



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN 10-20 WT.% *CARBON BLACK*  
TERHADAP KARAKTERISASI KOMPOSIT *EPOXY*/GRAFIT  
EAF SEBAGAI MATERIAL PELAT BIPOLAR PEMFC**

**SKRIPSI**

**FARAH FAUZIAH  
0606074836**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
DESEMBER 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN 10-20 WT.% *CARBON BLACK*  
TERHADAP KARAKTERISASI KOMPOSIT *EPOXY*/GRAFIT  
EAF SEBAGAI MATERIAL PELAT BIPOLAR PEMFC**

**SKRIPSI**

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

**FARAH FAUZIAH  
0606074836**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
DESEMBER 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Farah Fauziah

NPM : 0606074836

Tanda Tangan :

Tanggal : 22 Desember 2009

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Farah Fauziah  
NPM : 0606074836  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengaruh Penambahan 10-20 wt.% *Carbon Black* terhadap Karakterisasi Komposit *Epoxy*/Grafit EAF Sebagai Material Pelat Bipolar PEMFC

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Ir. Yunita Sadeli MSc. ( )

Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M. Phil.Eng. ( )

Penguji 2 : Dr. Ir. Bambang Prihandoko MT. ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 22 Desember 2009

## KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Dengan sepuh hati penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang membimbing dan membantu secara moril dan materil selama masa perkuliahan, penelitian hingga penyusunan skripsi ini. Terima kasih saya ucapkan kepada :

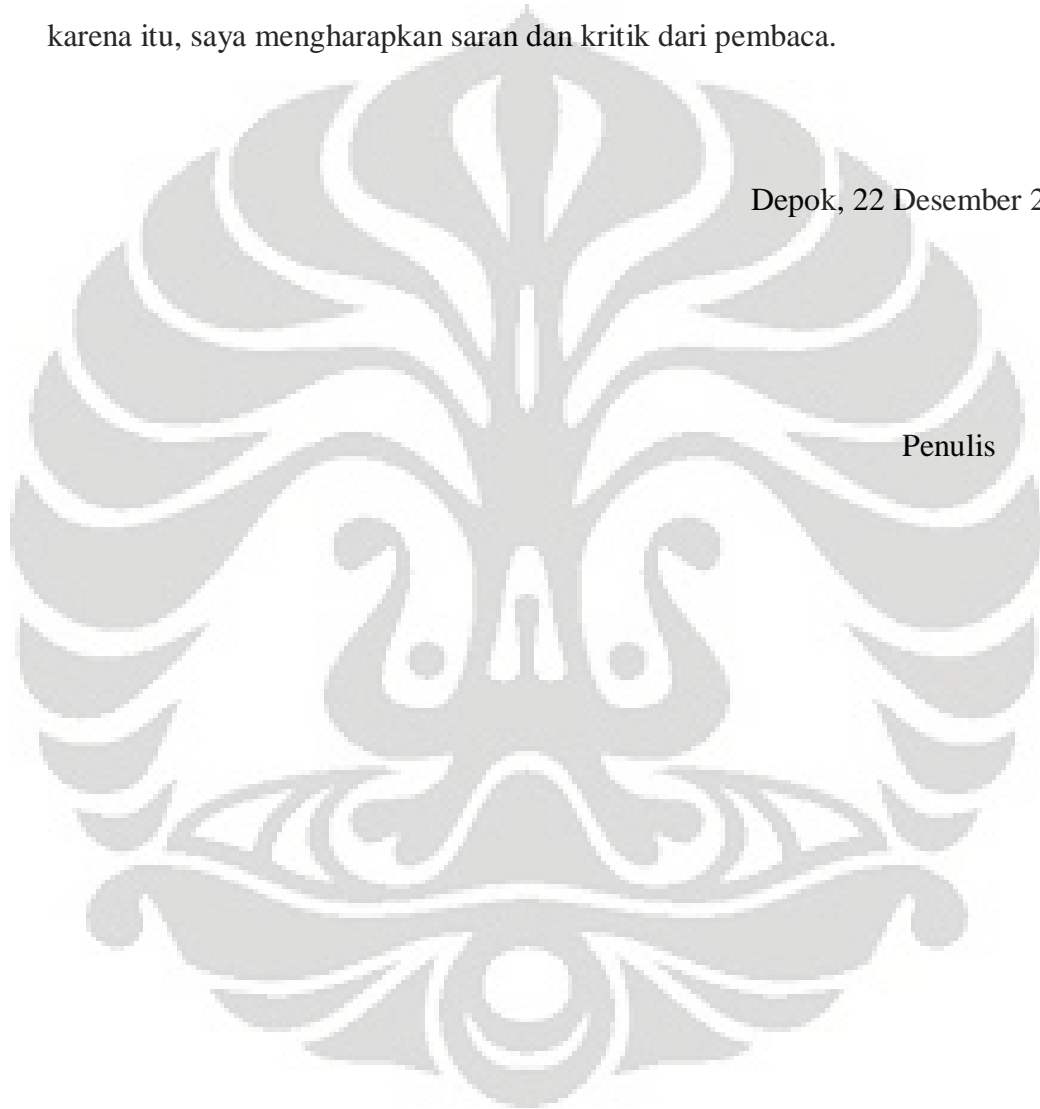
1. Ir. Yunita Sadeli, Msc., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan kesempatan, waktu, dan pikiran untuk selalu mengarahkan dan membimbing penulis dalam penyusunan skripsi ini;
2. Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T sebagai pembimbing dari Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) atas arahan dan bimbingannya kepada penulis selam proses penyusunan skripsi;
3. Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi S. M DEA selaku pembimbing akademik penulis selama masa perkuliahan;
4. Orang tua penulis Abdul Razak dan Hikmah serta kakak dan adik penulis Reza Taufiqurahman, Rahma Aulia, Rizki Fadhillah Ali dan Dini Amelia yang telah memberikan dukungan dan motivasi moril maupun materil kepada penulis;
5. Sahabat-sahabat terbaik penulis Puspita Hudanyanti, Christiawan Saputro, Dania Febriyani, Kenya Diestha L.C, Nike Lestari, dan Fediaska Imran. Teman-teman tim KFC Beringin Saputra, Rio Kurniawan, dan Gabriel Sembiring atas kerjasamanya dalam penelitian ini atas semua dukungan, motivasi dan semangat yang diberikan kepada penulis.
6. Bang Mamad, Pak Eko, Mba Nur dan seluruh karyawan Departemen Teknik Metalurgi dan Material. Tim Nano dari Fisika LIPI, Mas Tomi, Pak Andi, Pak Subhan atas bantuannya kepada penulis selama penelitian.

7. Rekan-rekan KamiMe 2006 dan teman-teman Metalurgi dan Material atas semangat dan dukungannya selama masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi. Serta pihak yang turut membantu penulis yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Semoga skripsi ini dapat membantu pihak-pihak yang membutuhkan informasi didalamnya. Saya menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, saya mengharapkan saran dan kritik dari pembaca.

Depok, 22 Desember 2009

Penulis



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

---

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

Nama : Farah Fauziah  
NPM : 0606074836  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**Pengaruh Penambahan 10-20 wt.% *Carbon Black* terhadap Karakterisasi Komposit *Epoxy*/Grafit EAF Sebagai Material Pelat Bipolar PEMFC**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, 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 : 22 Desember 2009

Yang menyatakan

(Farah Fauziah)

## ABSTRAK

Nama : Farah Fauziah  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : **Pengaruh Penambahan 10-20 wt.% Carbon Black terhadap Karakterisasi Komposit Epoxy/Grafit EAF Sebagai Material Pelat Bipolar PEMFC**

*Fuel Cell* merupakan sumber energi alternatif yang mengkonversi hidrogen menjadi energi listrik. Salah satu jenis *fuel cell* yang potensial dikembangkan adalah *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) berbahan dasar komposit. Namun, pengembangan PEMFC masih terkendala oleh material penyusun pelat bipolar yang hanya memiliki kemampuan konduktivitas rendah. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan komposisi ideal material komposit bermatriks polimer yang akan digunakan sebagai pelat bipolar pada PEMFC.

Pelat bipolar yang diharapkan mempunyai sifat konduktivitas dan sifat elektrik yang baik. Pada penelitian ini, digunakan grafit limbah *Electric Arc Furnace* (EAF) dan *carbon black* sebagai pengisi konduktif dan *epoxy resin* sebagai matriks polimer. Semua bahan dicampur dan dicetak dengan mesin *hotpress*. Setiap formulasi dilakukan pengujian sudut kontak, konduktivitas listrik, densitas, porositas, dan kekuatan fleksural. Pengaruh dari penambahan wt.% *carbon black* menunjukkan bahwa kekuatan fleksural menurun dan berbanding terbalik dengan nilai porositas. Konduktivitas tertinggi yang diperoleh adalah 0,22 S/cm.

Kata kunci:

*Fuel cell*, PEMFC, grafit EAF, *carbon black*, pelat bipolar, konduktivitas listrik, sifat mekanik, kekuatan fleksural



## ABSTRACT

Name : Farah Fauziah  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : **The effect of 10-20 wt.% addition of carbon black to the characteristics of EAF graphite/epoxy composite as bipolar plate material of PEMFC**

Fuel Cell is an alternative energy source that converting hydrogen into electric energy. One of potential developed fuel cell is Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) composite material-based. However, its bipolar plate's low conductivity become obstacle in its development. This research aim is to find ideal composition of polymer matrix composite materials for PEMFC's bipolar plate which is having high conductivity, light weight, and low cost.

Bipolar plates are expected to have good conductivity and electrical properties. In this study, using graphite waste Electric Arc Furnace (EAF), carbon black as conductive filler and epoxy resin as the matrix polymer. All the ingredients are mixed and molded with hotpress machine. Each formulation is the contact angle test, electrical conductivity, density, porosity, and flexural strength. The effect of addition wt.% carbon black showed decreasing the flexural strength inversely with porosity values. The highest conductivity obtained was 0.22 S/cm.

### Keywords:

Fuel cell, PEMFC, Graphite EAF, carbon black, bipolar plates, electrical conductivity, mechanical properties, flexural strength

## DAFTAR ISI

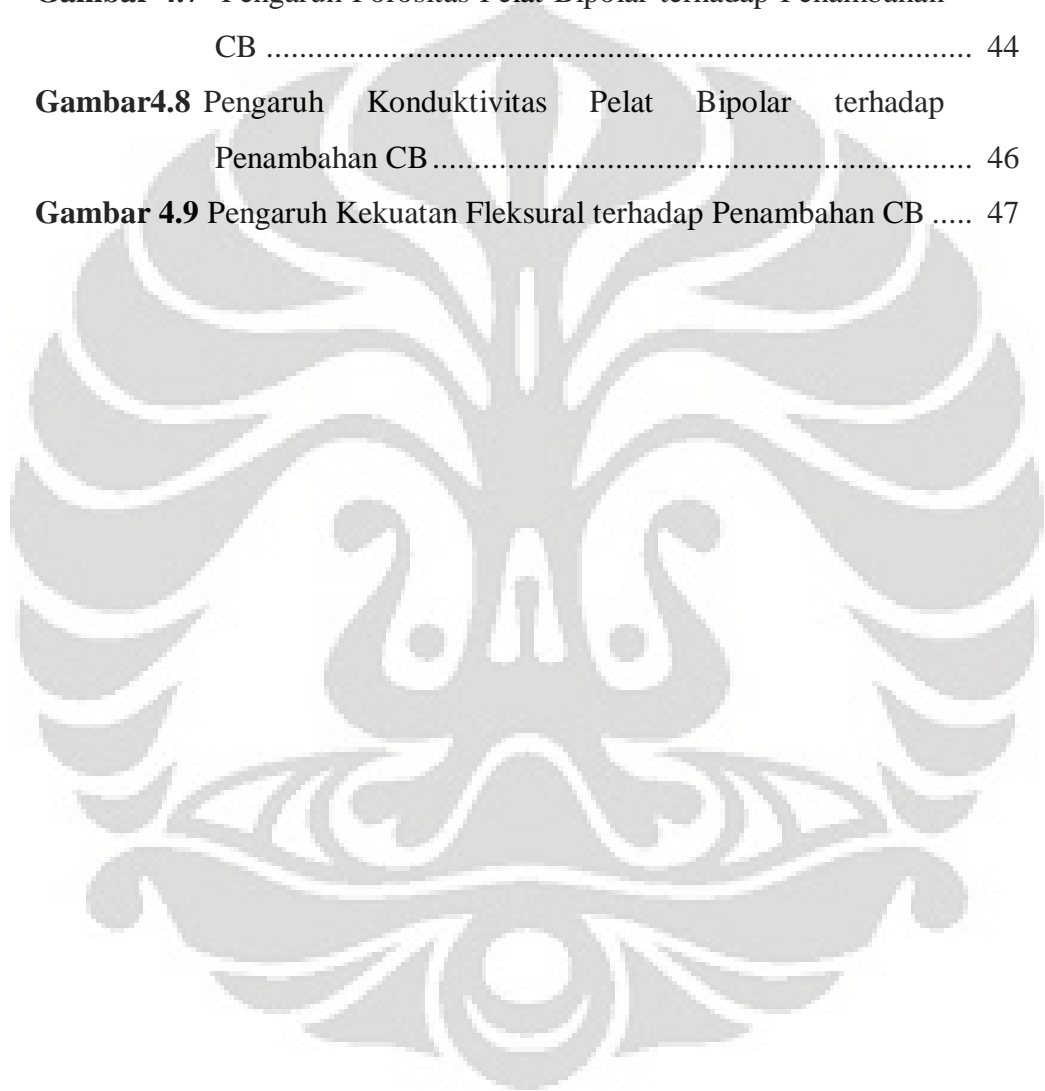
	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Ruang Lingkup & Batasan Masalah .....	3
BAB 2 LANDASAN TEORI .....	4
2.1 <i>Fuel Cell</i> .....	4
2.2 Jenis <i>Fuel Cell</i> .....	5
2.3 PEMFC.....	6
2.4 Pelat Bipolar .....	10
2.5 Komposit .....	13
2.6 Grafit Electric Arc Furnace.....	19
2.7 <i>Carbon Black</i> .....	22
2.8 Epoxy Resin .....	23
2.9 Methanol .....	24
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....	25
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	25
3.2 Alat dan Bahan.....	26

3.2.1 Peralatan .....	26
3.2.2 Bahan .....	26
3.3 Prosedur Penelitian .....	27
3.3.1 Preparasi Sampel .....	27
3.3.2 Pengujian Karakteristik Material.....	31
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>37</b>
4.1 Hasil Preparasi Sampel .....	37
4.1.1 Hasil <i>Crushing, Milling, dan Screening</i> .....	37
4.1.2 Hasil Pencampuran Mixing... ..	37
4.1.3 Pengamatan Visual Sudut Kontak .....	38
4.1.4 Hasil Pengamatan Visual Pencetakan.....	40
4.1.5 Hasil Preparasi Spesimen Uji .....	42
4.2 Hasil Karakterisasi Pelat Bipolar.....	42
4.2.1 Hasil Pengujian Densitas .....	42
4.2.2 Hasil Pengujian Porositas .....	43
4.2.3 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik .....	45
4.2.4 Hasil Pengujian Fleksural .....	47
4.2.5 Perbandingan Sifat Komposit .....	48
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>49</b>
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>50</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>54</b>

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> Fuel Cell secara keseluruhan .....	4
<b>Gambar 2.2</b> Diagram kerja <i>fuel cell</i> jenis PEMFC .....	7
<b>Gambar 2.3</b> Komponen dalam PEMFC .....	9
<b>Gambar 2.4</b> Material Pelat Bipolar pada Umumnya .....	10
<b>Gambar 2.5</b> Proses Pembuatan Pelat Bipolar .....	11
<b>Gambar 2.6</b> Pelat Bipolar dengan Pola Aliran Gas .....	12
<b>Gambar 2.7</b> Jenis Komposit Berdasarkan Bentuk Penguat .....	15
<b>Gambar 2.8</b> Fenomena Antarmuka .....	16
<b>Gambar 2.9</b> Fenomena Antar fasa .....	16
<b>Gambar 2.10</b> Sudut Kontak (a) $>90^\circ$ , (b) $<90^\circ$ .....	16
<b>Gambar 2.11</b> Keseimbangan Tiga Tegangan Permukaan Kondisi <i>Sessile Drop</i> .....	17
<b>Gambar 2.12</b> Skema Bentuk Ikatan Antarmuka .....	18
<b>Gambar 2.13</b> Tahapan Proses Pembuatan Baja dalam Dapur Busur Listrik .....	19
<b>Gambar 2.14</b> Pembuatan elektroda grafit dapur busur listrik .....	21
<b>Gambar 2.15</b> Struktur kristal Grafit .....	22
<b>Gambar 2.16</b> Struktur Epichlorhydrin dan Bisphenol A .....	23
<b>Gambar 2.17</b> Reaksi pembentukan Epoxide .....	24
<b>Gambar 2.18</b> Struktur senyawa Methanol .....	24
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian .....	25
<b>Gambar 3.2</b> Hasil Proses <i>Mixing</i> .....	29
<b>Gambar 3.3</b> Proses Pencetakan .....	30
<b>Gambar 3.4</b> Penimbangan Massa di dalam Air .....	32
<b>Gambar 3.5</b> Skema Uji konduktivitas .....	32
<b>Gambar 3.6</b> Pengujian Porositas. ....	34
<b>Gambar 3.7</b> Skematis Pengujian Fleksural .....	35
<b>Gambar 4.1</b> Grafit EAF .....	37
<b>Gambar 4.2</b> Bentuk bakalan yang homogen dan siap untuk dicetak .....	38

