon nanotube* yaitu 1% sebesar 1.45 S/cm meningkat menjadi 8.95 S/cm pada penambahan 3%. Hal ini dikarenakan, dengan penambahan *multi-walled carbon nanotube* membentuk sebuah *conductive path* antara butir grafit dan grafit lainnya, seperti skema pembentukan *conductive path* dapat dilihat pada Gambar 2.16.

Konduktivitas listrik dari komposit sangat bergantung pada *mutual contact* dari material-material yang konduktif untuk menciptakan suatu *conductive paths* di dalam komposit. Namun dengan keberadaan polimer epoksi pada pelat bipolar menyebabkan adanya insulator pada komposit pelat bipolar ini<sup>[32]</sup>. Dengan adanya *conductive path* yang terjadi akibat penambahan *multi-walled carbon nanotube*. Hal ini didukung, pada literatur menyebutkan bahwa secara nano struktur pada komposit grafit-polimer, *multi-walled carbon nanotube* hadir diantara grafit dan polimer<sup>[33]</sup>. Oleh karena itu, dengan adanya *multi-walled carbon nanotube* yang berukuran kecil ini meningkatkan perkolasi dan *conductivity contact* antara grafit.

Namun penambahan 4% dan 5% terjadi penurunan nilai konduktivitas pada *multi-walled carbon nanotube* yaitu 5.05 S/cm dan 7.51 S/cm dimana nilai konduktivitas pelat bipolar telah mencapai nilai 8.95 S/cm. Penurunan nilai konduktivitas ini, dikarenakan penambahan MWCNT yang terlalu banyak dapat menyebabkan terbentuknya aglomerat pada material pelat bipolar. Hal ini disebabkan oleh adanya *surface area* yang besar dari *multi-walled carbon nanotube* serta gaya Van der Waals<sup>[28]</sup>, sehingga membentuk aglomerat menggumpal seperti yang di tunjukkan Gambar 4.12. Dengan adanya aglomerat atau penggumpalan dari *multi-walled carbon nanotube* ini menyebabkan *conductive path* yang terbentuk sehingga untuk mengalirkan elektron semakin sedikit, sehingga menurunkan nilai konduktivitas.

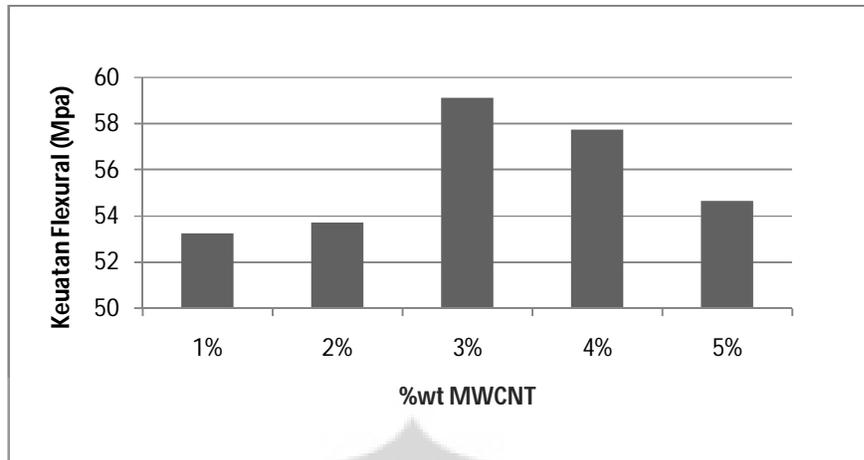
#### 4.3. Hasil Pengujian Flexural

Pengujian tekuk dilakukan pada pelat bipolar untuk mengetahui sifat mekanis dan ketahanan material pelat bipolar terhadap beban tekan. Sifat ini merupakan salah satu sifat yang penting dikarenakan pada pelat bipolar pada aplikasinya mengalami beban tekan dari gas ke segala arah. Selain itu juga berfungsi sebagai penahan dari komponen lainnya. Untuk karena itu DOE Amerika Serikat telah menetapkan target dari pelat bipolar untuk sebesar 25MPa. Data dari hasil pengujian tekuk pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Tabel hasil pengujian kekuatan flexural pelat bipolar

MWCNT	Kuatan Flexural (Mpa)
1%	53.25
2%	53.72
3%	59.11
4%	57.75
5%	54.66

Untuk nilai kekuatan tekuk dari pelat bipolar yang dihasilkan menampilkan nilai kekuatan tekuk yang memiliki selisih kekuatan yang jauh yaitu sekitar 53 MPa sampai 59 MPa



**Gambar 4.3** Nilai kekuatan flexural pelat bipolar pada variasi penambahan fraksi berat *multiwalled carbon nanotube* 1- 5%

Terlihat pada Gambr 4.3, pada penelitian kali ini menunjukkan bahwa dengan penambahan fraksi berat *multi-walled carbon nanotube*, kekuatan tekuk meningkat dan mencapai nilai kekuatan tertinggi penambahan 3% *multi-walled carbon nanotube* dan mengalami penurunan nilai kekuatan setelah penambahan 4% dan 5% *multi walled carbon nanotube*.

Penambahan *multi-walled carbon nanotube* menaikkan kekuatan tekuk dari pelat bipolar, hal ini dikarenakan *multi-walled carbon nanotube* sebagai *filler* memiliki sifat mekanis yang baik. Selain faktor penambahan *multi-walled carbon nanotube*, faktor pengurangan fraksi berat dari *carbon black* juga berpengaruh. Hal ini dikarenakan, *carbon black* pada prinsipnya memiliki struktur yang berongga atau berporos. Poros-poros tersebut yang menyebabkan adanya *stress concentration* dan menyebabkan adanya inisiasi retak<sup>[34]</sup>. Hal tersebut kekuatan dari tekuk dari komposit pelat bipolar meningkat seiring berkurangnya fraksi berat dari *carbon black* dan meningkatnya fraksi berat dari *multi-walled carbon nanotube*.

Namun, penambahan *multi-walled carbon nanotube* tidak serta merta meningkatkan kekuatan tekuk dari komposit pelat bipolar ini. Pada penambahan fraksi berat dari *multi-walled carbon nanotube* lebih dari 3% menyebabkan penurunan kekuatan tekuk pelat bipolar. Penurunan kekuatan tekuk ini

dikarenakan adanya aglomerasi *multi-walled carbon nanotube*. sama seperti poros pada *carbon black*, aglomerasi *multi-walled carbon nanotube* menyebabkan adanya *stress concentration*<sup>[35]</sup> pada material komposit pelat bipolar ini, semakin banyak aglomerat dari *multi-walled carbon nanotube* terbentuk, maka sumber *stress concentration* dan inisiasi retak pada suatu material semakin banyak dan menyebabkan material pelat bipolar ini lebih cepat mengalami kegagalan. Oleh sebab itu, kekuatan pelat bipolar pada penambahan fraksi berat 4% dan 5% *multi-walled carbon nanotube* mengalami penurunan kekuatan tekuk akibat adanya aglomerasi dari *multi-walled carbon nanotube*.

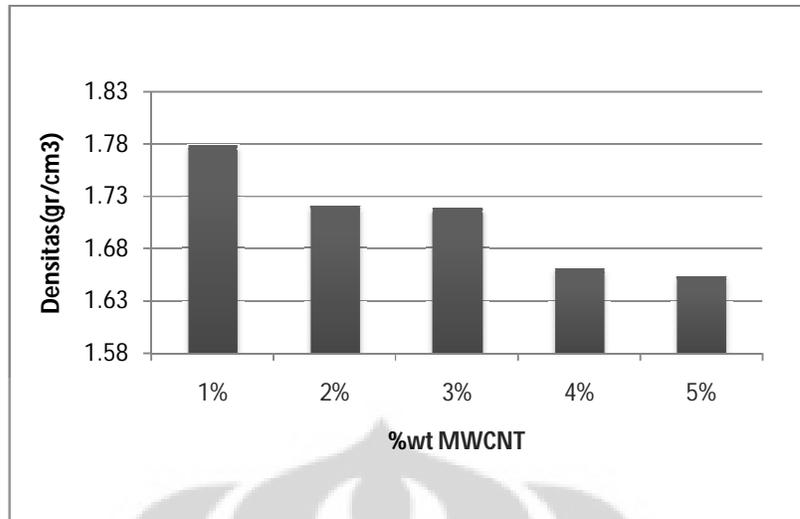
#### 4.4. Hasil Pengujian Densitas

Pengujian densitas dilakukan untuk mengetahui massa jenis dari material komposit yang dihasilkan. Dimana, pelat bipolar harus memiliki massa yang cukup yang ringan. Karena pada aplikasi sel tunam, pelat bipolar memiliki peran 80% dari total seluruh berat berat sel tunam. Hasil pengujian densitas pelat bipolar untuk variabel formula penelitian kali ini dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil uji densitas pelat bipolar

MWCNT	Densitas( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
1%	1.78
2%	1.721
3%	1.72
4%	1.66
5%	1.65

Berdasarkan nilai densitas material pelat bipolar yang dihasilkan, diperoleh data bahwa semakin besar fraksi berat MWCNT yang ditambahkan densitas dari pelat bipolar yang dihasilkan semakin menurun seperti yang di Gambar 4.4.