<b>Gambar 4.3</b> Hasil Pengujian Sudut Kontak Pelat Bipolar .....	39
<b>Gambar 4.4</b> Hasil Pencetakan Pelat Bipolar .....	41
<b>Gambar 4.5</b> Spesimen Uji (a) Konduktivitas, Densitas, dan Porositas (b) Fleksural .....	42
<b>Gambar 4.6</b> Pengaruh Densitas Pelat Bipolar terhadap Penambahan CB .....	43
<b>Gambar 4.7</b> Pengaruh Porositas Pelat Bipolar terhadap Penambahan CB .....	44
<b>Gambar 4.8</b> Pengaruh Konduktivitas Pelat Bipolar terhadap Penambahan CB .....	46
<b>Gambar 4.9</b> Pengaruh Kekuatan Fleksural terhadap Penambahan CB .....	47



## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 2.1</b> Jenis-jenis <i>Fuel Cell</i> .....	5
<b>Tabel 2.2</b> Komponen Utama dalam PEMFC .....	8
<b>Tabel 2.3</b> Kriteria Standar Pelat Bipolar .....	11
<b>Tabel 2.4</b> Karakteristik elektroda dapur busur listrik.....	20
<b>Tabel 3.1</b> Komposisi Pelat Bipolar .....	28
<b>Tabel 4.1</b> Data Pengujian Densitas .....	42
<b>Tabel 4.2</b> Data Pengujian Porositas .....	44
<b>Tabel 4.3</b> Data Pengujian Konduktivitas Listrik.....	45
<b>Tabel 4.4</b> Data Pengujian Fleksural .....	47
<b>Tabel 4.5</b> Perbandingan Sifat Komposit.....	48

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>Lampiran 1</b> Hasil Pengujian Konduktivitas .....	54
<b>Lampiran 2</b> Hasil Pengujian Densitas .....	55
<b>Lampiran 3</b> Hasil Pengujian Porositas .....	56
<b>Lampiran 4</b> Hasil Pengujian Flexural .....	57
<b>Lampiran 5</b> Tabel Densitas Air.....	58
<b>Lampiran 6</b> Peralatan Preparasi Sampel.....	60
<b>Lampiran 7</b> Peralatan Pengujian Karakterisasi.....	62
<b>Lampiran 8</b> Spesifikasi Epoxy Resin .....	64
<b>Lampiran 9</b> Spesifikasi Epoxy Hardener.....	65
<b>Lampiran 10</b> Spesifikasi Grafit EAF PT. Krakatau Steel .....	66
<b>Lampiran 11</b> Komposisi Kimia Grafit EAF .....	68
<b>Lampiran 12</b> Spesifikasi Metanol MERCK .....	69
<b>Lampiran 13</b> Perhitungan Sessile Drop .....	70

# BAB I PENDAHULUAN

## I.1 Latar Belakang

Kebutuhan konsumsi energi yang terus meningkat seiring dengan perkembangan peradaban manusia saat ini belum ditunjang dengan ketersediaan energi yang cukup dan terbaharukan. Keterbatasan sumber energi serta menipisnya cadangan minyak bumi dan bahan bakar fosil Indonesia mendorong dikembangkannya alternatif sumber energi. Salah satu energi alternatif yang potensial untuk dikembangkan adalah *fuel cell*. Energi alternatif ini sangat menjanjikan untuk memenuhi berbagai kebutuhan energi di masa yang akan datang. Penggunaan energi alternatif *fuel cell* kedepannya akan berdampak pada berkurangnya pemakaian bahan bakar minyak (BBM), terpenuhinya kebutuhan energi, dan menurunkan tingkat emisi yang dihasilkan sehingga turut menjaga kelestarian bumi dari ancaman pemanasan global.

Sebagai langkah awal dikembangkan alternatif energi untuk mewujudkan tersedianya kebutuhan energi yang terbaharui dan ramah lingkungan maka penelitian *fuel cell* terus dikembangkan. Salah satu teknologi *fuel cell* yang marak di kembangkan yaitu *Polymer Electrolite Membrane Fuel Cell (PEMFC)*. 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*) di Indonesia.

Salah satu kendala terbesar yang menghambat komersialisasi sumber energi alternatif adalah karena tingginya biaya produksi. Oleh karena itu terus dikembangkan upaya untuk mereduksi biaya produksi dan menemukan material yang tepat untuk digunakan dalam aplikasi ini. Pelat bipolar merupakan komponen yang berpengaruh besar terhadap performa dan biaya produksi dari unit rangkaian *fuel cell*.



Saat ini sedang dikembangkan pelat bipolar yang terbuat dari grafit komposit. Pada penelitian ini akan dipelajari karakteristik dari pelat bipolar yang dibuat dari limbah grafit *Electric Arc Furnace* (EAF). Pemanfaatan limbah dari pabrik baja ini diharapkan dapat menjadi material substitusi dari grafit sintetis sehingga dapat mereduksi biaya produksi dan turut berpartisipasi dalam penanggulangan limbah di Indonesia. Dengan kemampuan sumber daya manusia, institusi litbang, dan industri, tersedianya sumber daya dan terbukanya peluang pasar di Indonesia, sudah selayaknya *fuel cell* ini ditangani dengan serius. Diharapkan di masa mendatang Indonesia tidak hanya menjadi pasar dari negara-negara maju, tetapi aktif berkiprah dalam proses perkembangan *fuel cell* global.

## I.2 Perumusan Masalah

Untuk mendapatkan komposisi pelat bipolar yang memiliki karakteristik sesuai dengan persyaratan umum, dibutuhkan penelitian yang berkesinambungan sehingga dapat mencapai optimasi baik dari sifat maupun biaya produksi. Penelitian ini akan mempelajari karakteristik pelat bipolar grafit limbah EAF yang ditambahkan *carbon black* untuk meningkatkan nilai konduktivitasnya. Tidak hanya nilai konduktivitasnya yang ditingkatkan tetapi sifat-sifat lain seperti densitas, kekuatan fleksural, dan permeabilitas juga penting untuk dipertimbangkan dalam pemilihan komposisi material yang akan digunakan sebagai pelat bipolar.

Karakteristik material yang akan digunakan sebagai pelat bipolar harus memenuhi standar kelayakan sifat pelat bipolar. Dan untuk mengetahui karakteristik dari pelat bipolar akan dilakukan proses pencampuran (*mixing*) hingga terbentuk bakalan yang homogen kemudian dicetak dan ditekan dengan mesin *hotpress*. Lalu dilakukan preparasi sampel untuk dilakukan pengujian yang dapat menunjukkan sifat material jika digunakan sebagai pelat bipolar. Grafit EAF sebagai *reinforcemet*, *carbon black* sebagai *filler* yang diharapkan dapat meningkatkan konduktivitas juga digunakan epoxy resin dan epoxy *hardener* sebagai matriks polimer.

### I.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mempelajari pengaruh penambahan komposisi 10-20 *wt.% carbon black* terhadap densitas, porositas, konduktifitas dan kekuatan fleksural dari pelat bipolar yang berbahan dasar grafit EAF.
2. Mengetahui efek dan sifat yang dihasilkan dari penambahan 10-20 *wt.% carbon black* terhadap karakteristik pelat bipolar.
3. Mendapatkan komposisi *carbon black* dengan sifat yang optimum dari material-material penyusun komposit pelat bipolar.

### I.4 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Bahan yang akan digunakan antara lain grafit limbah EAF, *carbon black*, *epoxy resin* dan *epoxy hardener*. Penambahan *carbon black* bertujuan untuk meningkatkan nilai konduktivitas dari pelat bipolar dengan *epoxy* yang berperan sebagai matriks polimer.

Bahan-bahan ini akan diproses dan diolah hingga membentuk pelat bipolar yang sebelumnya melalui beberapa tahapan antara lain, pencampuran (*mixing*) *reinforcement* grafit EAF dengan *carbon black* dan ditambahkan *epoxy resin* dan *epoxy hardener* hingga terbentuk bakalan yang homogen yang siap untuk dicetak. Proses pencetakan menggunakan mesin *hotpress* dengan tekanan 300 kg/cm<sup>2</sup>, dan temperatur 70° C selama 4 jam untuk membentuk pelat bipolar yang kemudian dilakukan preparasi sampel yang ingin di uji. Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari pelat bipolar antara lain pengujian konduktivitas, fleksural, densitas, dan porositas dari sampel yang sudah dilakukan preparasi sebelumnya.

Dalam penelitian ini digunakan variabel penambahan 10-20 *wt.% carbon black* dalam komposisi pelat bipolar sehingga dapat diketahui pengaruh penambahan *carbon black* terhadap sifat mekanis maupun elektrik dari pelat bipolar.

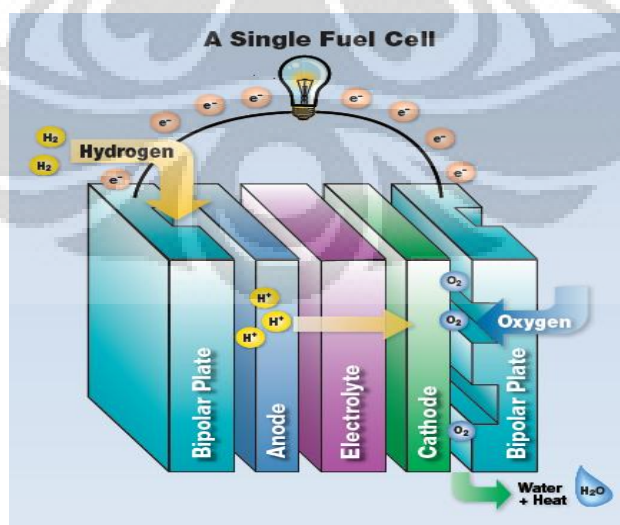
## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### II.1. Fuel Cell

*Fuel cell* adalah alat konversi energi elektrokimia yang dapat mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi listrik. Alat ini terdiri dari dua buah elektroda, yaitu anoda dan katoda yang dipisahkan oleh sebuah membran polimer yang berfungsi sebagai elektrolit. Hidrogen dialirkan ke dalam anoda *fuel cell*, sedang oksigen atau udara dialirkan ke bagian katoda, dengan adanya membran, maka gas hidrogen tidak akan bercampur dengan oksigen [1]. *Fuel cell* dibagi atas beberapa kategori berdasarkan kombinasi tipe bahan bakar dan oksidan, tipe elektrolit yang digunakan, dan temperatur [2].

Komersialisasi produk ini terhambat oleh beberapa hal diantaranya biaya produksi yang masih tinggi dan keterbatasan penyimpanan gas hidrogen sebagai bahan bakar, serta masalah kekuatan susunan PEMFC. Pengembangan *Fuel Cell* sangat potensial untuk terus dikembangkan hingga didapat karakteristik optimumnya dalam upaya mereduksi biaya produksi dan besar volume [3]. Gambar 2.1 adalah rangkaian *fuel cell* secara keseluruhan dan simulasi kerja dari transfer elektron yang menghasilkan arus listrik [4].



Gambar 2. 1. *Fuel Cell* secara keseluruhan [4]

## II.2. Jenis Fuel Cell

Ada enam tipe umum *fuel cell* yang dibedakan berdasarkan elektrolit yang digunakan untuk menghantarkan proton, yaitu Alkaline Fuel Cell (AFC), Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC), Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC), Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC), dan Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) [5,6] Pengembangan *fuel cell* tipe PEMFC umumnya menggunakan material dengan bahan membran polimer, katalis elektroda dan pelat bipolar grafit.

**Tabel 2. 1.** Jenis-Jenis *Fuel Cell* [5,6]

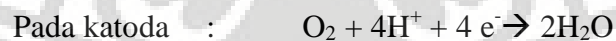
Jenis	Elektrolit	Temperatur Operasi (°C)	Karakteristik
Alkaline Fuel Cell (AFC)	KOH	60-120	Efisiensi energi tinggi,
Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	Phosphoric Acid (H <sup>+</sup> )	160-200	Efisiensi energi terbatas, peka terhadap CO <sub>2</sub> (<1,5% Vol)
Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)	Molten Carbonate (CO <sub>2</sub> <sup>2-</sup> )	500-650	Rentan korosi temperature tinggi
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	Lapisan Keramik(O <sup>2-</sup> )	800-1000	Efisiensi sistem tinggi, temperatur operasi perlu direduksi
Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)	Polymer Electrolyte (H <sup>+</sup> )	60-100	Kerapatan energi tinggi, memiliki kepekaan terhadap CO (<100ppm)
Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)	Electrolyte Polymer(H <sup>+</sup> )	60-120	Efisiensi sistem tinggi, peka terhadap hasil oksidasi di anoda

### II.3. PEMFC

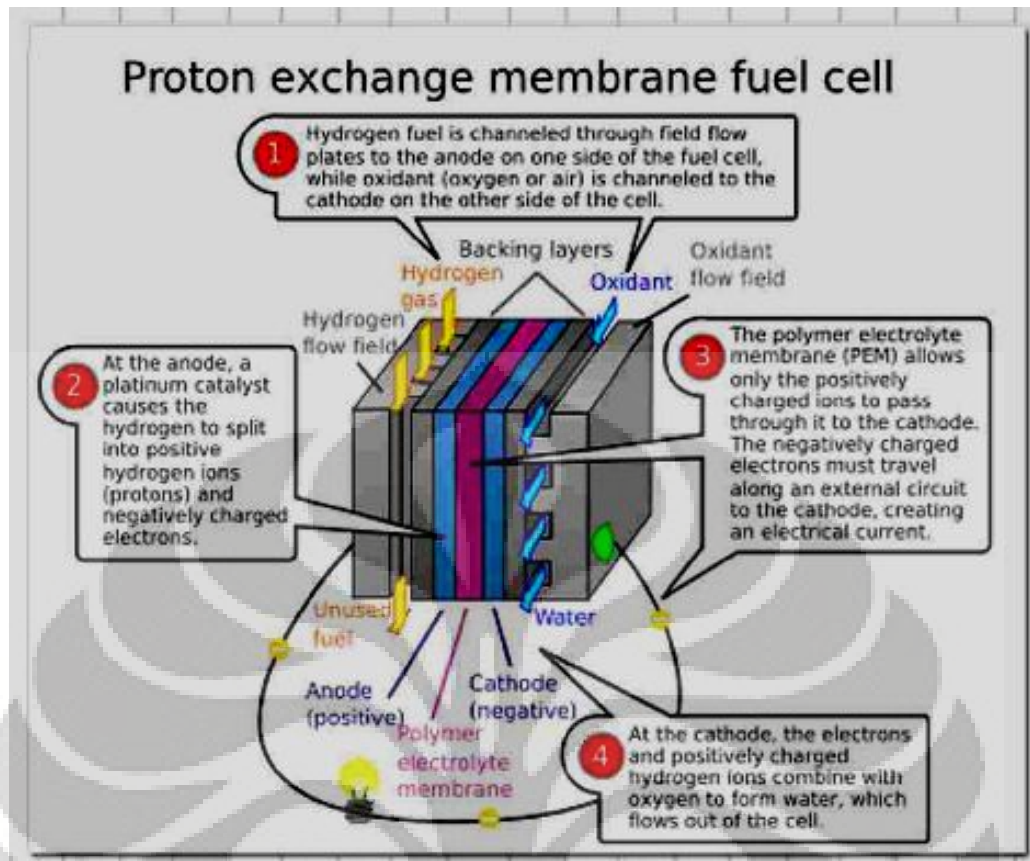
*Polymer electrolyte membrane fuel cell* (PEMFC) disebut juga *proton exchange membrane fuel cell*. PEMFC tidak dipakai fluida yang bersifat korosif seperti jenis lainnya. Dalam PEMFC terdapat membran tipis padat yang berfungsi sebagai elektrolit pemisah katoda dan anoda seperti pada gambar 2.2 [7]. Membran ini secara selektif mengontrol transportasi proton dari anoda ke katoda dalam *fuel cell*., PEMFC hanya memerlukan hidrogen untuk menghasilkan energi, oksigen dari udara, dan air sebagai produk sampingan dari reaksi [8].

PEMFC bekerja pada temperatur yang relatif rendah, yaitu sekitar 80°C. Rendahnya suhu operasi ini menyebabkan rendahnya waktu pemanasan. Selain itu PEM memiliki kerapatan daya yang cukup tinggi karena sifat-sifat inilah maka PEM banyak digunakan sebagai sumber daya bagi alat-alat elektronik *portable* dan alat-alat transportasi [2].