**Gambar 4. 4** Nilai densitas pelat bipolar pada variasi penambahan fraksi berat *multi-walled carbon nanotube* 1- 5%

Penurunan densitas ini dikarenakan nilai densitas dari material *multi-walled carbon nanotube* sendiri yang lebih rendah dari grafit dan *carbon black* sendiri. Untuk spesifikasi densitas *multi-walled carbon nanotube* yang digunakan sangat kecil yaitu  $0.28 \text{ gr/cm}^2$ . Sedangkan untuk grafit dan *carbon black* sendiri memiliki densitas yang lebih tinggi yaitu sekitar  $1.66 - 1.77 \text{ gr/cm}^2$  dan  $0.67 \text{ gr/cm}^2$ <sup>[36]</sup>. Berdasarkan standar DOE untuk pelat bipolar bobot yang diperbolehkan yaitu tidak lebih dari 200 gr/ pelat.

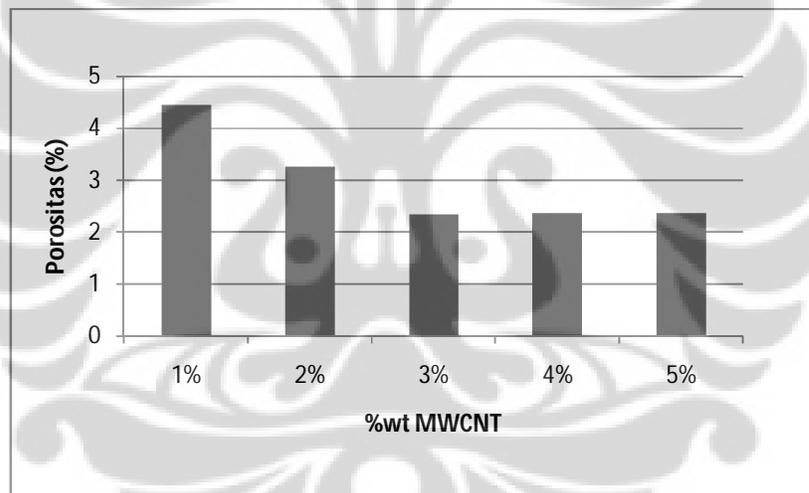
#### 4.5. Hasil Pengujian Porositas

Porositas merupakan parameter penting yang dimiliki oleh suatu material pelat bipolar, dimana porositas menentukan keberhasilan penelitian ini. Secara umum material pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC harus memiliki nilai porositas yang rendah. Dengan semakin rendahnya nilai porositas pada pelat bipolar berarti bahwa jumlah rongga ataupun *micro void* dalam struktur pelat bipolar juga cukup rendah. Sehingga dengan sedikitnya rongga akan meningkatkan nilai konduktivitas listrik dan sifat mekanis dari material tersebut. Untuk hasil pengujian porositas dari material pelat bipolar dapat dilihat dari Tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Hasil uji Porositas pelat bipolar

MWCNT	Porositas (%)
1%	4.44
2%	3.25
3%	2.33
4%	2.36
5%	2.37

Terlihat dari Gambar 4.5 persen porositas yang dihasilkan seiring dengan penambahan *multi-walled carbon nanotube* menunjukkan hasil yang turun. Namun pada penambahan diatas *multi-walled carbon nanotube* diatas 3% yaitu 4% dan 5% , persen porositas cenderung sama.



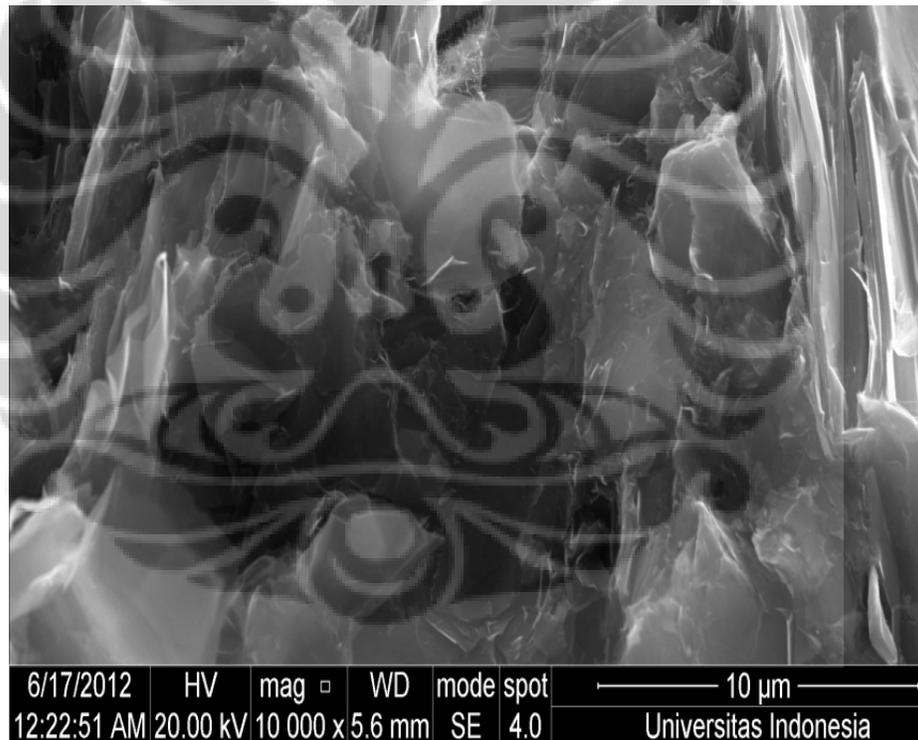
**Gambar 4. 5** hasil persen prorositas pelat bipolar pada variasi penambahan fraksi berat *multi-walled carbon nanotube* 1- 5%

Penurunan persen porositas, hal ini dikarenakan dengan penambahan *multi-walled carbon nanotube* dapat mengisi rongga- rongga atau *microvoid* yang terbentuk. Sehingga menghasilkan persen porositas yang lebih rendah dan meningkatnya nilai konduktivitas. Namun pada penambahan 4 dan 5 persen *multi-walled carbon nanotube* persen porositas cenderung statis atau sama. Hal ini dikarenakan adanya aglomerarasi dari *multi-walled carbon nanotube* yang

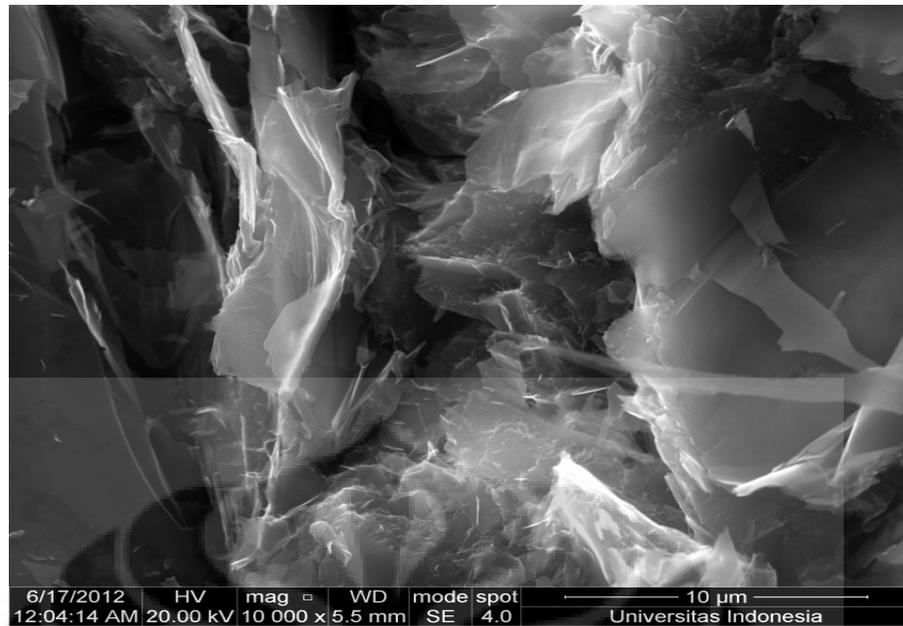
meyebabkan pengisian rongga oleh *multi-walled carbon nanotube* tidak terjadi. Selain itu, semakin besar butir aglomerasi *multi-walled carbon nanotube* yang menyebabkan roang kosong pada pelat bipolar semakin besar, sehingga porositas pada oelat bipolar cenderung meningkat.