Membran polimer merupakan komponen yang sangat penting dalam PEM *fuel cell*. Membran polimer ini dapat memisahkan reaktan dan menjadi sarana transportasi ion hidrogen yang dihasilkan di anoda menuju katoda sehingga menghasilkan energi listrik. Persamaan reaksi yang terjadi di anoda dan katoda dapat dituliskan sebagai berikut [1] :



Kemurnian gas hidrogen sangat mempengaruhi emisi gas buang sistem *fuel cell* berbasis polimer ini. Kemurnian hidrogen yang tinggi memberikan tingkat emisi yang mendekati *zero emission*. Penggunaan hidrogen dengan tingkat kemurnian tinggi juga dapat memperpanjang waktu hidup membran *fuel cell* dan mencegah pembentukan karbonmonoksida (CO) yang beracun, pada permukaan katalis [5].



**Gambar 2. 2.** Diagram kerja *fuel cell* jenis PEMFC [3]

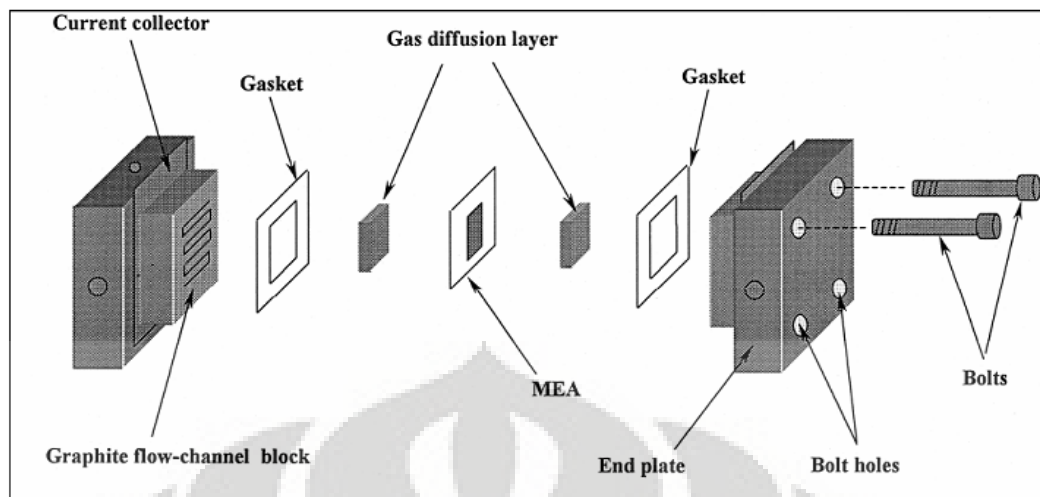
PEMFC memiliki keunggulan menghasilkan energi yang besar pada temperatur yang relatif rendah. Prinsip kerja dari PEMFC terekspose dalam kondisi lingkungan dengan arus dan tegangan yang disebabkan oleh *shock* dan vibrasi [9]. Persyaratan material yang digunakan untuk pelat bipolar diharapkan memiliki ketangguhan yang tinggi  $> 22 \text{ lb/in}^2$ , ketahanan korosi  $< 0.016 \text{ mA/cm}^2$  dan konduktivitas yang baik  $> 100 \text{ S/cm}$ , juga tidak mudah ditembus oleh gas [10]. Dibutuhkan pengembangan dan penelitian yang berkesinambungan untuk mendapatkan pelat bipolar yang murah dan tipis sehingga dapat dikomersialisasikan secara umum. Pemilihan material yang diinginkan dalam aplikasi PEMFC antara lain [5] :

- Memiliki ketahanan kimia yang baik
- Memiliki sifat mekanis yang baik
- Bersifat *acidic*
- Bersifat absorptif terhadap air

Setiap komponen dalam rangkaian PEMFC memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda sesuai dengan fungsinya yang dijelaskan pada pada tabel 2.2.

**Tabel 2. 2.** Komponen Utama dalam PEMFC [11]

<b>Komponen</b>	<b>Material</b>	<b>Fungsi</b>
<i>Membrane electrolyte assembly</i> (MEA)	Polimer solid terimpregnasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda.  Kertas atau kain carbon berpori untuk lapisan difusi gas (GDL)	Terdiri dari 2 elektroda, 1 membran elektrolit, dan 2 GDL. Membran memisahkan (dengan pembatas gas) 2 setengah-reaksi sel dan melepas proton dari anoda ke katoda. Lapisan katalis yang terdispersi pada elektroda memacu setiap setengah-reaksi. GDL mendistribusikan gas secara merata ke katalis di membran, mengalirkan elektron dari area aktif menuju pelat bipolar dan membantu pengaturan air.
Pelat bipolar	Grafit, <i>stainless steel</i> , atau komposit polimer termoplastik	Mendistribusikan gas di bagian area aktif membran. Mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda. Membuang air keluar sel.
Pelat penutup	Material dengan kekuatan mekanik yang baik (biasanya baja atau alumunium)	Menyatukan rangkaian <i>fuel cell</i> .
Penyimpan arus	Logam dengan kontak elektrik dan konduktivitas yang baik (biasanya tembaga)	Menyimpan dan mentransfer arus listrik dari dalam ke luar sirkuit.



**Gambar 2. 3.** Komponen dalam PEMFC [3]

*Membrane electrolyte assembly* (MEA) ini diharapkan mampu untuk transfer proton selama *fuel cell* beroperasi. Hidrogen pada anoda dipisahkan antara elektron dan proton, kemudian ditransportasikan dalam *fuel cell*. Elektron dihantarkan keluar, selama proton berpindah dari membran konduktif ke katoda. Hasil dari reaksi ini akan menghasilkan molekul air yang dibutuhkan membran hidrat. Elektron dan proton akan bertemu di katoda dan akan membentuk air jika terdapat kehadiran oksigen. Membran hidrat pada PEM beroperasi pada temperatur yang rendah, umumnya  $80^{\circ}\text{C}$  ke bawah [5].

Ion yang bermigrasi dapat sebagai hidrogen, oksigen atau hidroksida. Sedangkan elektrolit dapat berupa membran polimer, garam karbonat cair, lapisan oksida keramik, larutan alkali dan asam fosfat. Elektroda biasanya terbuat dari logam platina atau nikel [5].

Dalam rangka optimalisasi sifat membran *fuel cell* dilakukan penggabungan membran dengan material pendukung. Penggabungan umumnya dilakukan dengan pembentukan kopolimer, blending polimer maupun penggabungan dengan suatu komposit. Penggabungan ini bertujuan untuk memperbaiki sifat-sifat membran seperti ketahanan termal, ketahanan kimia, ketahanan mekanik, sifat hantaran dan sifat resistensi membran. Berdasarkan pertimbangan ekonomis kebutuhan dan keefektifan dalam aplikasinya dibutuhkan

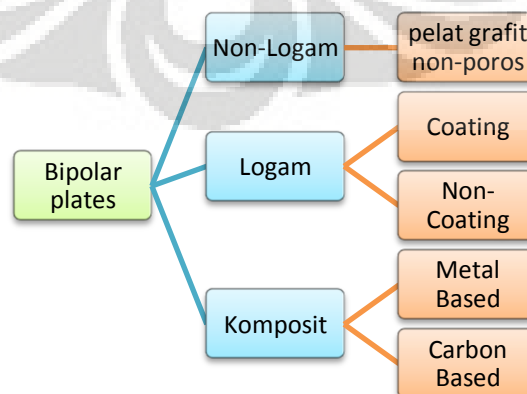


material yang murah serta memiliki efisiensi yang baik, maka dalam penelitian ini dikembangkan pelat bipolar komposit dengan material grafit. Diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan material baru yang murah, ringan dan memiliki karakteristik yang baik untuk digunakan sebagai pelat bipolar dalam PEMFC.

#### II.4. Pelat Bipolar

Pelat bipolar seringkali dikenal pula dengan sebutan *flow field plate* atau pelat separator. Pelat bipolar ini digunakan sebagai penghubung elektrik antara dua elektroda dengan kutub yang berbeda. Pelat bipolar berfungsi untuk mendistribusikan gas ke membran, penghantar elektron dari anoda ke katoda, penghantar panas dari dan menuju elektroda, mengalirkan produk akhir dalam bentuk air dari tiap sel, penghalang perpindahan gas antar sel, dan menjaga stabilitas struktur dari PEMFC. Pelat bipolar dibuat dari material yang memiliki konduktivitas listrik baik dan tidak dapat dilewati oleh gas. Dapat berlaku sebagai pengumpul arus, dan mampu menopang struktur dari PEMFC [12].

Pelat bipolar adalah komponen penting pada PEMFC, berkontribusi terhadap 70% total bobot dan 60% biaya pembuatan keseluruhan komponen [13]. Komponen ini sangat berpengaruh terhadap kinerja PEMFC sehingga perlu dilakukan pengembangan yang berkesinambungan untuk memperoleh material dan desain optimum. Pengembangan ini dapat mereduksi biaya produksi dan meningkatkan efisiensi kerja PEMFC. Gambar 2.4 merupakan klasifikasi material yang umum digunakan sebagai pelat bipolar dalam *fuel cell* [9]:



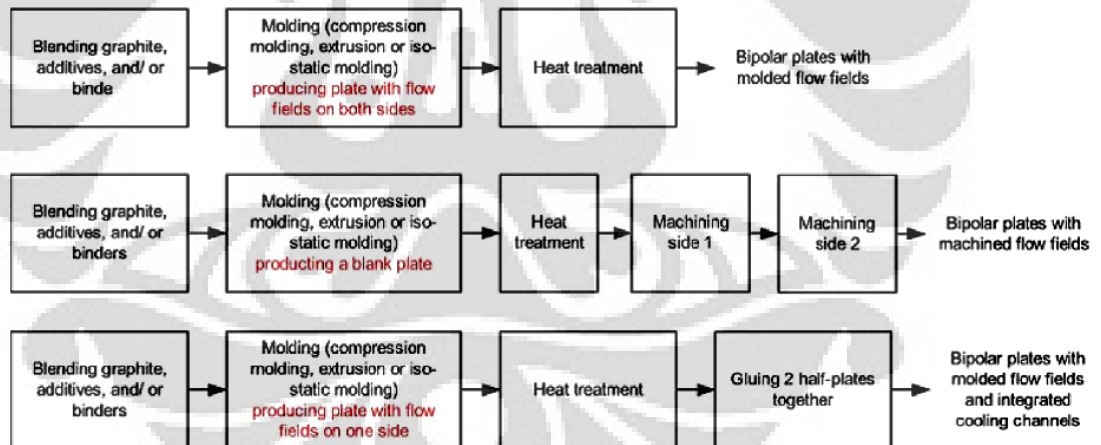
**Gambar 2. 4.** Material Pelat Bipolar pada Umumnya

Tabel 2.3 dapat digunakan sebagai acuan dalam mempertimbangkan jenis material yang akan digunakan untuk aplikasi pelat bipolar PEMFC dan aspek terkait dalam didalamnya.

**Tabel 2. 3** Kriteria Standar Pelat Bipolar [14,16].

Parameter	Nilai Standar
Muatan Konduktivitas	20mΩcm <sup>2</sup>
Kekuatan	< 200N/m <sup>2</sup>
Bobot	Maks. 200 gr per pelat
Volume	1 L/kW/stack
Biaya	< \$ 0,0045/cm <sup>2</sup>
Kerapatan Arus <i>Decay</i>	< 10% per 5000 jam operasi
Daya Tembus ( <i>permeability</i> )	Maksimum kebocoran H <sub>2</sub> 10 <sup>-4</sup> cm <sup>3</sup> /s-cm <sup>2</sup>
Korosi	< 0,0016 mA/cm <sup>2</sup> per 5000 jam

#### GRAPHITE PLATES



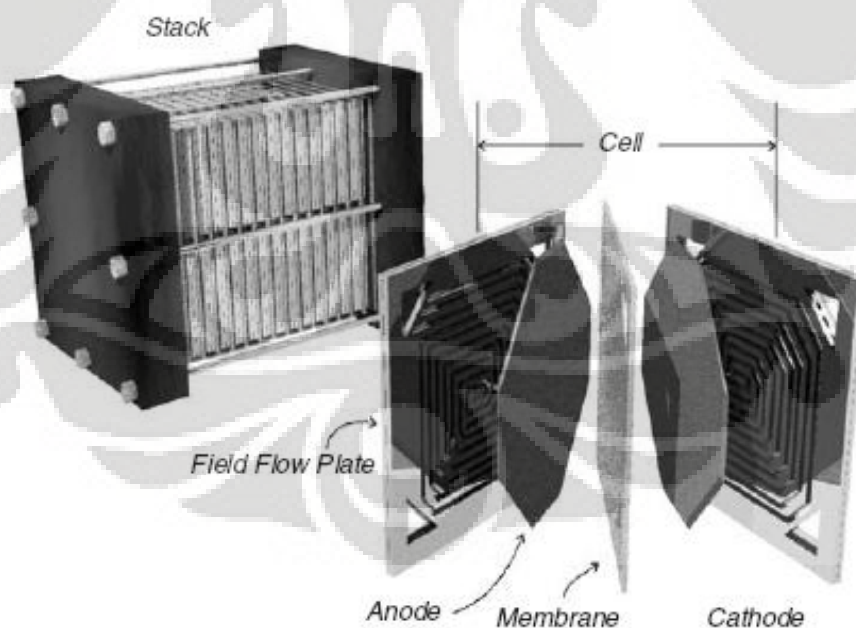
**Gambar 2. 5.** Proses Pembuatan Pelat Bipolar [17]

Gambar 2.5 merupakan gambaran proses pembuatan pelat bipolar dengan beberapa metode sehingga menghasilkan jenis pelat bipolar yang berbeda [17]. Pelat bipolar harus dibuat tipis, ringan, ekonomis, dan mudah dibentuk serta di-*machining*, mempunyai kestabilan thermal dan sifat mekanis yang baik, karena fungsi utamanya untuk menghubungkan sel-sel secara elektrik dan menyalurkan

gas pada *fuel cell* [18]. Beberapa sifat pelat bipolar yang diharapkan setelah dilakukan karakterisasi dan pengujian antara lain:

- a) Kontak permukaan antara epoxy dan grafit yang besar
- b) Ukuran butir dan persebaran butir yang optimum, ukuran yang diharapkan tidak mencapai nanometer karena dikhawatirkan akan terjadi aglomerasi
- c) Tingkat porositas minimum yang pada pelat bipolar
- d) Densitas pelat bipolar yang relatif besar
- e) Memiliki kekuatan yang baik terhadap tekanan dan gesekan.

Jalur alir gas dibuat pada permukaan pelat sebagai tempat aliran gas-gas yang bereaksi. Pembuatan saluran alir (*flow path*) pada permukaan pelat bipolar merupakan salah satu proses yang membutuhkan biaya dan menjadi salah satu faktor yang menghambat komersialisasi PEMFC. Gambar 2.6 adalah pelat bipolar yang sudah memiliki saluran alir di permukaannya [19]. Oleh karena itu, diperlukan pelat bipolar yang murah, tipis, dan ringan, sehingga dapat mengurangi bobot, volume, dan biaya produksi *fuel cell*.



**Gambar 2. 6.** Pelat bipolar dengan pola aliran gas [19]

## II.5 Komposit

Komposit didefinisikan sebagai dua macam atau lebih material yang digabungkan dalam skala makroskopis sehingga menjadi material baru dengan sifat yang lebih baik daripada sifat material penyusunnya. Komposit terdiri dari 2 bagian utama yaitu [20] :

- a) Matriks berfungsi sebagai pengikat dari penguat, mendistribusikan beban antara penguat, memproteksi penguat dari lingkungan, dan melindungi permukaan abrasi mekanis. Pemilihan matriks dalam suatu komposit menjadi penting karena dalam suatu komposit dibutuhkan sifat mekanis yang baik, sifat mampuproses yang baik, dan juga memiliki resistansi yang baik terhadap bahan kimia dan panas.
- b) Filler (pengisi), berfungsi sebagai penguat dalam komposit untuk meningkatkan sifat dari material komposit yang dihasilkan dan memiliki kemampuan untuk ditempatkan pada arah pembebanan untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Bahan penguat komposit dapat berbentuk serat, partikel, serpihan, atau juga dapat berbentuk yang lain [21].

Klasifikasi komposit berdasarkan matriks yang digunakan antara lain:

- a) Metal Matriks Composite (MMC)
- b) Ceramic Matriks Composite (CMC)
- c) Polymer Matriks Composite (PMC).

PMC merupakan jenis komposit yang menggunakan bahan penguat berupa serat, partikel, atau serpihan sedangkan polimer sebagai matriks pengikatnya. Jenis serat yang biasa dipakai sebagai penguat dalam matriks polimer adalah serat karbon, serat gelas, dan serat aramid [23,24].

Keunggulan PMC antara lain biaya pembuatan yang relatif lebih rendah, dapat diproduksi secara massal, mudah dibentuk dan memiliki kemampuan permesinan (*machinability*) yang baik [25,26]. Komposit yang dibuat dari campuran antara matriks polimer dengan *conductive filler* seperti *carbon black*, serat karbon, grafit, dan partikel logam disebut dengan komposit konduktif

polimer. Komposit jenis ini memiliki ketangguhan yang tinggi dan berat yang relatif lebih ringan. Polimer dipilih sebagai matriks karena harganya murah, ketersediaan jumlah yang memadai, tahan terhadap bahan kimia, dan memiliki sifat-sifat mekanik yang baik, serta permeabilitas baik terhadap air dan gas [27].

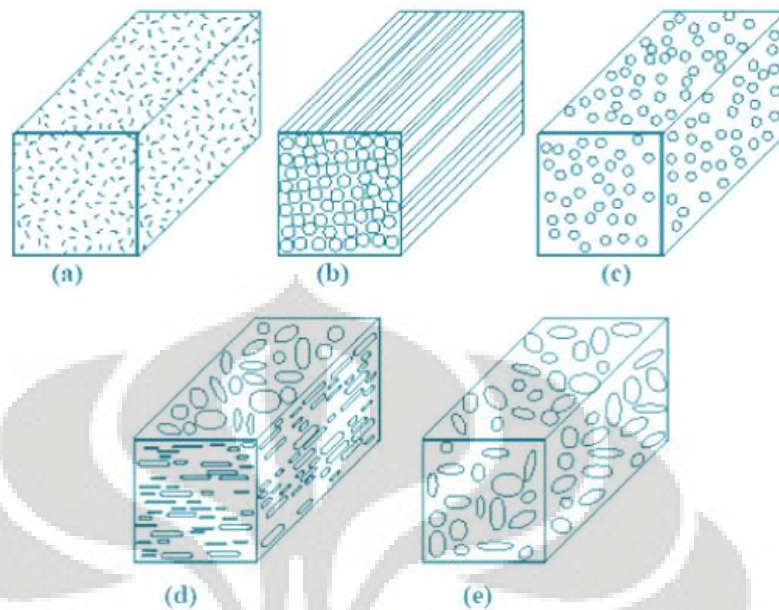
Sifat dari material komposit dipengaruhi oleh sifat dan konsentrasi konstituen penyusunnya, arah orientasi penguat, dan juga ikatan antara matriks dan penguatnya. Pengaruh komposisi terhadap sifat komposit ini diturunkan dengan menggunakan hukum campuran (*rule of mixture*) untuk memprediksi sifat akhir komposit. Perbandingan volume fraksi antara penguat dan matriks dalam komposit mempengaruhi karakteristik komposit tersebut. Semakin banyak jumlah suatu material dalam komposit, maka semakin besar pengaruh material tersebut terhadap sifat komposit.

$$E_c = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \quad (2.1)$$

$$\rho_c = \frac{m_c}{v_c} = \frac{m_f + m_m}{v_f + v_m + v_v} = \frac{\rho_f v_f + \rho_m v_m}{v_f + v_m + v_m} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{1} \quad (2.2)$$

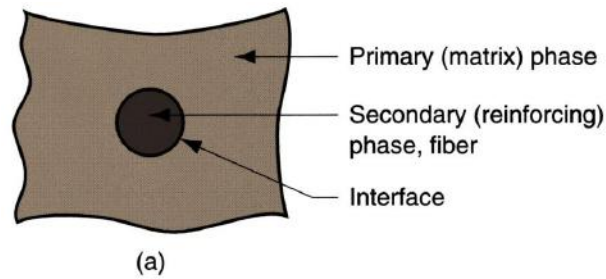
dimana,  
 E = Modulus Elastisitas (komposit (c), penguat (f), matriks (m))  
 V = Fraksi volume (komposit (c), penguat (f), matriks (m))  
 ρ = Densitas (komposit (c), penguat (f), matriks (m))

Sifat material komposit juga dipengaruhi oleh arah orientasi penguat sehingga pengaturan arah orientasi penguat ini diatur sedemikian rupa untuk mendapatkan sifat komposit yang diinginkan, seperti sifat mekanis dan konduktivitasnya. Performa mekanis akan meningkat jika arah orientasi penguat yang searah dengan arah pembebanan.



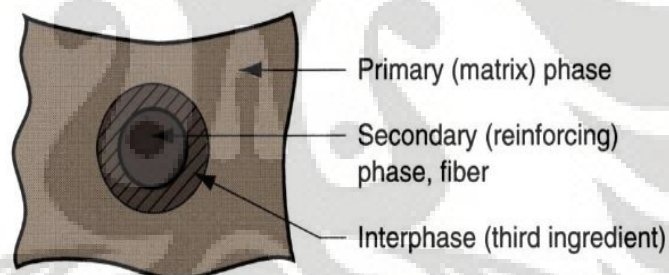
**Gambar 2. 7.** Jenis komposit berdasarkan bentuk penguat: (a) komposit serat pendek acak, (b) komposit serat panjang sejajar, (c) komposit partikulat, (d) komposit serpihan, (e) komposit berpengisi [21]

Ikatan antara penguat dan matriks memiliki peran yang besar dalam penentuan sifat komposit seperti pada gambar 2.7. 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 2.8. 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 [20,21].



**Gambar 2. 8.** Fenomena Antarmuka [21]

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 2.9. 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 [21].



**Gambar 2. 9.** Fenomena Antarfasa [21]



**Gambar 2. 10.** Sudut Kontak. (a)  $>90^\circ$ , (b)  $<90^\circ$  [28]

Ikatan antarmuka sangat berkaitan erat dengan kemampubasahan (*wettability*) dari permukaan kedua konstituen. Kemampubasahan dipengaruhi oleh tegangan permukaan dari ikatan tersebut. Untuk pembasahan yang baik,

dibutuhkan tegangan permukaan dari penguat yang lebih tinggi daripada matriks, sehingga matriks dapat membasahi penguat dengan baik. Kemampubasahan dapat dilihat melalui sudut kontak (*contact angle*) dari pembasahan tersebut. Apabila sudut kontak di bawah  $90^\circ$ , maka kemampubasahan dari ikatan antarmuka tersebut baik, sedangkan pembasahan tidak akan terjadi apabila sudut kontak lebih dari  $90^\circ$ . Gambar 2.10 mengilustrasikan gaya ikatan terhadap ikatan antar muka [28].

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

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LV} \cos \theta + \gamma_{SL} \quad (2.3)$$

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

$$W_A = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (2.4)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.5) dan (2.6) maka didapat persamaan Young-Dupré:

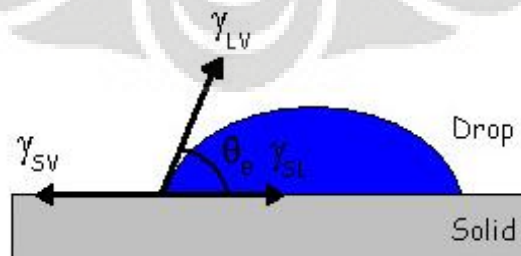
$$W_A = \gamma_{LV} (1 + \cos \theta) \quad (2.5)$$

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

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

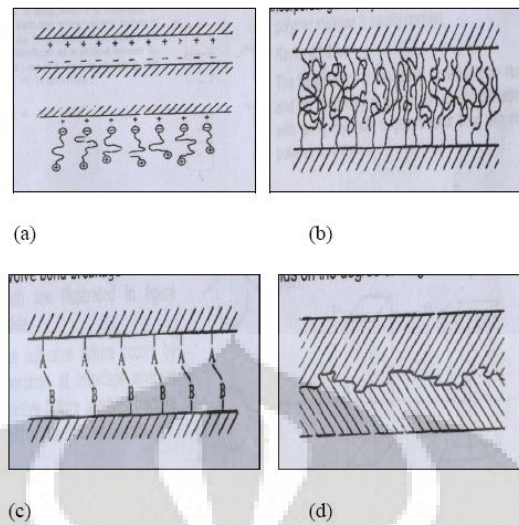
$\gamma_{SL}$  = energi interfacial

$\theta$  = sudut kontak



**Gambar 2. 11.** Kestimbangan Tiga Tegangan Permukaan Kondisi *Sessile Drop*





**Gambar 2. 12.** Skema bentuk ikatan antarmuka: (a) gaya ikatan elektrostatis ion, (b) gaya ikatan interdifusi, (c) gaya ikatan kimia, (d) gaya ikatan mekanik [27]

Gambar 2.12 menunjukkan ilustrasi ikatan antar muka yang dipengaruhi oleh gaya ikatan yang terbentuk [27]. Untuk meningkatkan ikatan antarmuka material komposit dapat dilakukan beberapa cara antara lain :

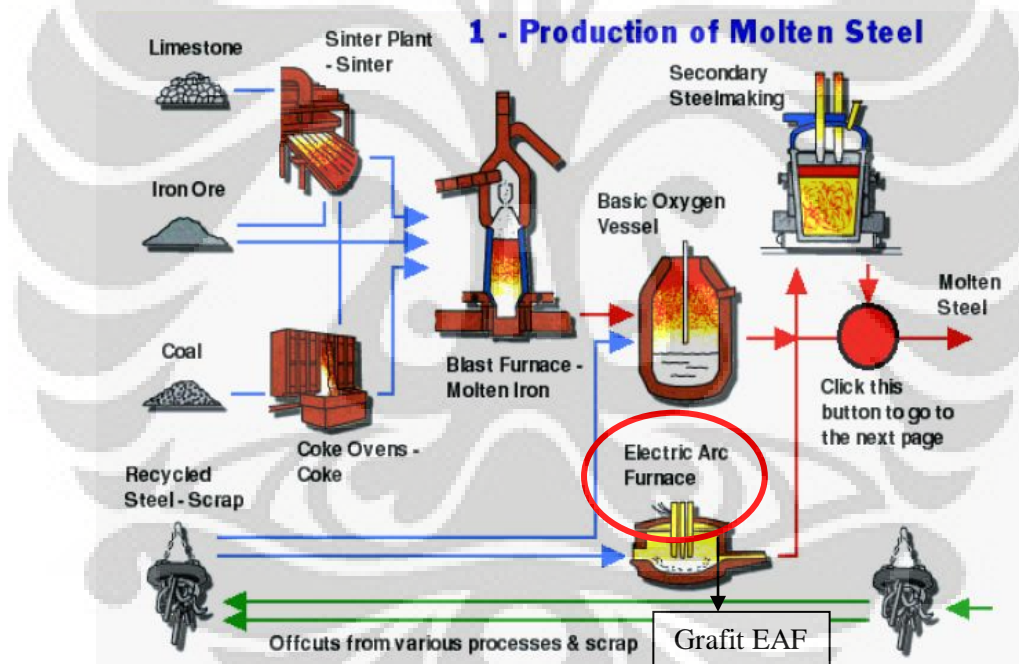
- a) Meningkatkan tegangan permukaan penguat daripada matriks
- b) Dengan penambahan gugus kimia
- c) Permukaan terbebas dari benda asing
- d) Topografi permukaan yang bervariasi sehingga dapat meningkatkan ikatan mekanis di permukaan
- e) Meningkatkan tegangan permukaan, terutama pada material komposit yang mengandung gugus polar
- f) Meningkatkan luas area kontak

Pada suatu campuran komposit, perlu dilakukan sebuah hipotesa awal mengenai sifat dari material komposit yang diinginkan sesuai dengan aplikasinya. Sebagai contoh, diinginkan sebuah komposit dengan sifat mekanis yang baik dan juga sifat konduktivitas yang baik. Dalam hal ini dapat digunakan material polimer yang memiliki sifat mekanis yang baik, tetapi sifat konduktivitasnya kurang baik. Sifat konduktivitas ini dapat ditingkatkan dengan penambahan penguat karbon. Namun, penambahan penguat karbon ini dapat menurunkan sifat

mekanis dari material komposit yang dihasilkan karena sifatnya yang getas. Oleh karena itu, dibutuhkan komposisi yang tepat untuk mendapatkan sifat mekanis dan konduktivitas yang optimal.

## II.6. Grafit *Electric Arc Furnace*

Pembuatan baja dengan dapur busur listrik (*Electric Arc Furnace*) umum dan banyak dilakukan untuk melebur *scrap* yang akan digunakan untuk membuat baja paduan. *Scrap* dilebur dengan bantuan elektroda yang dialiri arus listrik sehingga menghasilkan panas sehingga dapat dimanfaatkan lagi untuk pembuatan baja paduan yang mempunyai nilai ekonomis yang lebih tinggi seperti. Gambar 2.13 adalah proses peleburan baja dengan EAF [29].



**Gambar 2. 13.** Tahapan Proses Pembuatan Baja dalam Dapur Busur Listrik [29]

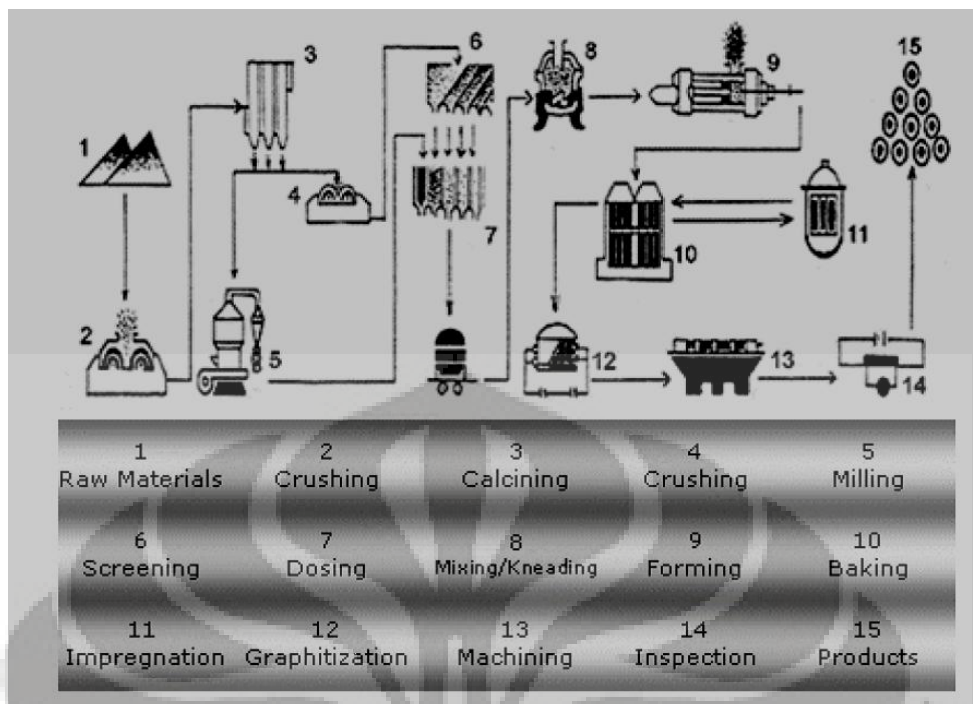
Panas berasal dari arus yang mengalir pada elektroda dan hantaran panas akan berinteraksi dengan *scrap* didalam dapur. Dibutuhkan energi listrik sekitar 50-120 M watt untuk melebur baja dengan temperatur 1500-1550°C, kebutuhan energi ini bergantung dari ukuran dapur yang digunakan untuk melebur [30].

Ketika elektroda dan scrap saling bersentuhan seperti terjadinya hubungan singkat, maka timbul panas pada permukaan sentuh. Energi panas yang dihasilkan karena interaksi ini bisa mencapai temperatur 4000°C akibat pancaran ion-ion yang terjadi antara elektroda dan scrap. Jika elektroda dan bahan baku yang akan dilebur tidak dipisahkan secara cepat dan jarak antara keduanya tidak terlalu jauh, arus dapat mengalir melalui udara yang terionisasi diantara elektroda dan bahan itu sendiri. Dari prinsip dapur busur listrik pada peleburan baja, dibutuhkan elektroda yang mempunyai konduktivitas yang sangat tinggi agar dapat dihasilkan busur listrik pada ketika proses peleburan. Elektroda grafit merupakan pilihan yang tepat untuk digunakan sebagai elektroda dalam proses peleburan baja dapur busur listrik karena grafit bersifat inert dan memiliki konduktivitas listrik yang sangat baik.