#### 4.6. Pengamatan Foto FE SEM

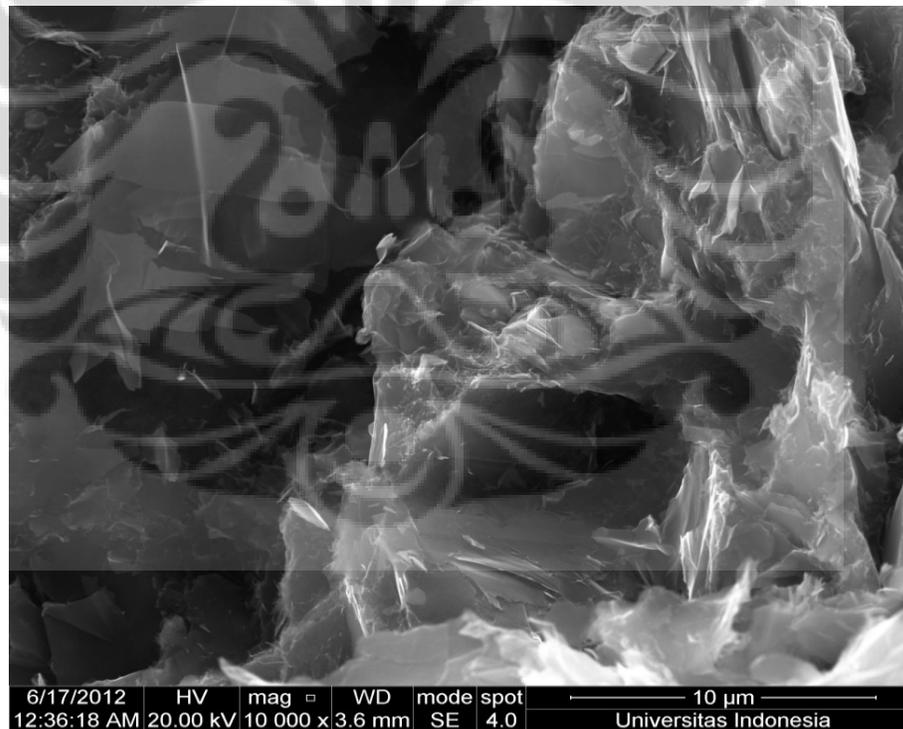
Pengamatan permukaan patahan dilakukan dengan menggunakan FE SEM di Laboratorium Uji mekanik Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia. Pengamatan dilakukan pada seluruh sampel hasil percobaan tekuk. Hasil pengamatan dengan menggunakan FE SEM ini untuk mengetahui dispersi dari *multi-walled carbon nanotube* sebagai *filler* yang di tambahkan.



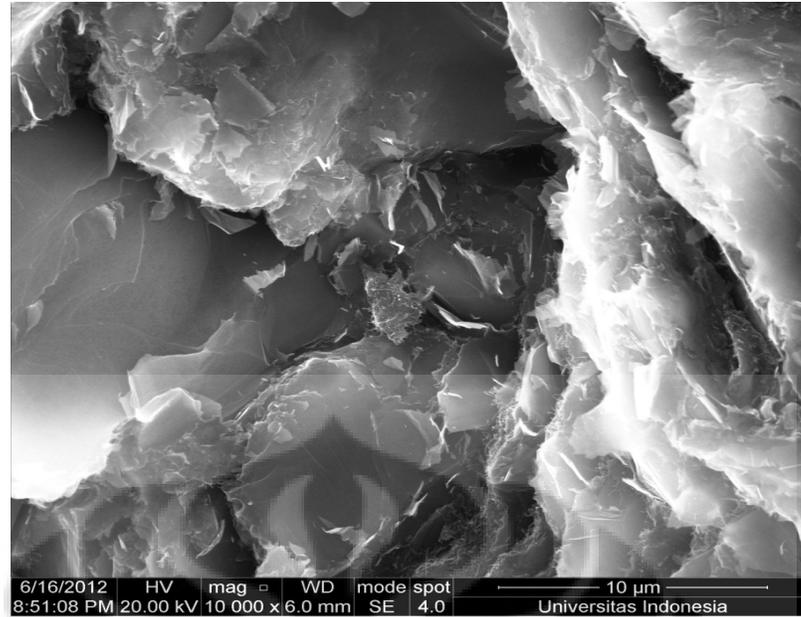
**Gambar 4. 6** Permukaan patahan pelat bipolar dengan penambahan MWCNT 1%



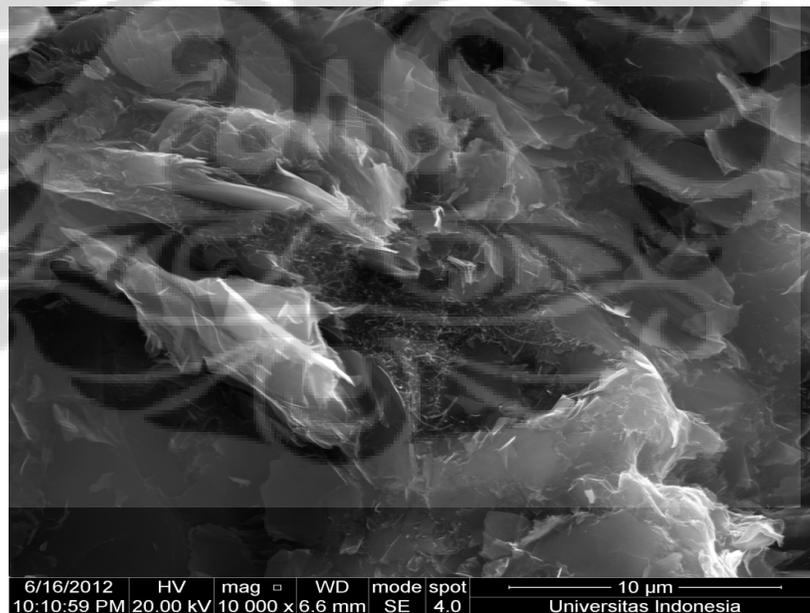
**Gambar 4. 7** Permukaan patahan pelat bipolar dengan penambahan MWCNT 2%