**Tabel 2. 4.** Karakteristik elektroda dapur busur listrik [30]

diameter	mm	350-450	500-650	700-800
Densitas	g/cm <sup>3</sup>	1.6-1.75	1.67-1.77	1.68-1.77
Elektrikal resistance	Ωμm	5-7.5	4.5-5.5	4-5.5
Kekuatan flexural	N/mm <sup>2</sup>	8-13	10-13	10-13
Konduktivitas panas	W/(K.m)	220-270	250-280	250-300
Koefisien ekspansi panas	μm/(K.m)	0.5-1.1	0.3-0.6	0.3-0.6

Proses pembuatan elektroda grafit melalui beberapa tahapan proses yang cukup panjang hingga akhirnya dapat digunakan sebagai elektroda di dapur busur listrik. Dalam proses pembuatan tahap impregnasi dan grafitisasi sangat mempengaruhi sifat elektrik terhadap peningkatan nilai konduktivitas. Skema tahapan pembuatan elektroda grafit [32] :

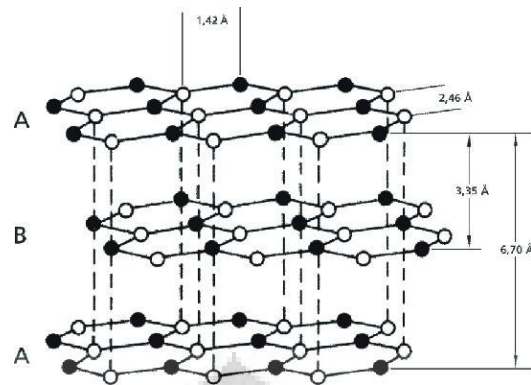


**Gambar 2. 14.** Pembuatan elektroda grafit dapur busur listrik [32]

Grafit adalah salah satu bentuk modifikasi dari karbon yang menyerupai struktur dari intan. 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. Perbedaan jenis ikatan ini menciptakan derajat anisotropik pada grafit. Perbedaan jenis ikatan ini berada dalam arah kristalografi yang berbeda. Sebagai contoh, grafit mampu berlaku sebagai pelumas padat sebagai akibat dari sifat anisotropik tersebut. Ikatan Van der Waals yang lemah memungkinkan tiap lapisan bergerak secara individual dan memberikan sifat pelumasan yang baik [30].

Keunikan sifat dari grafit berasal dari keistimewaan struktur lapisan dan sifat inert terhadap kimia menjadikan material ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi karena [33].:

1. Memiliki konduktivitas termal dan elektrik yang baik
2. Memiliki sifat sebagai lubricant yang baik pada perubahan temperatur dan tekanan
3. Memiliki ketahanan oksidasi dan imun pada lingkungan agresif



**Gambar 2. 15.** Struktur kristal Grafit [33]

Pada aplikasinya sebagai pelat bipolar, grafit mampu memberikan konduktivitas listrik yang baik dan juga meningkatkan sifat mekanis dari komposit tersebut. Selain itu, penambahan grafit juga mampu meningkatkan *machinability* dari material komposit karena sifatnya yang baik sebagai pelumas padat. Hal-hal tersebut mampu memberikan performa yang baik dan stabil dalam aplikasi sebagai pelat bipolar.

## II.7. Carbon Black

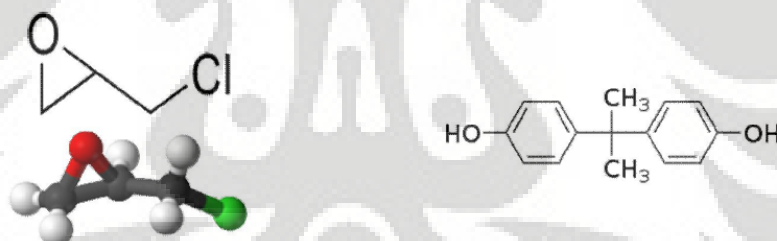
*Carbon black* atau karbon hitam merupakan padatan karbon amorf yang dibentuk dengan proses deposisi dari partikel padat dalam fasa gas. Karbon hitam memiliki ukuran partikel yang sangat halus. *Carbon black* adalah suatu fungsi dari sumber “bahan bakar” manufaktur dan jenis proses pembakaran yang digunakan. Karbon hitam digolongkan berdasarkan kemampuan mewarnai suatu luas permukaan, ukuran partikel utama, struktur (jumlah partikel utama yang menyatu membentuk partikel sekunder), dan konduktivitasnya. *Carbon black* dapat bersifat karsinogenik terhadap tubuh manusia, dimana ia dapat mengganggu jaringan pernafasan apabila debu terkumpul dalam konsentrasi tinggi

Aplikasi *carbon black* dalam dunia polimer antara lain digunakan untuk zat pewarna, proteksi *ultra violet* (UV), campuran pada plastik konduktif, campuran pada karet, peningkat aliran elektron, penghilang listrik statik dalam partikel non-konduktif, dan sebagai bahan penguat polimer [34]. Karbon hitam juga umum digunakan sebagai *reinforce* pada ban untuk meningkatkan kekakuan,

*high performance coating, toner* serta tinta untuk printer dan *conductive powder* untuk komposit matriks polimer [22]. *Carbon black* mempunyai *surface area to volume ratio* yang tinggi, walaupun masih lebih rendah daripada karbon aktif [34].

## II.8. Epoxy Resin

*Epoxy resin* salah satu jenis polimer *thermosetting* yang umum digunakan sebagai matriks atau pengikat yang dapat jika melalui proses pemanasan pada temperature tertentu dan tidak dapat dilakukan pemanasan ulang [35]. Polimer termoset umumnya terdiri dari dua konstituen penyusun yaitu resin dan *curing agent* yang jika dicampurkan akan terjadi reaksi polimerisasi pada temperatur ruang. Hasil reaksi ini akan membentuk matriks *cross-linked* dengan kekuatan tinggi dan kekuatan adhesi yang baik. *Epoxy resin* yang paling umum digunakan adalah hasil reaksi antara epichlorhydrin dan bisphenol A. Aplikasi yang paling umum untuk material *epoxy* adalah untuk *coating, adhesive* dan material komposit dengan penguat *carbon fiber* dan fiberglass.

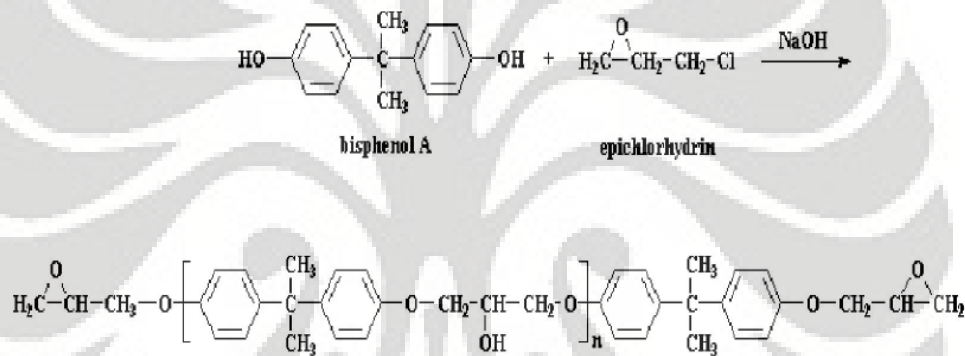


**Gambar 2. 16** Struktur Epichlorhydrin dan Bisphenol A [35]

*Epoxy resin* merupakan matriks terbaik untuk berbagai jenis komposit, karena memiliki daya isi dan juga sebagai agen penguat yang baik untuk komposit. Reaksi kimia antara *epoxy resin* dengan agent yang lain tidak perlu banyak memerlukan daya pembasahan yang telalu besar. Berikut ini karakteristik dari *epoxy resin* [36,37]:

1. Kekuatan adhesi yang sangat baik
2. Ketahanan yang baik terhadap panas dan zat kimia lain
3. Kemungkinan terjadinya penyusutan selama polimerisasi sangat kecil.
4. *Moisture Resistance*

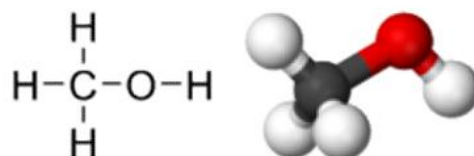
5. Sifat mekanis yang cukup baik (tergantung jenis *epoxy* tersebut)
6. Sifat *electrical insulating* (isolator listrik) yang sangat baik
7. Kemampuan untuk pemodifikasian sifatnya sangat mudah (contohnya: konduktivitas listrik dapat mudah ditingkatkan dengan penambahan aditif/filler yang mampu menghantarkan listrik dengan baik).
8. Memiliki ketahanan terhadap *creep* dan fatik.
9. Berbahaya karena mengandung racun kimia jika belum direaksikan
10. Daya penyerapan terhadap air sangat tinggi
11. Sulit untuk menggabungkan antara kekuatan dan ketahanan terhadap suhu tinggi
12. Polimerisasinya lambat



**Gambar 2. 17.**Reaksi pembentukan Epoxide [38]

## II.9 Methanol

Methanol digunakan sebagai pelarut dan pengencer untuk *epoxy resin* serta *epoxy hardener* agar dapat bercampur dengan grafit secara homogen sehingga pembasahan permukaan grafit bisa lebih baik dan menjangkau area yang lebih luas. Methanol sebenarnya adalah zat kimia beracun dengan formula  $\text{CH}_3\text{OH}$ .

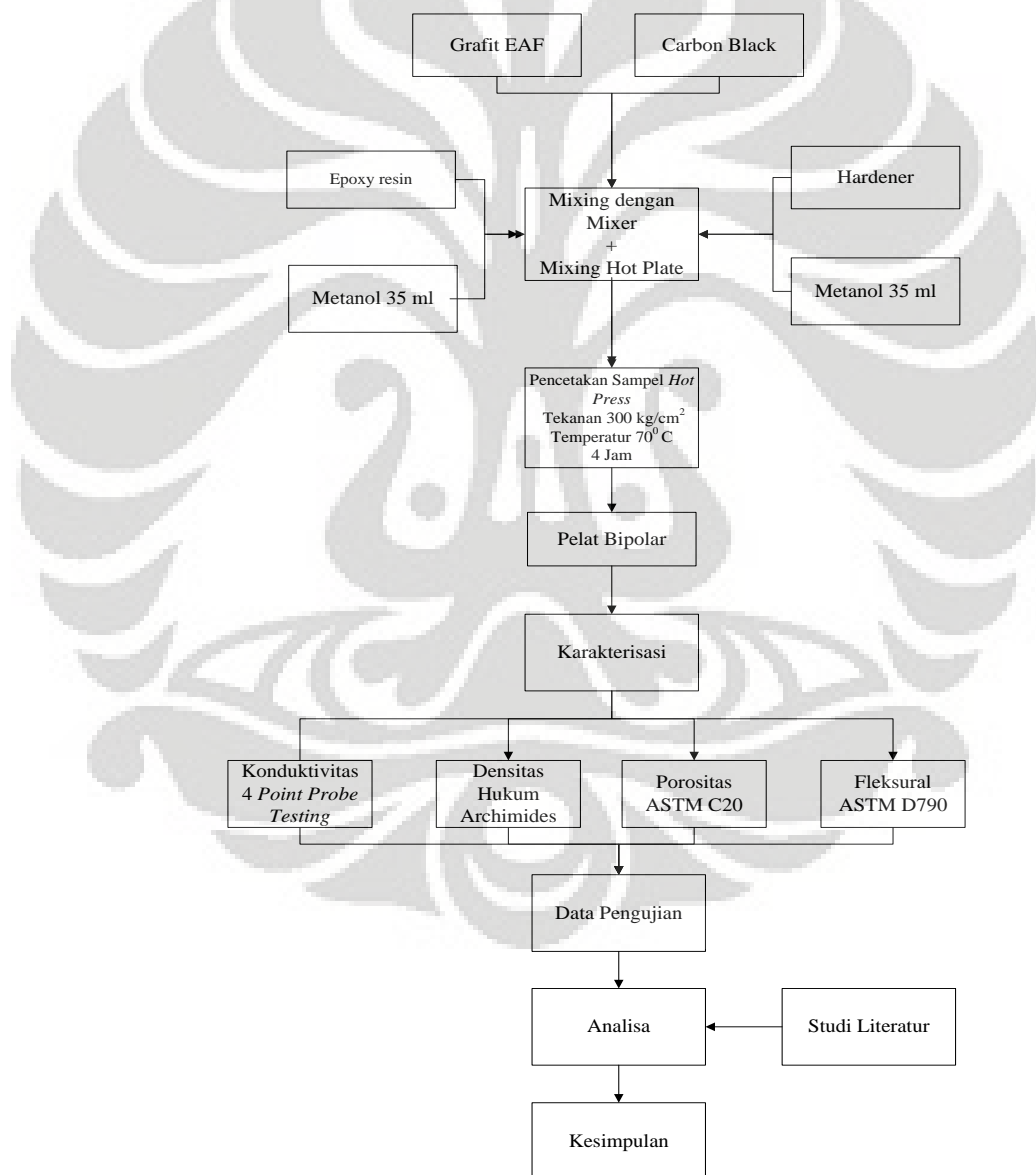


**Gambar 2. 18.** Struktur senyawa Methanol [39]

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir berikut menggambarkan secara umum kegiatan preparasi dan pengujian sampel yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan sifat dan karakteristik terhadap penambahan 10-20 wt.% CB ke dalam komposit pelat bipolar grafit limbah EAF.



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian



## 3.2 Alat dan Bahan

### 3.2.1 Peralatan

Berikut ini adalah peralatan yang digunakan didalam penelitian untuk menghasilkan pelat bipolar dan pengujian karakterisasi terhadap pelat bipolar grafit limbah EAF dengan penambahan 10-20 wt.% *carbon black* :

1. Timbangan Digital
2. *Hot Plate Magnetic Stirring*
3. Cetakan *Stainless Steel*
4. *Mixer*
5. Mesin *Hot Press*
6. *Conductivity Four Point*
7. *Probe Test Machine Universal Testing Machine*
8. *Dryer*
9. *Oven*

### 3.2.2 Bahan

Pada penelitian ini, digunakan material komposit untuk membuat pelat bipolar. Material komposit menggunakan polimer sebagai matriks dan karbon sebagai penguat. Polimer yang digunakan sebagai matriks adalah *epoxy resin*, sedangkan karbon yang digunakan sebagai penguat adalah grafit limbah EAF dan *carbon black*. *Epoxy resin* diencerkan dengan methanol yang bertujuan untuk pembasahan material komposit untuk membentuk *interface* yang baik sehingga dapat terbentuk campuran yang homogen. Komposisi dari masing-masing bahan penyusun sampel tergantung pada variabel yang digunakan dengan beral total per sampel sebesar 180 gram. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

- a) *Epoxy resin*, polimer termoset yang digunakan sebagai matriks *binder* adalah epoxy resin dengan merek dagang *Eposchon (Bhispenol A-epichlorohydrin)*. Spesifikasi dari epoxy resin yang digunakan dalam penelitian terlampir pada tabel 3.1. Polimer *epoxy* yang digunakan memerlukan sebuah *coupling agent* sebagai stimulant terjadinya proses

polimerisasi dengan baik pada suhu ruang. Oleh karena itu digunakan *hardener* dengan merek dagang *Eposchon (polyaminoamide)*. Spesifikasi dari *hardener* yang digunakan dalam penelitian terlampir pada tabel 3.2.

- b) Methanol, penelitian ini menggunakan methanol teknis dengan merek dagang Brastaco. Methanol berfungsi sebagai pengencer polimer *epoxy* pada saat pencampuran bahan-bahan pelat bipolar. Spesifikasi metanol yang dipakai pada penelitian ini terlampir pada tabel 3.3.
- c) Grafit Limbah EAF, penelitian ini menggunakan grafit limbah EAF dari PT Krakatau Steel. Komposisi kimia grafit yang dipakai pada penelitian ini dapat dilihat pada lampiran.
- d) *Carbon Black*, penelitian ini *carbon black* yang dipakai berguna sebagai material semi konduktif. *Carbon black* dengan luas permukaan yang luas akan mampu menyaring arus listrik dan membentuk jaringan karbon yang konduktif. Namun, struktur *carbon black* yang berporos akan mengurangi sifat mekanis dari komposit.