**Gambar 4. 8** Permukaan patahan pelat bipolar dengan penambahan MWCNT 3%



**Gambar 4. 9** Permukaan patahan pelat bipolar dengan penambahan MWCNT 4%

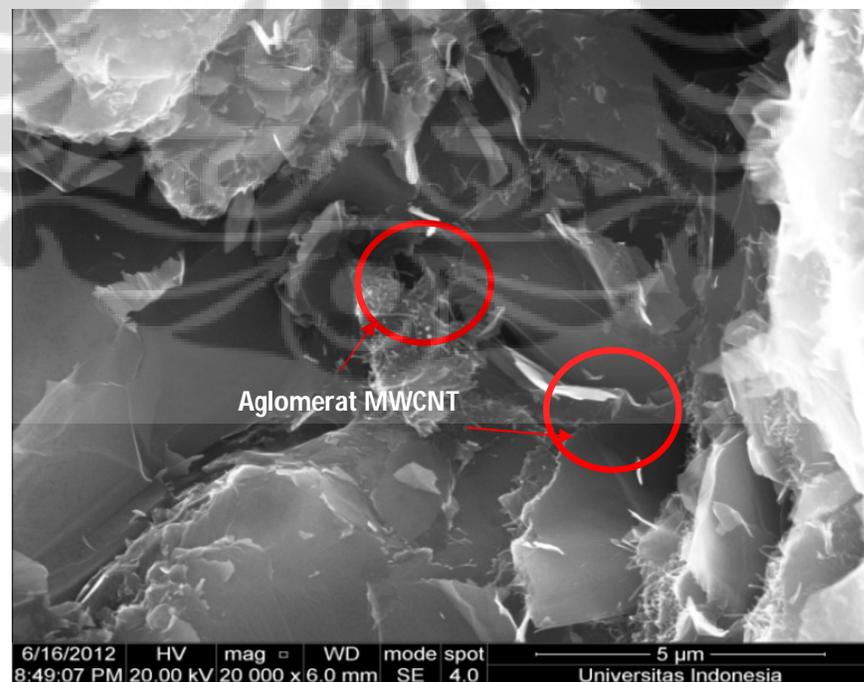


**Gambar 4. 10** permukaan patahan pelat bipolar dengan penambahan MWCNT 5%

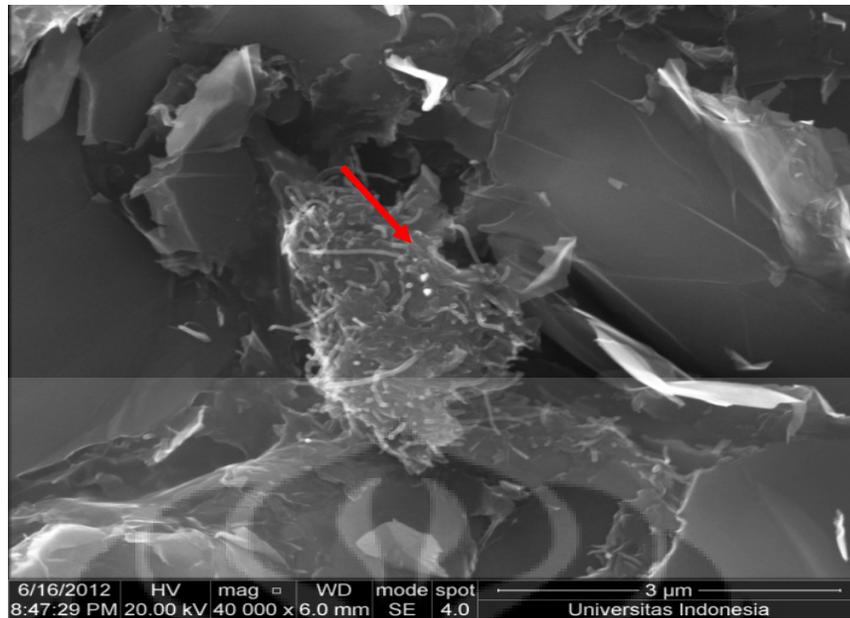
Pada Gambar 4.6, Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 terlihat bahwa dispersi dari *multi-walled carbon nanotube* telah sangat baik. Hal tersebut yang menyebabkan konduktivitas pada pelat bipolar untuk pada penambahan 3%,4% dan 5%

mengalami peningkatan, karena *multi-walled carbon nanotube* tersebar secara merata hampir diseluruh bagian pelat bipolar membentuk *conductive path* untuk mengalirkan elektron. Terlihat pada gambar juga semakin banyak persen berat dari *multi-walled carbon nanotube*, *conductive path* yang terbentuk semakin banyak sehingga jalur untuk mengalirkan elektron semakin banyak sehingga pada penambahan 3% berat *multi-walled carbon nanotube* konduktivitas meningkat.

Namun pada penambahan 4% dan 5 % MWCNT, aglomerasi *multi-walled carbon nanotube* terlihat pada Gambar 4.11 dan 4.12. Aglomerasi inilah yang menyebabkan nilai konduktivitas dan tekuk dari pelat bipolar menurun. Seperti yang telah dibahas sebelumnya bahwa aglomerasi *multi-walled carbon nanotube* meyebabkan pembentukan *conductive path* sebagai pengalir elektron berkurang sehingga nilai konduktivitas dari pelat bipolar menurun. Begitu juga dengan kekuatan tekuk, yang mengalami penurunan akibat menurun akibat adanya aglomerasi *multi-walled carbon nanotube* yang menyebabkan *stress concentration* pada komposit pelat bipolar. Gambar 4.10 menunjukkan aglomerasi *multi-walled carbon nanotube* pada penambahan dari berbagai perbesaran :

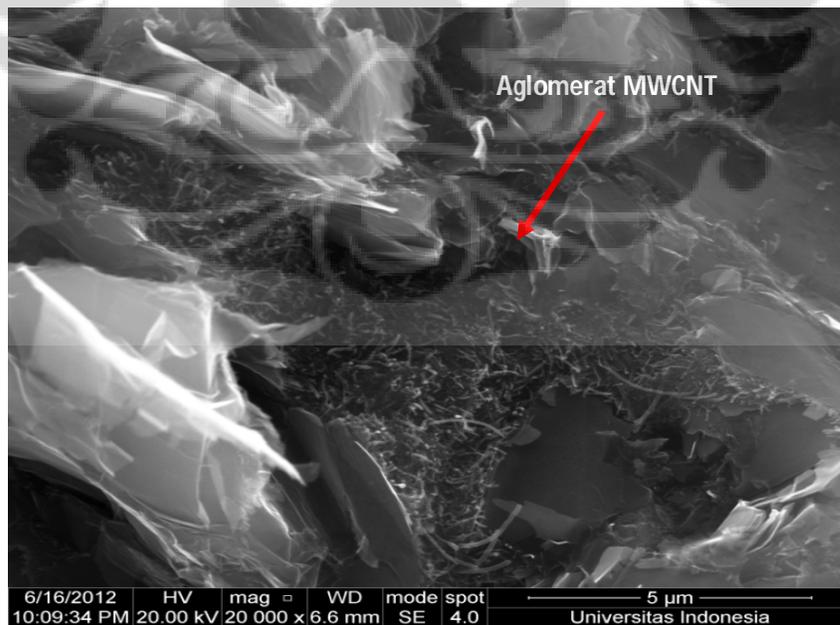


(a)

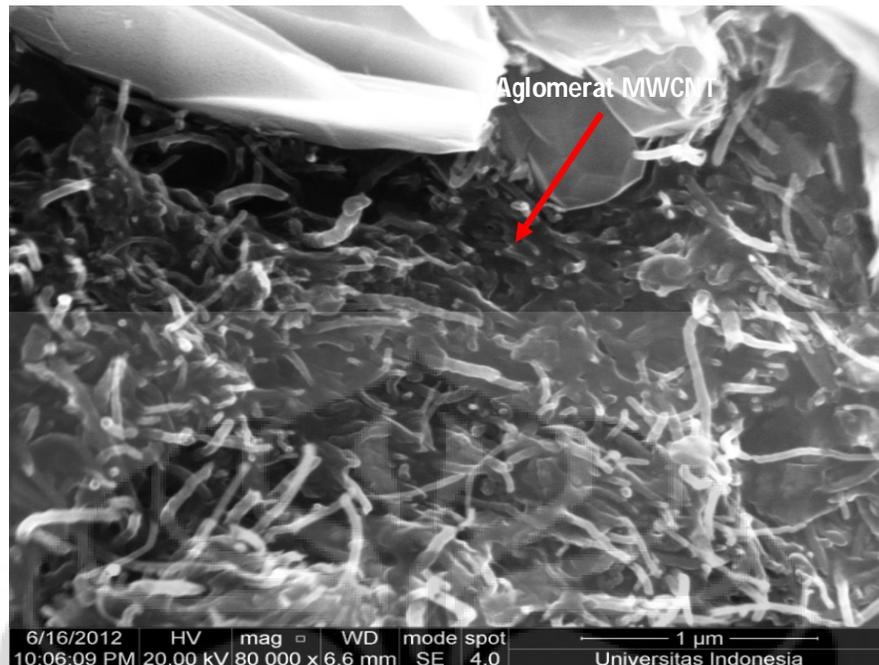


(b)

**Gambar 4. 11** Aglomerasi MWCNT pada penambahan 4% (a) perbesaran 20.000x (b) perbesaran 40.000x



(a)



(b)

**Gambar 4. 12** Aglomerat MWCNT pada penambahan 5% (a) perbesaran 20.000x (b) perbesaran 80.000x

Terlihat pada Gambar 4.11 dan 4.12 terlihat aglomerasi *multi-walled carbon nanotube* pada sampel semakin banyaknya persen *multi-walled carbon nanotube*, aglomerasi yang terbenruk semakin banyak, sehingga menurunkan sifat konduktivitas dan tekuk dari pelat bipolar.

#### 4.7. Perbandingan Sifat Pelat Bipolar

Seperti yang telah dibahas dari BAB sebelumnya pelat bipolar memiliki sifat-sifat seperti konduktivitas tinggi, kekuatan tinggi, densitas dan porositas yang rendah. Berdasarkan hasil karakterisasi pelat bipolar komposit grafit berdasarkan pengaruh penambahan *multi-walled carbon nanotube* maka didapatkan hasil sebagai berikut :

**Tabel 4.5** Tabel hasil karakteristik pelat bipolar

Sampel	Konduktivitas (S/Cm)	Kekuatan Flexural (Mpa)	Porositas (%)	Densitas( $\text{gr/cm}^3$ )
A	1.45	53.25	4.44	1.78
B	4.18	53.72	3.25	1.721
C	8.95	59.11	2.33	1.72
D	5.05	57.75	2.36	1.66
E	7.51	54.66	2.37	1.65

Terlihat pada hasil tabel 4.5 di atas bahwa, pada penambahan 3% *multi-walled carbon nanotube* memiliki sifat-sifat yang paling baik dibanding jumlah penambahan fraksi berat *multi-walled carbon nanotube* yang lain. Dimana pada penambahan fraksi berat *multi-walled carbon nanotube* sebanyak 3 % menghasilkan, konduktivitas sebesar 8.95 S/Cm dan kekuatan tekuk 59.11 Mpa yang merupakan nilai paling tinggi diantara lainnya. Sedangkan untuk nilai densitas penambahan 5% *multi-walled carbon nanotube* memiliki nilai yang paling rendah yaitu sebesar 1.65  $\text{gr/cm}^3$ . Untuk porositas, persen porositas terendah yaitu pada penambahan 5% *multi-walled carbon nanotube* dengan nilai porositas 2.33 %.

## BAB V

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Penambahan MWCNT dapat meningkatkan konduktivitas listrik pelat bipolar, dengan titik optimum penambahan 3% MWCNT yaitu sebesar 8.95 S/cm. Konduktivitas terendah pada 1% MWCNT yaitu sebesar 1.45 S/cm
2. Penambahan MWCNT meningkatkan kekuatan flexural pelat bipolar dengan nilai optimum pada penambahan 3% MWCNT yaitu sebesar 59.11 Mpa. Kekuatan terendah pada penambahan 1% MWCNT yaitu sebesar 53.25 Mpa
3. Penambahan MWCNT menurunkan densitas dari pelat komposit pelat bipolar. Densitas terendah pada penambahan 5% MWCNT dengan nilai densitas 1.65 gr/cm<sup>3</sup> dan nilai densitas tertinggi pada penambahan 1% MWCNT yaitu sebesar 1.77 gr/cm<sup>3</sup>
4. Penambahan MWCNT menurunkan porositas dengan persen porositas terendah pada penambahan 3% sebesar 2.33 % dan persen porositas tertinggi pada penambahan 1% yaitu sebesar 4.44%
5. Karakteristik pelat bipolar yang optimum terdapat pada komposisi 95% GEAF, 3% MWCNT dan 2% CB.

## DAFTAR REFERENSI

1. Diakses 15 Maret 2012 pukul 13.00 dari :  
<http://www.esdm.go.id/>
2. Chris Rayment and Scott Sherwin. *Introduction to Fuel Cell Technology*. Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame. 2002
3. Yuhua Wang. Thesis: *Conductive Thermoplastic Composite Blends for FlowField Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. University of Waterloo, Ontario, Canada, 2006.
4. Kurniawan, Rio. Skripsi: *Perancangan Komposit Pelat Bipolar dengan Penambahan Polianilin untuk PEMFC*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010.
5. Diakses 15 Maret 2012 pukul 13.00 dari :  
<http://aguzher.wordpress.com/2008/01/18/proses-produksi-baja/>
6. Hsu-Chiang Kuan, Chen-Chi M. Ma, , Ke Hong Chen, Shih-Ming Chen. *Preparation, electrical, mechanical and thermal properties of composite bipolar plate for a fuel cell*. Journal of Power Sources 2004 ; 7-8
7. US. Department of Energy. *Fuel Cell Handbook 7th Edition*. Morgantown, West Virginia: EG & G Technical Services Inc., November 2004.
8. Diakses 15 Maret 2012 pukul 13.00 dari :  
<http://www.fuelcells.org/fuel-cells-and-hydrogen/>
9. Ling Du. Dissertation : *Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. 2008.
10. Suddhasatwa Basu. *Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology*. Department of Chemical Engineering Indian Institute of Technology Delhi. 2007 ; 9-10.
11. Brent Cunningham. Dissertation: *The Development of Compression Moldable Polymer Composite Bipolar Plates for Fuel Cells*. Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University. 2007
12. Diakses 15 maret 2012. 13.30 :  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Proton-Exchange-Membrane-Fuel-Cell.html>

13. Diakses 15 maret 2012 pukul 14.00 :  
<http://www.galleries.com/minerals/elements/graphite/graphite.html>
14. Adrianowycz, Orest L. *Next Generation Bipolar Plate for Automotive PEM Fuel Cell. DOE Hydrogen Program, Advanced Energy Technology*, 2007: 9-10.
15. Allen Hermanna, Tapas Chaudhuria, Priscila Spagnolb. *Bipolar plates for PEM fuel cells : A review*.journal of hydrogen energy. 2005 ; 1298-1299
16. Diakses 16 maret 2012 : [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell)
17. Putra, Setiadi. Skripsi: *Pengaruh Tekanan Compression Moulding terhadap Performa Pelat Bipolar Komposit Karbon EAF/Resin Epoksi dengan Komposisi 5% Carbon Black*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010.
18. A. Boudghene Stambouli, E. Traversa. *Fuel cells, an alternative to standard sources of energy*. Renewable and Sustainable Energy. 2001. 298-299
19. D.Hull and T.W. Clyne. *An Introduction to Composite Materials,second edition*. Cambridge Univesity Press.2000 :20 19-21
20. F.L Matthews, R.D rawling. *Composite Materials : Engineering and science*. chapman and Hall.1994 : 36-41
21. Diakses 15 maret 2012 pukul 14.00 :  
<http://www.galleries.com/minerals/elements/graphite/graphite.html>
22. Akovali, Guneri. *Handbook of Composite Fabrication*. iSmithers Rapra Publishing, 2001. 14-17
23. Suhandi, Andi. *Research on PEMFC Graphite CompositeBipolar Plate Influenced by Composition of Filler and Binder*. Tangerang: Puspiptek Serpong, 2008.
24. Weber, Erik H. Dissertation: *Development and Modeling of Thermally Conductive Polymer/Carbon Composites*. Bachelor of Science, Michigan Technological University, 1999.
25. Xiao Zi Yuan. *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells – From Materialsto Processing*. Journal of New Materials for Electrochemical Systems, 2006. 260-261.
26. Diakses 15 maret 2012. Pukul 14.00 :  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_nanotube](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube)

27. Diakses 15 maret 2012 . pukul 14.00 :  
<https://www.jyu.fi/fysiikka/en/research/material/nanophys/moltech/research>
28. Renato A. Antunesa, , Mara C.L. de Oliveirab, Gerhard Ettb, Volkmar Ettb.  
*Carbon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membranefuel cells: A review of the main challenges to improve electrical performance.* Journal of Power Sources. 2010 : 2956-2958
29. diakses pada tanggal 15 maret 2012 pukul 14.00 dari:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy>
30. diakses 16 maret 2012 pukul 13.00 :  
<http://www.dowcorning.com/content/etronics/etronicsseal>
31. Goodman, Sydney H. *Handbook of Thermoset Plastic 2<sup>nd</sup> edition.* Noyes Publisher. 2010.
32. Shin-Yi Yang, Wei-Ning Lin, Yuan-Li Huang, Hsi-Wen Tien, Jeng-Yu Wang, Chen-Chi M. Ma, Shin-Ming Li, Yu-Sheng Wang. *Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites.* Journal of carbon. 2010 : 795
33. S.R. Dhakate, S. Sharma, N. Chauhan, R.K. Seth, R.B. Mathur. *CNTs nanostructuring effect on the properties of graphite composite bipolar plate.* journal of hydrogen energy. 2010 : 4198-4200
34. Fauziah, Farah. Skripsi: *Pengaruh penambahan 10-20% Carbon Black terhadap karakterisasi komposit epoxy/ grafit EAF sebagai material pelat bipolar PEMFC.* Departemen Metalurgi dan Material FTUI. 2009
35. Yu M, Lourie O, Dyer MJ. *Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load.* Science 2000;287:637–40
36. Diakses 15 mei 2012 :  
<http://www.asiinstr.com/technical/Material Bulk Density Chart C.htm>

## LAMPIRAN

## Lampiran 1 komposisi Pelat Bipolar

Kode Sampel	Pelat Bipolar (180gr)					Tekanan [kg/cm <sup>2</sup> ]
	Matriks Grafit (80%= 144gr)			Reinforce Polimer (20%=36 gr)		
	Grafit EAF (95%)	<i>Multi-walled Carbon Nanotube</i>	<i>Carbon Black</i>	Epoksi (50%)	<i>Hardener</i> (50%)	
	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	
A		1.44	5.76			550
B		2.88	4.32			
C	136.8	4.32	2.88	18	18	
D		5.76	1.44			
E		7.2	0			

Lampiran 2 Tabel Hasil Uji Densitas

% MWCNT	Sampel	Densitas(gr/cm <sup>3</sup> )	Densitas rata-rata (gr/cm <sup>3</sup> )
1%	1	1.72	1.77
	2	1.85	
	3	1.82	
	4	1.72	
	5	1.75	
2%	1	1.74	1.72
	2	1.71	
	3	1.76	
	4	1.75	
	5	1.70	
3%	1	1.82	1.71
	2	1.79	
	3	1.63	
	4	1.82	
	5	1.51	
4%	1	1.68	1.66
	2	1.66	
	3	1.60	
	4	1.64	
	5	1.71	
5%	1	1.66	1.65
	2	1.68	
	3	1.55	
	4	1.67	
	5	1.684	