### 3.3 Prosedur Penelitian

#### 3.3.1 Preparasi Sampel

Sebelum sampel digunakan dalam pengujian harus melalui beberapa tahapan antara lain :

- a) *Crushing, drying, milling* dan *screening* grafit, bongkahan diameter elektroda grafit yang berbentuk limbah dihancurkan, untuk menghasilkan ukuran partikel yang homogen dilakukan milling dengan disc mill dan rotary mill yang akan menghasilkan ukuran  $< 50 \mu\text{m}$ . Setelah itu dilakukan screening untuk mendapatkan butir grafit yang  $> 325\#$  ( $\sim < 44\mu\text{m}$ ). Proses *milling* grafit EAF ini dilakukan dalam kondisi kering karena grafit telah mengalami proses drying dengan tujuan menghilangkan kandungan uap air sehingga dapat mempercepat proses penghalusan.
- b) Penimbangan, komponen-komponen penyusun material komposit yang akan digunakan didalam penelitian ditimbang dengan menggunakan timbangan digital yang telah terkalibrasi dengan baik. Setiap bahan yang

digunakan ditimbang sesuai dengan komposisi yang telah ditentukan sebelumnya dengan variabel berupa penambahan 10-20 wt.% *carbon black* untuk menghasilkan suatu komposit pelat bipolar berbahan dasar grafit limbah EAF. Perbandingan yang digunakan adalah 20% matriks dan 80% penguat grafit dan *carbon black*. Berikut adalah komposisinya :

**Tabel 3.1** Komposisi Pelat Bipolar

Material Penyusun	Grafit EAF + <i>Filler Carbon Black</i> (80%)			Polimer (Matriks PMC) (20%)	
	Berat Grafit EAF (gram)	% CB	Berat CB (gram)	Resin (gram)	Hardener (gram)
Berat Total	144 gram			36 gram	
A1	129,6	10	14,4	18	18
A2	126	12,5	18	18	18
A3	122,4	15	21,6	18	18
A4	118,8	17,5	25,2	18	18
A5	115,2	20	28,8	18	18

Keterangan : A1 = 10% CB + Grafit EAF

A2 = 12,5% CB + Grafit EAF

A3 = 15% CB + Grafit EAF

A4 = 17,5% CB + Grafit EAF

A5 = 20% CB + Grafit EAF

- c) Pencampuran (*Mixing*), proses selanjutnya yang dilakukan setelah dilakukan penimbangan adalah proses pencampuran (*mixing*) dari bahan-bahan yang telah ditimbang sebelumnya. Tahap ini merupakan tahap yang paling penting karena menentukan karakteristik akhir dari pelat bipolar yang dihasilkan. Diharapkan dengan proses pencampuran yang baik, komponen-komponen penyusun material komposit dapat terdistribusi secara merata pada setiap bagian dari pelat bipolar yang dihasilkan.

Masing-masing komponen dicampur dengan menggunakan *mixer* hingga terbentuk suatu adonan yang homogen. Tahapan proses mixing adalah sebagai berikut :

- Campurkan grafit EAF dan *carbon black* (CB) kedalam beaker glass 1 liter selama  $\pm 5$  menit
- Epoxy resin diencerkan dengan methanol lalu dimasukkan kedalam beaker glass yang berisi grafit dan CB, dimixxing selama  $\pm 5$  menit.
- Epoxy hardener diencerkan dengan methanol, lalu dimasukkan dan dimixxing selama  $\pm 5$  menit.
- Blending atau mixing diatas *Hot Plate* ( $T = 100^{\circ} C$ ) selama  $\pm 10$  menit.

Hasil akhir adonan yang baik ditandai dengan butir-butir halus dan menggumpal. Adonan juga tidak boleh terlalu kering ataupun terlalu basah karena dapat menyebabkan kegagalan atau keretakan di dalam pelat bipolar yang akan dibuat.



**Gambar 3. 2.** Hasil Proses *Mixing*

- d) Pencetakan Sampel, sampel pelat bipolar yang akan dibuat didalam penelitian dicetak dengan menggunakan cetakan yang terbuat dari baja tahan karat dengan ukuran 15 x 15cm. Bakalan yang telah dicampur pada proses sebelumnya, dimasukkan kedalam cetakan hingga seluruh bagian cetakan terisi dengan bakalan. Bakalan tersebut harus terdistribusi secara merata pada setiap permukaan cetakan agar terbentuk sampel yang merata dan mencegah adanya bagian tertentu yang tidak terisi. Sampel dicetak dengan menggunakan mesin *hot press* dengan kondisi temperatur dan

tekanan yang dapat diatur. Cetakan akan ditekan dengan pembebanan hidrolik agar bakalan yang dimasukkan kedalam sampel menjadi padat dan akan menyatu ketika dilakukan proses pemanasan. Tekanan yang diberikan adalah sebesar  $300 \text{ Kg/cm}^3$  dengan temperatur sebesar  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  selama 4 jam dan didiamkan selama 12 jam.



**Gambar 3. 3.** Proses Pencetakan

Prosedur proses pencetakan yang dilakukan didalam penelitian adalah :

- Bersihkan cetakan baja tahan karat yang akan digunakan dari kotoran yang menempel dan lumuri dengan oli secara merata pada setiap bagian cetakan
  - Masukkan bakalan hasil pencampuran ke dalam cetakan hingga merata
  - Tutup cetakan dan masukkan ke dalam mesin *hot press*
  - Atur tekanan mesin di indikator tekanan hingga  $300 \text{ Kg/cm}^3$  dan temperatur sebesar  $70 \text{ }^\circ\text{C}$
  - Diamkan mesin bekerja selama 4 jam
  - Matikan mesin dan *release* tekanan yang diberikan sebelumnya
  - Diamkan sampel di dalam cetakan pada temperatur kamar selama 12 jam dan setelah itu buka sampel dari cetakan
- e) Pembuatan spesimen uji, disesuaikan dengan standar ASTM yang dipakai pada pengujian masing-masing karakterisasi yang akan dilakukan. Sampel pelat bipolar hasil pencetakan akan dipotong sesuai

dengan dimensi benda uji yang akan dilakukan. Untuk uji konduktivitas, uji densitas dan uji porositas menggunakan sampel dan ukuran yang minimal sebesar 2 x 2 cm, sedangkan untuk pengujian fleksural menggunakan sampel sebesar 12 x 1,5 x 0,3 cm.

### 3.3.2 Pengujian Karakteristik Material

- a) Pengukuran densitas, pengujian ini dilakukan untuk mengetahui massa jenis atau densitas dari pelat bipolar yang dihasilkan. Densitas memiliki peranan yang penting untuk pelat bipolar karena semakin besar densitas, maka semakin berat bobot pelat bipolar tersebut. Hal ini menyebabkan kurangnya efisiensi yang dihasilkan akibat bobot yang berlebih. Pengujian akan dilakukan berdasarkan ASTM D 792 (*Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*). Proses pengukuran akan dilakukan dengan prinsip perbandingan massa sampel di udara dengan massa sampel di dalam air. Semakin besar perbandingannya, maka semakin besar pula densitas dari sampel pelat bipolar yang dihitung.

Prosedur pengukuran densitas yang dilakukan didalam penelitian adalah :

- Timbang massa sampel di udara dengan timbangan digital
- Siapkan *beaker glass* berisi air dan sebuah gantungan penimbang
- Timbang massa sampel didalam air pada gantungan penimbang dengan timbangan digital

Dari kedua hasil penimbangan tersebut, maka kerapatan massa sampel bisa diperoleh dengan menggunakan persamaan:

$$\rho_{\text{sampel}} = \frac{A}{(A-B)} \times \rho_{\text{air}} \quad (3.1)$$

dimana,  $\rho_{\text{sampel}}$  = Densitas spesimen ( $\text{gr/cm}^3$ )

A = Massa spesimen di udara (gr)

B = Massa spesimen di dalam air (gr)

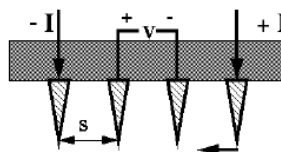
$\rho_{\text{air}}$  = Massa jenis air ( $\text{gr/cm}^3$ )

(catatan : massa jenis air untuk setiap temperatur tidak sama)



**Gambar 3. 4.** Penimbangan Massa di dalam Air

- b) Pengujian konduktivitas listrik, pengujian ini dilakukan untuk mengetahui konduktivitas listrik dari pelat bipolar ketika diaplikasikan sebagai salah satu komponen pada PEMFC. Konduktivitas merupakan suatu parameter yang dapat digunakan untuk mengetahui seberapa baik suatu material untuk mengalirkan arus listrik. Semakin besar nilai konduktivitas listriknya, maka semakin baik pula material tersebut mengalirkan arus listrik. Untuk mengetahui seberapa besar konduktivitas dari sampel, digunakan alat *four point probe test*. Alat ini terdiri dari 4 buah *probe* dengan jarak tertentu yang terbuat dari logam tungsten, dimana *probe* 1 dan 4 sebagai titik pengukur arus yang dibaca di amperemeter, sedangkan *probe* 2 dan 3 sebagai pengukur tegangan yang akan dibaca di voltmeter. Masing-masing titik dipasang suatu pegas untuk meminimalisir kerusakan yang terjadi pada sampel pada saat proses pengujian. Dengan alat ini, akan diketahui nilai resistivitas dari sampel. Sampel yang digunakan bisa merupakan lembaran tipis atau tebal. Yang harus diperhatikan ketika pengujian adalah sampel yang diuji harus memiliki permukaan yang rata, sehingga perlu dilakukan proses pengamplasan sebelum dilakukan proses pengujian konduktivitas. Berikut adalah skema dari alat uji konduktivitas yang digunakan :



**Gambar 3. 5.** Skema Uji konduktivitas

Prosedur pengujiannya sebagai berikut :

- Siapkan sampel dengan permukaan rata yang akan diuji
  - Nyalakan voltmeter dan ubah tipe mesin menjadi DC
  - Masukkan sampel kedalam alat *four point probe test* (sampel diletakkan tepat ditengah dimana 4 buah *probe* berada)
  - Pilih mode *slice* sesuai dengan bentuk sampel yang akan diuji
  - Masukkan data ketebalan dari sampel yang akan diuji
  - Tutup sampel dengan penutup alat
  - Nilai resistivitas (R) akan terlihat pada indikator alat
- Nilai konduktivitas dari sampel dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\rho = \frac{1}{R} \quad (3.2)$$

dimana,  $\rho$  : Nilai konduktivitas material ( $\text{Scm}^{-1}$ )

R : Nilai resistivitas material ( $\Omega\text{cm}$ )

- c) Pengukuran porositas, pengujian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar poros yang terbentuk dari pelat bipolar yang dihasilkan. Semakin banyak poros yang terbentuk, maka semakin buruk efektivitas pelat bipolar yang digunakan. Hal ini dikarenakan, gas hidrogen yang digunakan sebagai bahan bakar didalam *fuel cell* akan mudah keluar dan efisiensi prosesnya menjadi buruk. Pengujian porositas mengacu pada standar ASTM C 20 (*Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water*).

Prinsipnya adalah perbandingan massa antara sampel yang telah dikeringkan pada oven, massa di dalam air dan massa di udara setelah direndam air dengan suhu  $100^{\circ}\text{C}$ .

Prosedur pengujiannya sebagai berikut :

- Keringkan sampel dalam oven dengan temperatur  $100^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam
- Timbang massa sampel setelah dioven dengan timbangan digital dan catat sebagai D



- Siapkan air didalam *beaker glass* dan panaskan hingga suhu  $100^{\circ}$  C pada *hot plate magnetic stirring*
- Rendam sampel didalam *beaker glass* yang berisi air selama 2 jam
- Diamkan sampel didalam air pada temperatur kamar selama 12 jam
- Timbang massa sampel setelah didiamkan didalam air dengan timbangan digital dan catat sebagai S
- Keringkan sampel dengan kain katun
- Timbang sampel yang telah dikeringkan dengan timbangan digital dan catat sebagai W

Nilai porositasnya dihitung dengan aturan sebagai berikut:

$$\text{Porositas (\%)} = \frac{S_W - D}{D - S} \times 100 \% \quad (3.3)$$

dimana : D : Massa spesimen di udara setelah di oven (gr)

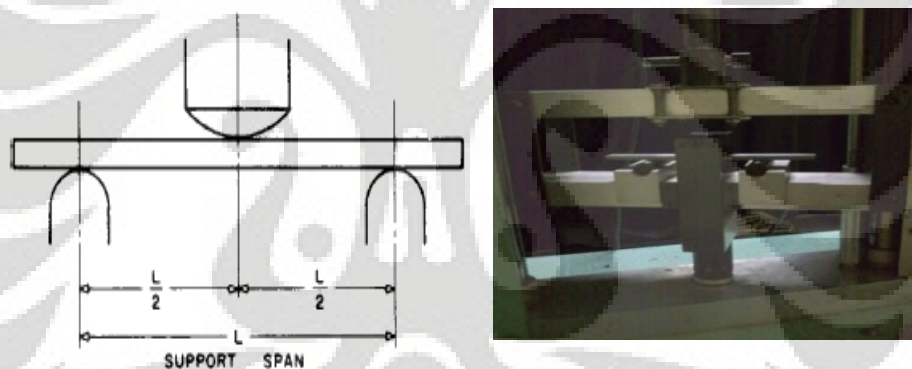
S : Massa dalam air setelah direbus dan didiamkan selama 12 jam (gr)

Sw : Massa spesimen di udara setelah dikeringkan (gr)



**Gambar 3. 6.** Pengujian Porositas

d) Pengujian fleksural, pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan pelat bipolar terhadap pembebanan karena pada pengaplikasiannya di dalam *fuel cell*, pelat bipolar mengalami pembenanan dari komponen-komponen penyusun lainnya. Maka dari itu, diperlukan ketahanan terhadap beban fleksural yang baik untuk menciptakan pelat bipolar dengan sifat mekanik yang baik pula. Pengujian fleksural dilakukan dengan alat uji *bending* yang mengacu pada standar ASTM D790 : “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”. Pengujian dilakukan dengan melakukan pembebanan pada 3 titik dengan perincian panjang 60 mm, lebar 13 mm dan tebal 3 mm. Dua titik tumpuan terletak pada pinggir spesimen uji dan satu titik tumpuan dibebankan pada bagian tengah. Berikut adalah skema pengujian tekuk :



**Gambar 3. 7.** Skematis Pengujian Fleksural

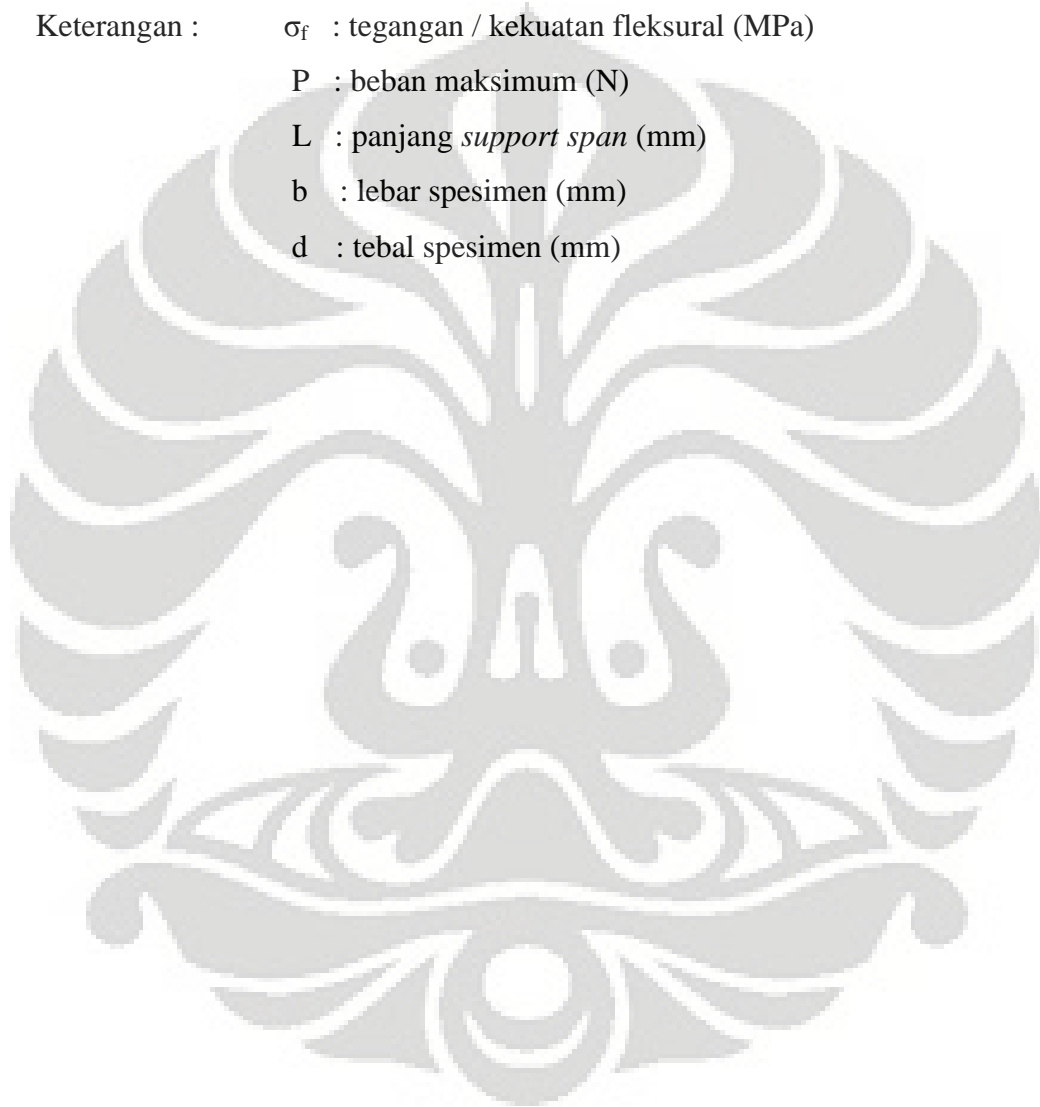
Adapun prosedur pengujian kelenturan adalah :

- Preparasi spesimen pengujian. Hal ini termasuk pemotongan spesimen pengujian dan pengkondisian spesimen.
- Ukur lebar dan ketebalan spesimen.
- Letakkan spesimen pada grip pengujian.
- Atur jenis pembabanan dan kecepatan
- Memulai pembebanan hingga spesimen mengalami perpatahan.
- Pada indikator akan terlihat besarnya pembebanan yang diberikan hingga spesimen mengalami perpatahan

Data yang didapatkan dari pengujian ini yaitu berupa beban maksimum yang dapat diterima material hingga material tersebut mengalami awal perpatahan. Beban ini kemudian dihitung dengan menggunakan rumus berikut untuk mendapatkan nilai tegangan atau kekuatan lentur dari material.

$$\sigma_f = \frac{3 PL}{2 b d^2} \quad (3.4)$$

Keterangan :       $\sigma_f$  : tegangan / kekuatan fleksural (MPa)  
                         P : beban maksimum (N)  
                         L : panjang *support span* (mm)  
                         b : lebar spesimen (mm)  
                         d : tebal spesimen (mm)



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Preparasi Sampel

Sebelum dilakukan pengujian untuk karakterisasi pelat bipolar, ada beberapa tahapan prosedur yang harus dilewati antara lain proses *crushing*, *milling*, *screening*, *mixing*, pencetakan, dan pembuatan spesimen uji. Tahapan proses ini akan berpengaruh terhadap karakteristik dari pelat bipolar yang akan diteliti.