Contoh perhitungan

\*Sampel 3% (Kode 1)

$$\rho \text{ sampel} = \frac{A}{A-B} \times \rho \text{ air} = \frac{0.46}{0.46-0.21} \times 0,99777 = 1,82$$

**Lampiran 3** Tabel Hasil Uji Flexural

% MWCNT	Sampel	Kekuatan Flexural (MPa)	Kekuatan Flexural rata-rata (MPa)
1%	1	55.8	53.25
	2	48.48	
	3	61.52	
	4	61.30	
	5	59.68	
2%	1	53.96	53.72
	2	13.84	
	3	26.03	
	4	47.84	
	5	53.47	
3%	1	35.87	59.11
	2	47.96	
	3	59.03	
	4	57.37	
	5	60.93	
4%	1	44.27	57.75
	2	60.43	
	3	49.24	
	4	60.06	
	5	52.75	
5%	1	31.28	54.65
	2	51.53	
	3	39.71	
	4	27.31	
	5	57.77	

**Lampiran 4** Tabel Hasil Uji Konduktivitas

% MWCNT	Resistivitas	Konduktivitas	Konduktivitas Rata-rata (S/cm)
1%	0.85	1.16	1.45
	0.93	1.06	
	1.52	0.65	
	0.29	3.42	
	1.05	0.95	
2%	0.47	2.12	4.17
	0.19	5.19	
	0.16	5.90	
	0.16	5.93	
	0.57	1.73	
3%	0.21	4.76	8.94
	0.06	14.61	
	0.06	14.66	
	0.211	4.73	
	0.16	5.94	
4%	0.27	3.66	5.04
	0.27	3.66	
	0.12	7.81	
	0.12	7.81	
	0.27	3.70	
5%	0.10	9.42	7.50
	0.07	13.75	
	0.07	13.75	
	2.86	0.34	
	3.78	0.26	

Contoh perhitungan

\*Sampel 3% (Kode 3)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = 1/0.0684 = 14.61 \text{ S/cm}$$

Lampiran 5 Tabel Hasil Uji Porositas

% MWCNT		D	S	Sw	porositas	rata2
1%	1	0.64	0.32	0.66	6.25	4.44
	2	0.62	0.29	0.64	6.06	
	3	0.62	0.28	0.63	2.94	
	4	0.67	0.3	0.68	2.70	
	5	0.83	0.36	0.85	4.25	
2%	1	0.72	0.32	0.73	2.50	3.25
	2	0.9	0.41	0.91	2.04	
	3	0.94	0.42	0.96	3.84	
	4	0.69	0.31	0.7	2.63	
	5	0.66	0.28	0.68	5.26	
3%	1	0.83	0.39	0.84	2.27	2.33
	2	0.96	0.42	0.97	1.85	
	3	0.97	0.44	0.98	1.88	
	4	0.78	0.35	0.79	2.32	
	5	0.54	0.24	0.55	3.33	
4%	1	0.83	0.4	0.84	2.32	2.36
	2	0.8	0.4	0.81	2.50	
	3	1.05	0.59	1.06	2.17	
	4	0.93	0.42	0.94	1.96	
	5	0.64	0.29	0.65	2.85	
5%	1	0.57	0.14	0.58	2.32	2.36
	2	0.49	0.12	0.5	2.70	
	3	0.53	0.12	0.54	2.43	
	4	0.74	0.25	0.75	2.04	
	5	0.55	0.12	0.56	2.32	

Contoh perhitungan

\*Sampel 3% (kode 1)

$$\% \text{ Porositas} = \frac{Sw-D}{D-S} \times 100\% = \frac{0.98-0.97}{0.97-0.44} \times 100\% = 1.88 \text{ MPa}$$

## Lampiran 6 Spesifikasi MWCNT

**Multi Walled Nanotubes-MWNTs  
30-50nm Specifications**

MWNTs Outer Diameter: 30-50nm

MWNTs Inside Diameter: 5-10nm

MWNTs Ash: <1.5 wt%

MWNTs Purity: >95 wt%

MWNTs Length: 10-20um

MWNTs Specific Surface Area:  $60 \text{ m}^2/\text{g}$

MWNTs Electrical Conductivity: >100 S/cm

MWNTs Bulk density: 0.28 g/cm<sup>3</sup>

MWNTs True density:  $\sim 2.1 \text{ g/cm}^3$



*A TEM image of our Multi Walled Nanotubes-MWNTs 95wt% 30-50nm OD*

## Lampiran 7 Spesifikasi Resin Epoxy





Technical Information

---

## Bakelite® EPR 174

### Unmodified, liquid standard epoxy resin based on Bisphenol-A

Properties	Unit	Value
Viscosity at 25 °C	mPa.s	13000 ± 2000
Epoxy equivalent	g/equiv.	189 ± 5
Hydrolyzable calorine content	%	< 0.05
Colour according to the Gardner scale		< 1

**Curing agent**  
According to the purpose of application, all usual cold, warm and hot curing agents.

**Applications**  
As standard resin suitable for moulding, adhesive and lamination sectors, and for low solvent free paints and coating masses.

**Shelf Life**  
In sealed containers at room temperature at least one year. Bakelite® EPR 174 can crystallize under certain circumstances after longer storage. The crystallization can be removed by heating to 60-70 °C and stirring.

**Precautions**  
When handling Bakelite epoxy resins and Bakelite hardeners, will you please observe the APME documentation "epoxy resins and curing agents".



## Lampiran 8 Spesifikasi Resin Hardener

TECHNICAL DATA SHEET	
EPOXY HARDENER V-140	
Epoxy Hardener V-140 is a reactive polyamide resin based on dimerized fatty acid and polyamines and designed for use with solid or liquid epoxy resin. Epoxy Hardener V-140 offers ambient cure, excellent adhesion and resistance properties which may be used in high solid coating, adhesive, sealant, primer, and enamel paint formulations, putties and small casting.	
<b>SPECIFICATION :</b>	
Appearance	: Brown clear liquid
Colour (gardner)	: <10
Viscosity (poise/25°C)	: 100-200
Amine Value (mg KOH/g)	: 335-350
<b>TYPICAL PROPERTIES :</b>	
Theoretical Amino Hydrogen Equi. Wt.	: 105
Solid %	: 100
Mix ratio with 190 EEW Epoxy Liquid	: 55 (phr)
<b>TYPICAL PROPERTIES IN A CURED COATING :</b>	
Tack Free Time, hours	: 5
Pot Life, minutes	: 120
Geltime, minutes	: 108
Through Cure Time, hours	: 23
<b>TYPICAL CURED RESIN PROPERTIES :</b>	
Hardness (shore D)	: 84
Tensile Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 410
Flexural Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 810
Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 740
Shear Adhesive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 160
<b>CHEMICAL RESISTANCE PROPERTIES :</b>	
(weight change after 10 days immersion, %)	
Water distilled	: 0.4
10% Hydrochloric Acid	: 1.0
10% Sodium Hydroxide	: 0.5
5% Sodium Chloride	: 0.5
10% Sulfuric Acid	: 1.3
Methyl Ethyl Ketone	: 35
Xylene	: 0.6
Mineral Spirits	: 0.1

*Pt. Datas Kimia*  
LAKARYA

## Lampiran 9 Spesifikasi Grafit EAF PT. Krakatau Steel

WED, 29-JUL-09 12:20 DIV SSP II PTKS CLG 62 0254 371184

Pt. Krakatau Steel) ITEM MASTER CARD REF.  
 CILEGON  
 INVENTORY CONTROL SYSTEM Item No : 01518429  
 DATE : 09.07.2008  
 GROUP/CLASS : 443019132  
 Nato-name : ELECTRODE,

Material Code Name & Specification	Material Group	Unit	B O H	Min	Max
01518429 GRAPHITE,ELECTRODE-D610X2700-60-66KA		KG	169,298.900	350,000.000	1000,000.000

GRAPHITE ELECTRODE  
 GRADE : ULTRA HIGH POWER (UHP)  
 DIA : NOMINAL 610 MM (24 INCH)  
 ACTUAL 608 - 613 MM  
 LENGTH : 2700 MM  
 POROSITY : 15 TO 26 %  
 BULK DENSITY : 1.66-1.72 GR/CC  
 RESISTANCE : 5.6-6.0 OHM/M  
 YOUNG MODULUS : 900-1250 KGF/MM2  
 THERMAL CONDUCTIVITY : 120-300 W/MK  
 COMPRESIVE STRENGTH : 260-262 KG/CM2  
 CURRENT CARRYING CAPASITY : 60-66 KA  
 ASH CONTENTS : 0.5% MAX  
 COMPLETE WITH :  
 -1 EA NIPPLE TRANSPORT FOR 100 TON GRAPHITE ELECTRODE  
 -1 EA EXTRA LONG NIPPLE FOR 30 TON GRAPHITE ELECTRODE  
 -1 EA ELASTIC CRANE SUSPENSION GEAR FOR 200 TON -  
 GRAPHITE ELECTRODE

## MANUFACTURE :

\*\*\*\*\*  
 NCK ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA  
 SDK ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA  
 SEC ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA  
 SGL ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA  
 TOKAI ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA.  
 UCAR ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA.

(Lanjutan)

MED, 29-JUL-09 12:21 DIV SSP II PTKS CLG 62 0254 371184

P.0

CILEGON

INVENTORY CONTROL SYSTEM Item No : 00908011

DATE : 04.12.2007

GROUP/CLASS : 443019132

Nato name : ELECTRODE,

Material Code	Material Unit	B O H	Min	Max
Name & Specification Group				

00908011	KG	9.000	50,000.000	150,000.000
----------	----	-------	------------	-------------

GRAPHITE,ELECTRODE-D406X1800MM-20-46KA

GRAPHITE ELECTRODE

GRADE: ULTRA HIGH POWER (UHP)

DIA.: 406 MM

LENGTH: 1800 MM

POROSITY: 15 - 26%

BULK DENSITY: 1.66-1.72 GR/CM3

RESISTANCE: 5.0-6.0 OHM/M

THERMAL CONDUCTIVITY: 120-300 W/MK

COMPRESIVE STRENGTH: 260-262 KG/CM2

CURRENT CARRYING CAPACITY: 20-46 KA

WEIGHT OF EACH SET POLE &amp; NIPPLE: +/- 410KG

ASH CONTENTS: 0.5% MAX

AVERAGE LINEAR COEFICIENT OF THERMAL EXPANS:

(0.5-2.5)X0.000001/K

COMPLETE WITH ACCESSORIES :

- 3 EA NIPPLE TRANSPORT FOR 20 TON GRAPHITE ELECTRODE

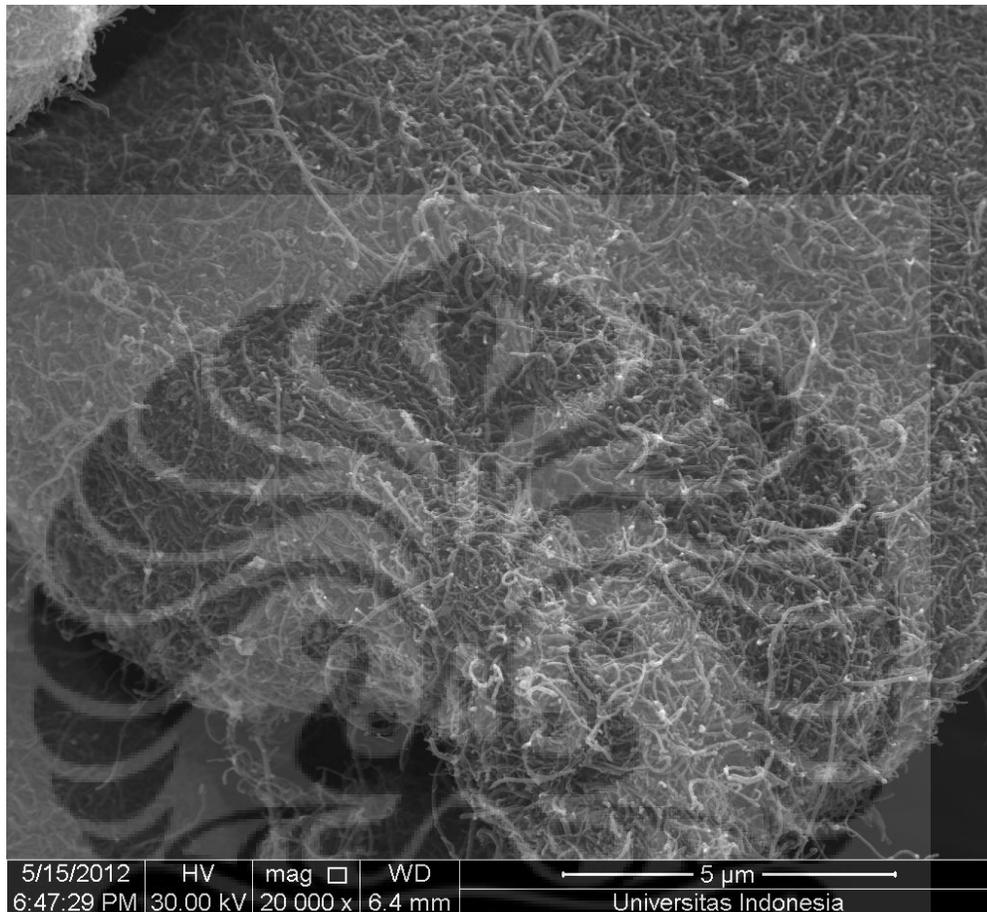
- PRESET LONG NIPPLE

- 1 EACH ELASTIC CRANE SUSPENSION GEAR FOR ELECTRODE 16 TN

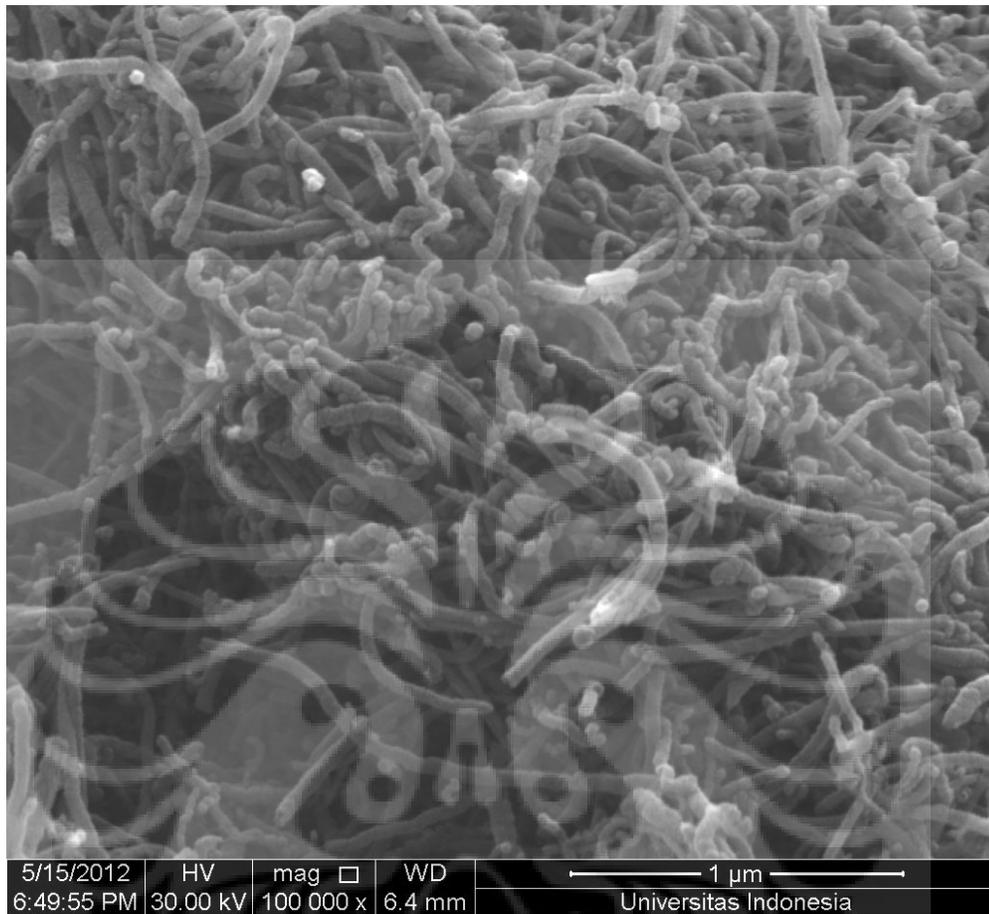
MANUFACTURE :