#### 4.1.1 Hasil *Crushing*, *Milling* dan *Screening*

Grafit EAF yang masih dalam bentuk bongkahan harus melalui proses *crushing* dan *milling* untuk mendapatkan bentuk partikel yang halus dan lolos dalam *screening* partikel 325# ( $<44 \mu\text{m}$ ). Proses ini dilakukan untuk mendapatkan bentuk partikel yang halus yang seragam dengan partikel *carbon black* dan mengarahkan penelitian kedepannya untuk membuat pelat bipolar dengan partikel dalam skala nano.

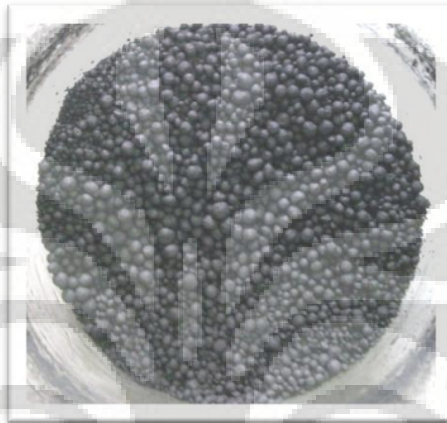


**Gambar 4. 1.** Grafit EAF

#### 4.1.2 Hasil Pencampuran (*Mixing*)

Setelah bahan-bahan yang dibutuhkan telah tersedia sesuai dengan jenis sampel yang ingin dibuat maka dilakukan proses pencampuran hingga terbentuk

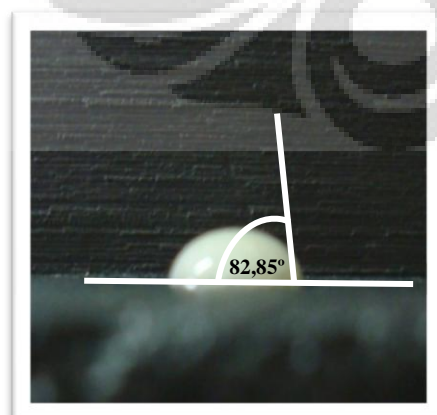
bakalan yang homogen. Proses pencampuran ini sangat dipengaruhi waktu, kecepatan dan temperatur *mixing*. Gambar 4.2 merupakan bentuk visual bakalan yang sudah tercampur homogen dan siap untuk dicetak. Butiran partikel yang semakin halus menunjukkan bahwa bakalan tercampur dengan baik sehingga sebaran konstituen penyusun juga terdistribusi merata. Dari tiap-tiap variabel tidak terlihat perbedaan yang mencolok terhadap bentuk akhir bakalan yang siap dicetak.



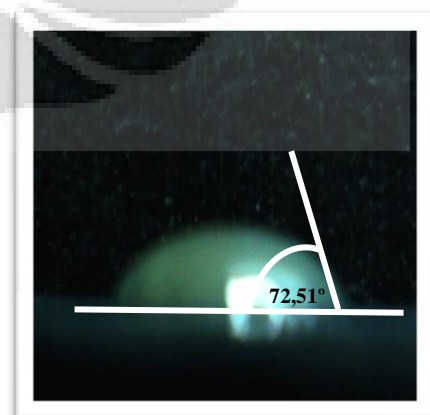
**Gambar 4. 2.** Bentuk bakalan yang homogen dan siap untuk dicetak

#### 4.1.3 Pengamatan Visual Sudut Kontak

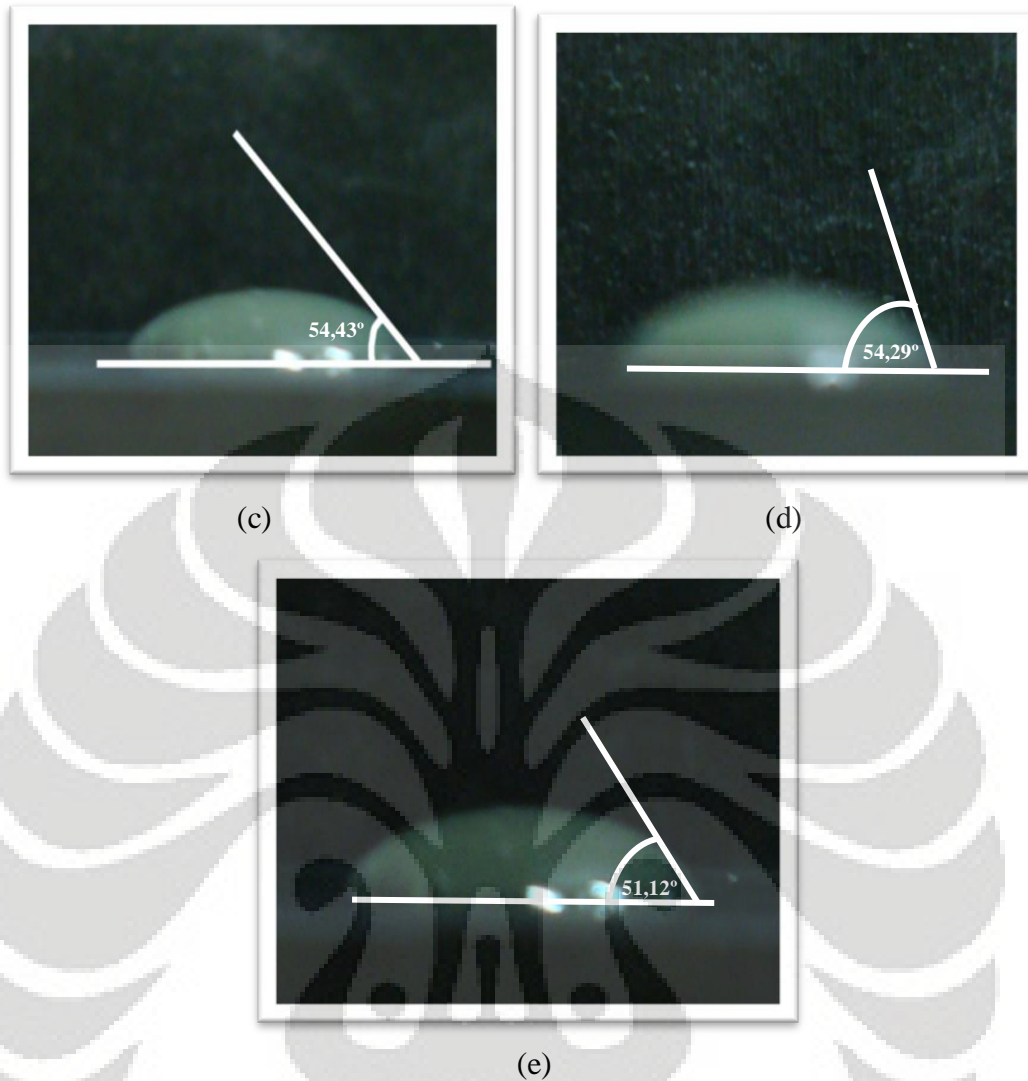
Pengujian ini dilakukan untuk melihat kemampubasahan antara *epoxy resin* yang bertindak sebagai matriks dengan grafit dalam komposit pelat bipolar. Gambar 4.3 berikut ini menunjukkan besar sudut kontak yang dibentuk antara pelat bipolar dan *epoxy resin*.



(a)



(b)



**Gambar 4. 3.** Hasil Pengujian Sudut Kontak Pelat Bipolar (a) 10 wt.% CB ; (b) 12,5 wt.% CB ; (c) 15 wt.% CB ; (d) 17,5 wt.% CB ; (e) 20 wt.% CB

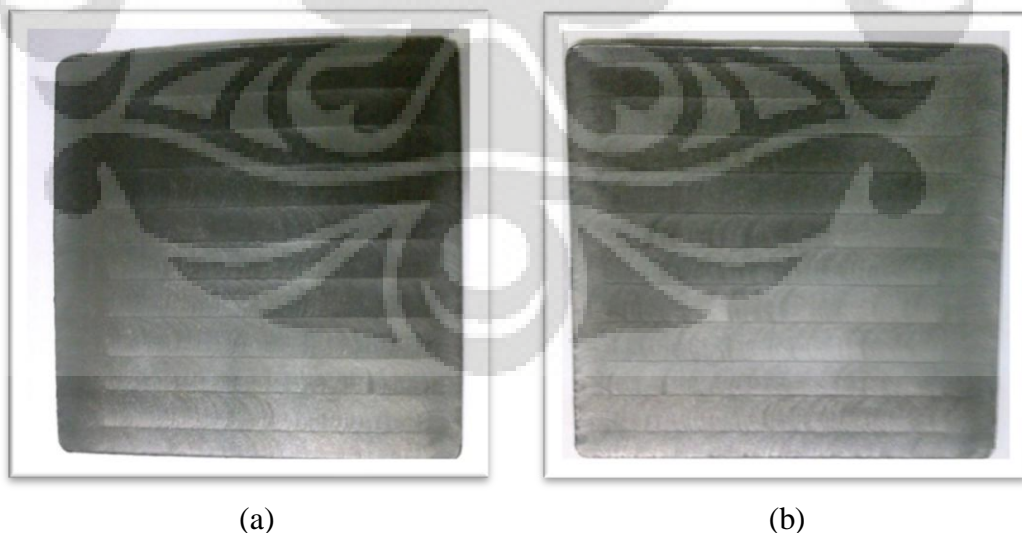
Prosedur pengujian sudut kontak diawali dengan meneteskan campuran *epoxy resin* dan *hardener* diatas komposit pelat bipolar kemudian dilakukan proses pengambilan gambar untuk menunjukkan besar sudut kontak yang terbentuk. Pembasahan dapat dikatakan baik jika matriks *epoxy resin* sempurna membasahi seluruh permukaan grafit (konstituen penyusun), yang menunjukkan adanya interaksi ikatan yang baik antara matriks dan penguat.

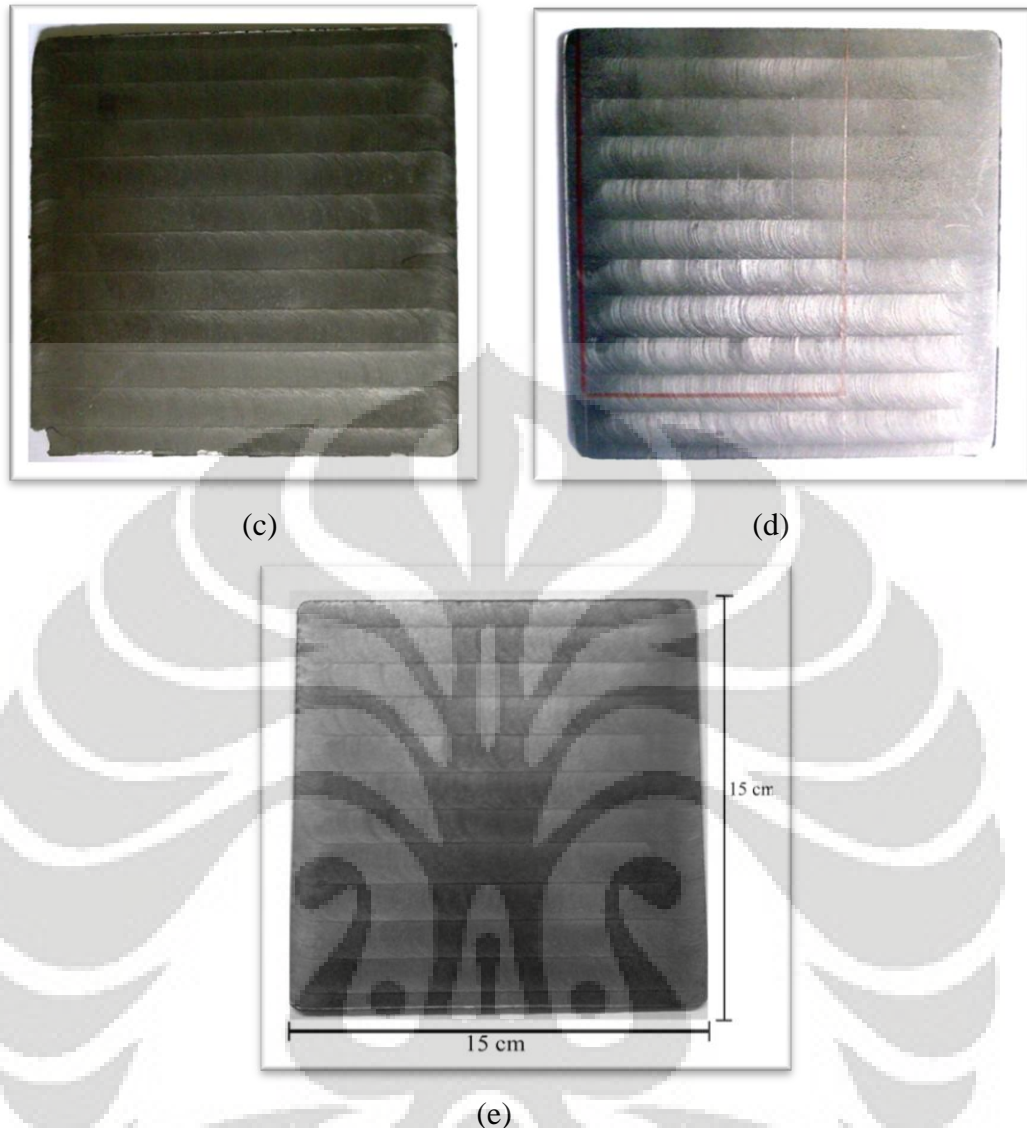
Hasil pengamatan visual dari pengujian sudut kontak tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan terhadap kemampubasahan. *Epoxy resin* membentuk sudut kontak yang kurang dari  $90^\circ$  dengan permukaan pelat bipolar. Seiring dengan penambahan CB cenderung meningkatkan kemampubasahan *epoxy resin*

terhadap pelat bipolar. Pada sampel 10 wt.% CB kemampubasahan *epoxy resin* adalah yang terendah dan kemampubasahan maksimum pada 20 wt.% CB. Hal ini dikarenakan kemampubasahan antara matriks dan penguat sangat dipengaruhi oleh sudut kontak. Kemampuan *epoxy resin* untuk membasahi penguat tersebut dapat diukur dengan energi atau tegangan permukaan cair terhadap padat dan yang ditunjukkan dengan suatu sudut kontak ( $\theta$ ) antara permukaan cair dan padat tersebut. Jika nilai  $\theta$  lebih kecil dari  $90^\circ$  (tegangan atau energi permukaan kecil), maka interaksi pembasahan yang terbentuk baik antara matriks dengan penguat.

Bentuk visual yang diharapkan dalam penelitian ini adalah sudut kontak yang kurang dari  $90^\circ$ . Pengenceran *epoxy resin* dengan metanol bertujuan sebagai *wetting agent* antara matriks *epoxy resin* dengan penguat grafit dan *carbon black* sehingga meningkatkan kemampuan membasahi permukaan konstituen penyusun material komposit. Seiring dengan penambahan wt.% *carbon black*, sudut kontak yang terbentuk antara *epoxy resin* dan permukaan pelat bipolar juga berkurang. Kemampuan pembasahan ini akan mempengaruhi sifat dan karakteristik dari pelat bipolar.