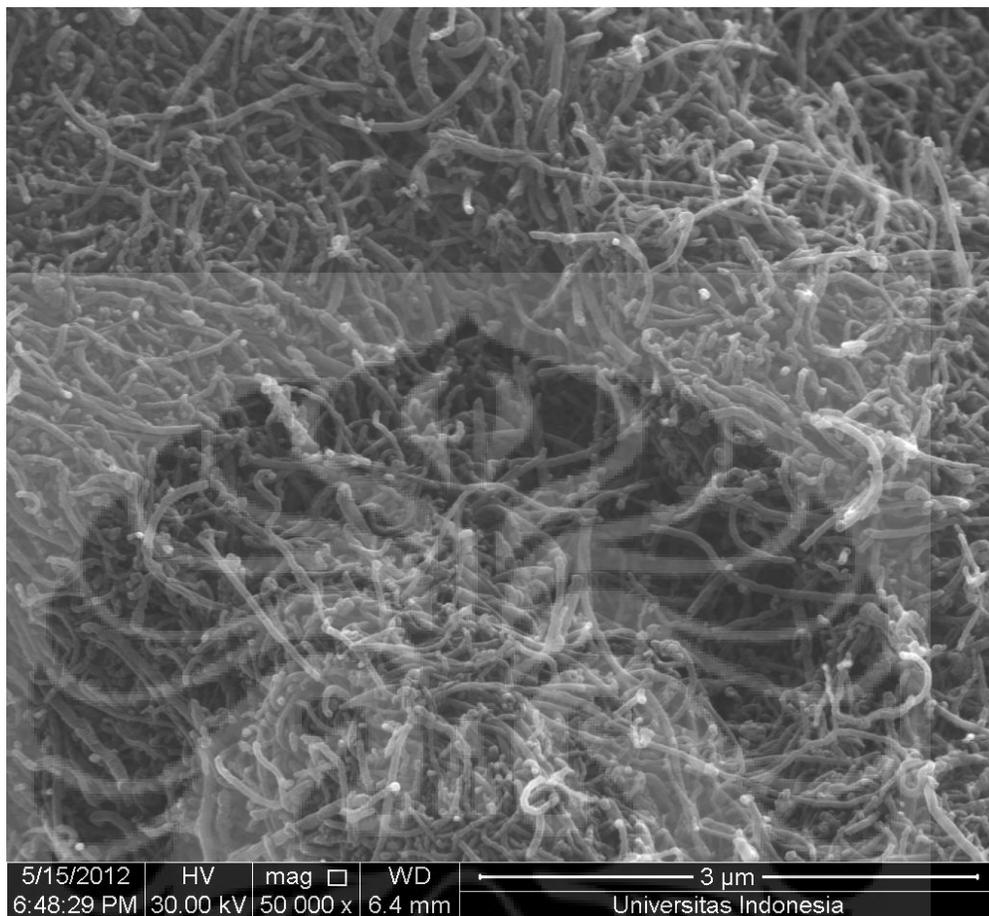
GENSUPP ELECTRODE-ARC-D406MMX1800MM-20-46KA

**Lampiran 10** MWCNT sebelum di mixing perbesaran 20.000x

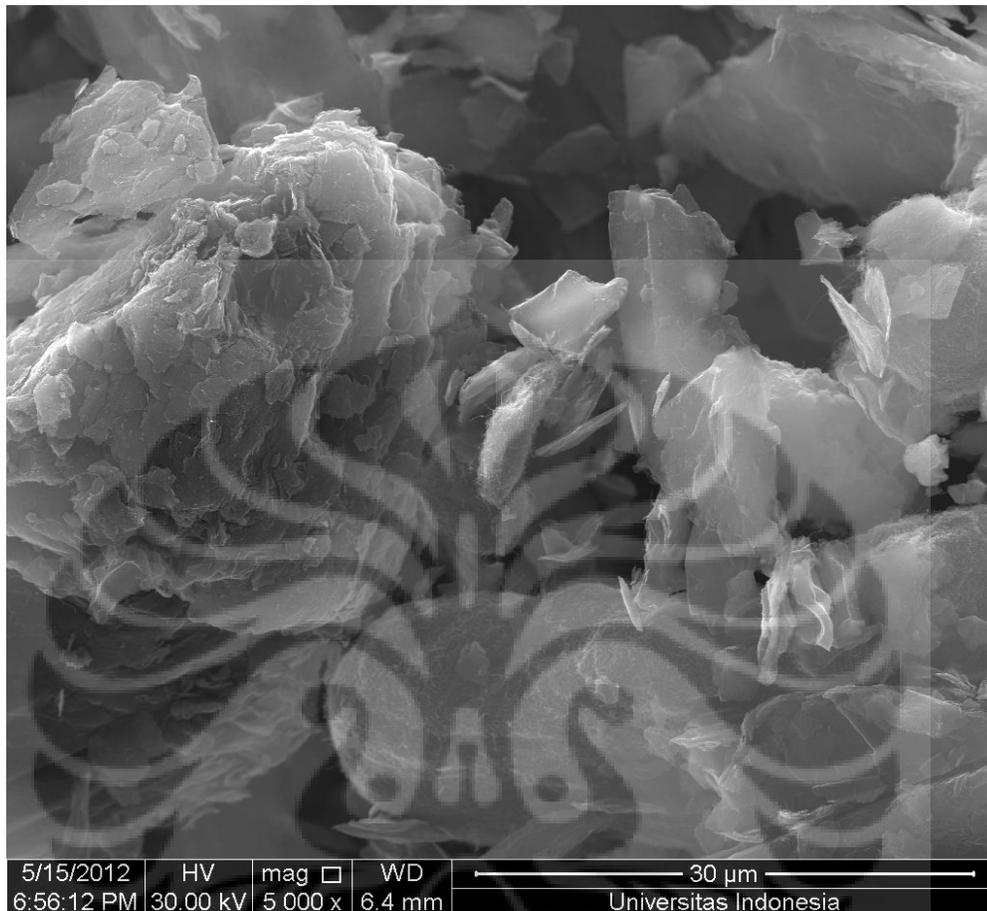


**Lampiran 11** MWCNT sebelum di mixing perbesaran 100.000x

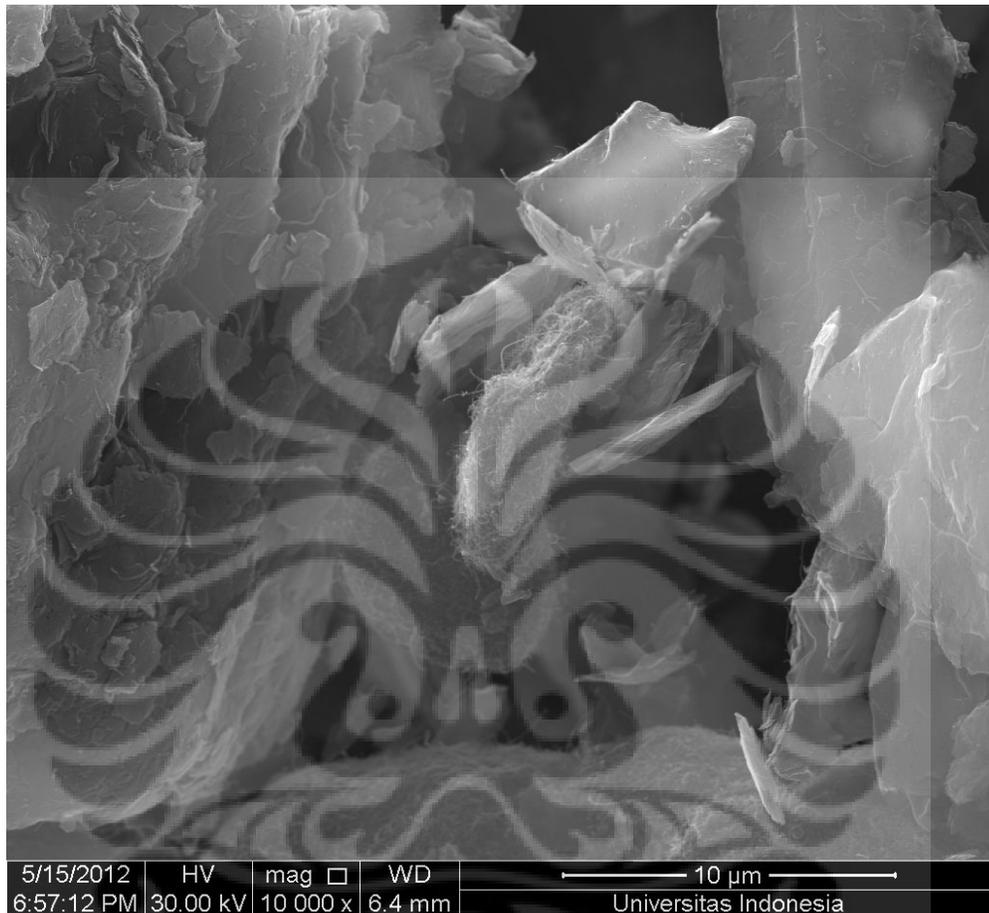


**Lampiran 12** MWCNT sebelum di mixing perbesaran 50.000x

**Lampiran 13** MWCNT, CB dan GEAF setelah mixing Perbesaran 5000x



Lampiran 14 MWCNT, CB dan GEAF setelah mixing Perbesaran 10.000x



**Lampiran 15** MWCNT, CB dan GEAF setelah mixing Perbesaran 20.000x