#### 4.1.4 Hasil Pengamatan Visual Pencetakan





**Gambar 4. 4.** Hasil Pencetakan Pelat Bipolar (a) 10 wt.% CB ; (b) 12,5 wt.% CB ; (c) 15 wt.% CB ; (d) 17,5 wt.% CB ; (e) 20 wt.% CB

Sampel pelat bipolar hasil pencetakan secara keseluruhan cenderung memiliki tekstur permukaan yang baik dan layak untuk dipreparasi untuk pengujian karakterisasi. Namun pada sampel 15 wt.% CB sedikit mengalami kerusakan karena pada daerah tepi pelat sedikit terlepas dari sehingga keseluruhan pelat tidak utuh dan mulus. Hal ini mungkin disebabkan karena kurangnya pengisian bakalan pada tepi cetakan sebelum di hotpress, tetapi sampel ini masih dapat digunakan karena masih tersisa banyak bagian yang dapat digunakan untuk pengujian.



#### 4.1.5 Hasil Preparasi Spesimen Uji

Sebelum dilakukan pengujian untuk karakterisasi pelat bipolar dilakukan preparasi sampel uji dengan ukuran yang telah ditetapkan sesuai standar pengujian dan dilakukan pengamplasan untuk menghaluskan permukaan sampel sehingga mereduksi inisial retak di permukaan.



**Gambar 4. 5.** Spesimen Uji (a) Konduktivitas, Densitas, dan Porositas (b) Fleksural

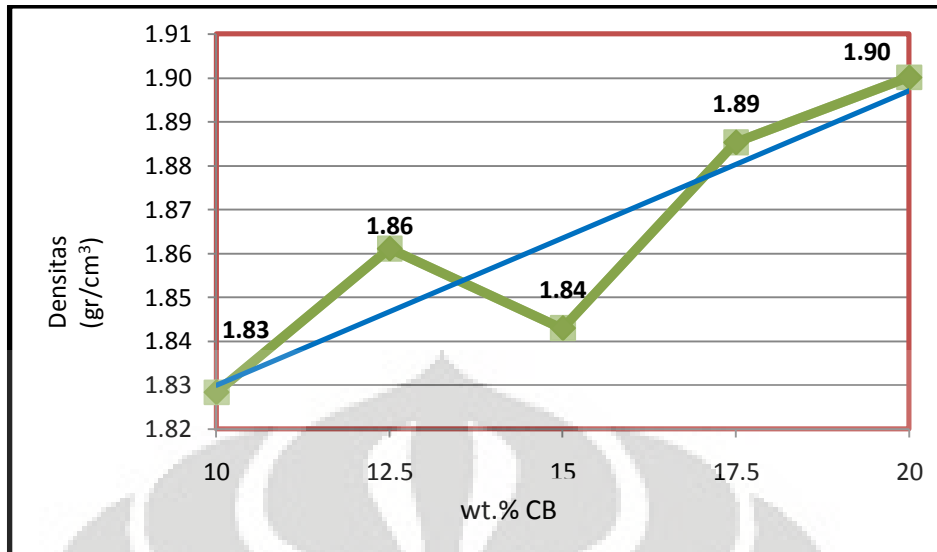
### 4. 2 Hasil Karakterisasi Pelat Bipolar

#### 4.2.1 Hasil Pengujian Densitas

Pengujian densitas bertujuan untuk mengetahui densitas dari pelat bipolar. Pengembangan pelat bipolar berbahan dasar grafit ini karena sifatnya yang ringan sehingga densitas dari pelat bipolar diperhitungkan dalam aplikasinya sebagai komponen penyusun dalam *fuel cell*. Densitas yang rendah akan memenuhi persyaratan material aplikasi pelat bipolar PEMFC dengan berat yang lebih ringan tanpa mengurangi performa yang diinginkan. Data pengujian densitas dapat dilihat pada tabel 4.1 yang dipertegas dengan gambaran grafik dari data pengujian.

**Tabel 4. 1.** Data Pengujian Densitas

Sampel Uji	wt.% CB	Densitas (gr/cm <sup>3</sup> )
1	10,0	1,83
2	12,5	1,86
3	15,0	1,84
4	17,5	1,89
5	20,0	1,90



**Gambar 4. 6.** Pengaruh Densitas Pelat Bipolar terhadap Penambahan CB

Gambar 4.6. merupakan grafik hasil pengujian densitas sampel dengan variabel 10-20 *wt.%* CB. Data yang disajikan dalam grafik dengan kombinasi kenaikan 2,5 *wt.%* CB di setiap variabel. Dari grafik terlihat kenaikan massa jenis dari pelat bipolar seiring dengan penambahan *wt.%* CB dan terjadi sedikit penyimpangan yang pada 15 *wt.%* CB. Namun kenaikan nilai densitas ini tidak terlalu mencolok dan masih dapat dikatakan bahwa penambahan *wt.%* CB tidak terlalu mempengaruhi densitas dari pelat bipolar.

Dalam pengujian ini diharapkan material dengan komposisi yang tepat, memiliki densitas yang rendah, dan kepadatan yang yang tinggi karena ingin mencapai karakteristik pelat bipolar dengan permeabilitas yang rendah sesuai dengan standar ideal pelat bipolar dengan densitas < 5gr/cm<sup>3</sup>. Berdasarkan standar ini pelat bipolar berbahan dasar grafit EAF memenuhi persyaratan densitas untuk persyaratan ideal pelat bipolar PEMFC.

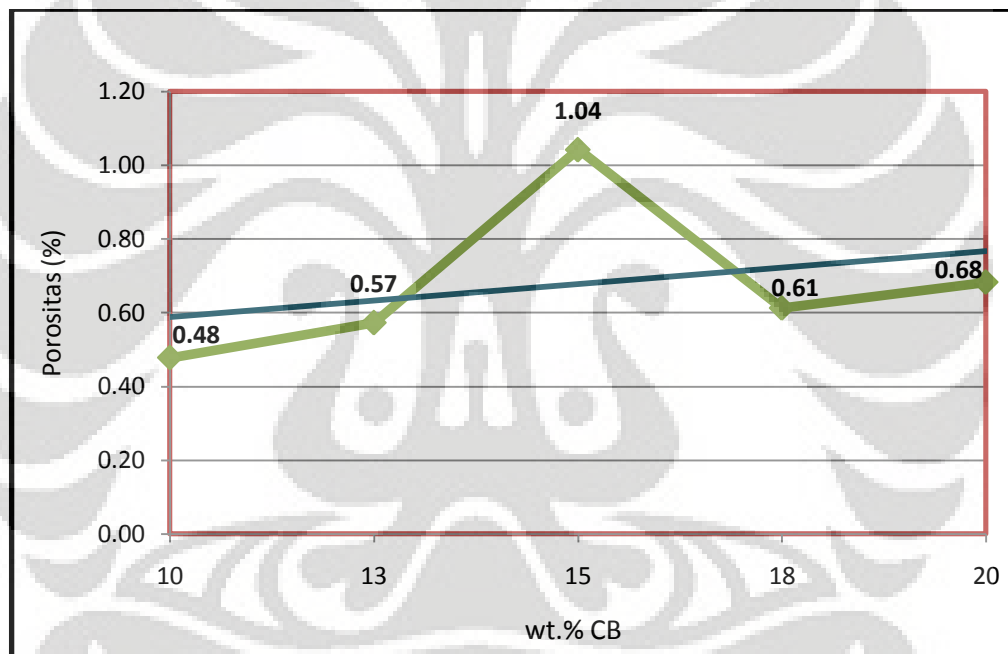
#### 4.2.2 Hasil Pengujian Porositas

Salah satu karakteristik yang dipersyaratkan dalam pelat bipolar ideal adalah tingkat porositas yang kurang dari 1%. Porositas dalam pelat bipolar akan mempengaruhi permeabilitas dari pelat bipolar terhadap gas yang ada dalam komponen PEMFC. Oleh karena itu, porositas merupakan salah satu parameter

dalam menentukan kualitas dari pelat bipolar. Diharapkan suatu pelat bipolar memiliki nilai porositas serendah mungkin agar tidak mengganggu reaksi yang terjadi pada rangkain PEMFC.

**Tabel 4.2.** Data Pengujian Porositas

Sampel Uji	wt.% CB	Porositas (%)
1	10,0	0,48
2	12,5	0,57
3	15,0	1,04
4	17,5	0,61
5	20,0	0,68



**Gambar 4. 7.** Pengaruh Porositas Pelat Bipolar terhadap Penambahan CB

Tabel 4.2 merupakan data hasil pengujian porositas yang diperjelas pada Gambar 4.7. yang memperlihatkan grafik hasil pengujian porositas pada pelat bipolar dengan matriks *epoxy* dan penguat grafit EAF dengan kenaikan 2.5 wt. % CB pada tiap variabel dengan batasan 10-20 wt.% CB. Dari gambar grafik terlihat bahwa seiring dengan penambahan wt.% CB meningkatkan % porositas dari pelat bipolar karena diketahui setelah dilakukan *screening* diketahui ukuran partikel dari CB sebesar 140# sehingga ukuran partikel CB lebih besar dari grafit EAF.

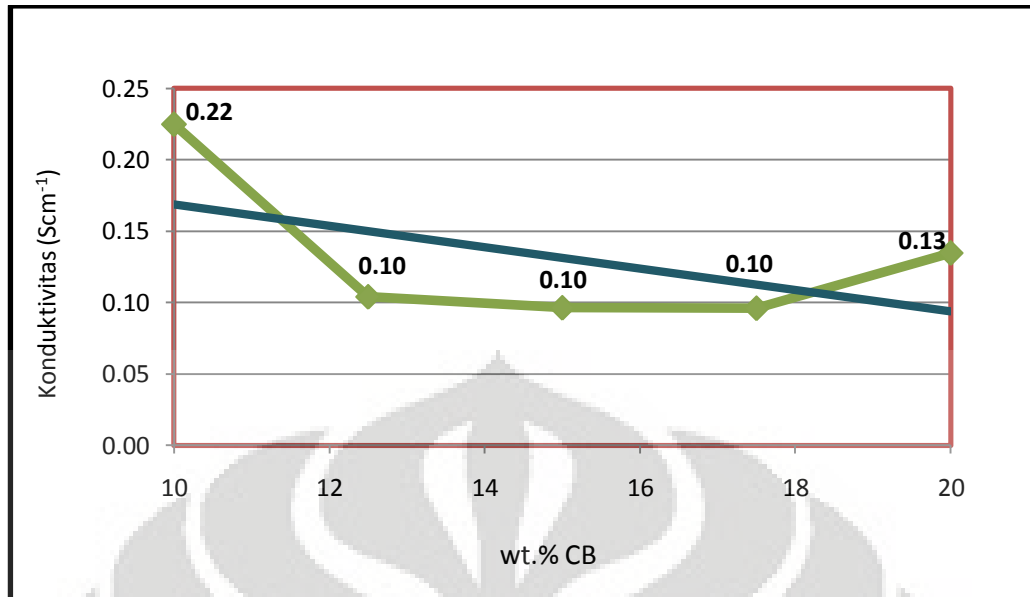
Partikel CB yang lebih kasar menyebabkan terbentuknya rongga-rongga kosong yang lebih banyak pada permukaan pelat bipolar. Jumlah porositas akan meningkat setelah dilakukan proses *hotpress* ketika pencetakan karena molekul-molekul methanol yang menguap ketika dipanaskan juga turut menyumbangkan jumlah porositas dipermukaan pelat bipolar. Diantara penyebab terjadinya rongga-rongga dalam spesimen komposit disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu tingginya viskositas campuran sehingga kemampuan alirnya rendah dan ketika dicetak kepadatannya tidak merata, granula komposit menyerap moisture karena bersifat higroskopis. Moisture yang terperangkap ketika sampel dicetak membentuk gelembung-gelembung udara.

#### 4.2.3 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik

Material pelat bipolar harus memiliki sifat konduktivitas listrik yang baik untuk mengantarkan atau menghasilkan arus listrik karena pelat bipolar sangat berperan penting pada sistem *fuel cell*. Fungsi utama dari pelat bipolar tersebut adalah mengumpulkan dan mengalirkan arus dari kutub anoda ke kutub katoda. Hasil pengukuran resistivitas menggunakan alat *four point probe* akan didapatkan suatu nilai konduktivitas ( $S.cm^{-1}$ ).

**Tabel 4.3.** Data Pengujian Konduktivitas Listrik

Sampel Uji	wt.% CB	Konduktivitas ( $S.cm^{-1}$ )
1	10,0	0,22
2	12,5	0,10
3	15,0	0,10
4	17,5	0,10
5	20,0	0,13



**Gambar 4. 8.** Pengaruh Konduktivitas Pelat Bipolar terhadap Penambahan CB

Pada gambar 4.8. menunjukkan kecenderungan pelat bipolar yang mengalami penurunan nilai konduktivitas seiring dengan penambahan *wt.%* CB, namun kembali lagi nilai konduktivitasnya naik pada 20 *wt.%* CB. Untuk mengetahui pengaruh pada komposisi yang berbeda dapat dilakukan penelitian lanjutan untuk mendapatkan data karakteristik konduktivitas pelat bipolar grafit komsit terhadap penambahan CB. Pelat bipolar yang dipersyaratkan memiliki nilai konduktivitas sebesar  $>100 \text{ S.cm}^{-1}$ . Nilai konduktivitas dari hasil pengujian ini belum memenuhi kriteria standar pelat bipolar sehingga diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan nilai konduktivitas dari pelat bipolar, baik dengan penambahan aditif maupun penggunaan polimer konduktif. Nilai konduktivitas juga dapat ditingkatkan dengan menyeragamkan ukuran partikel CB dengan grafit EAF ataupun dengan memperkecilnya. Dengan ukuran partikel CB yang kecil, persebaran partikel CB akan menjadi lebih merata sehingga fungsinya sebagai pengumpul arus dan medium dari proses migrasi elektron di dalam grafit menjadi lebih optimum.

Pada prinsipnya dengan penambahan *carbon black* yang digunakan sebagai *conducting filler*, *carbon black* dengan luas permukaan yang tinggi dapat mengumpulkan arus listrik dan membentuk jaringan karbon konduktif. *Carbon black* berfungsi sebagai medium dari proses migrasi elektron di dalam grafit,

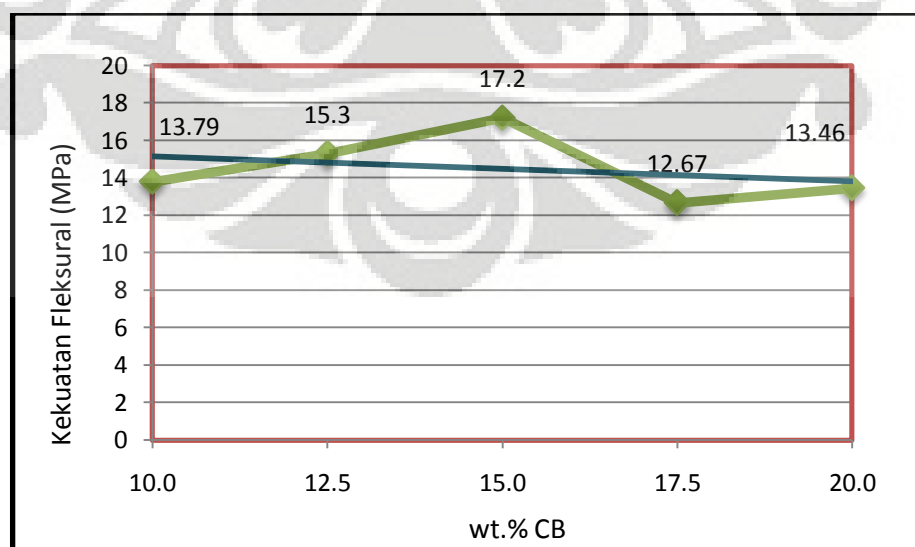
sehingga arus yang mengalir didalamnya akan saling terdorong dan mudah bergerak secara kontinyu yang menyebabkan arus yang dihasilkan akan semakin besar.

#### 4.2.4 Hasil Pengujian Fleksural

Pengujian fleksural dilakukan untuk mengetahui ketahanan material komposit terhadap beban tekan, karena pada aplikasinya sebagai pelat bipolar, material ini akan terkena beban tekan dari gas ke segala arah. Tabel 4.4. memperlihatkan data hasil pengujian fleksural yang selanjutnya ditegaskan pada Gambar 4.9. yang memperlihatkan grafik hasil pengujian densitas pada pelat bipolar dengan matriks *epoxy* dan penguat grafit EAF dengan penambahan dan tanpa penambahan CB. Dari gambar 4.9 dapat dilihat pengaruh penambahan CB terhadap kekuatan fleksural dengan kombinasi penambahan 2,5 wt. %.

**Tabel 4.4.** Data Pengujian Fleksural

Sampel Uji	wt.% CB	Kekuatan Flexural (MPa)
1	10,0	13.79
2	12,5	15,30
3	15,0	17,20
4	17,5	12,67
5	20,0	13,46



**Gambar 4. 9** Pengaruh Kekuatan Fleksural terhadap Penambahan CB

Pada Gambar 4.9. terlihat bahwa seiring dengan penambahan wt.% CB akan menurunkan nilai fleksural pelat bipolar. Pada prinsipnya CB memiliki struktur yang berbentuk rongga dapat menurunkan sifat mekanis dari pelat bipolar sehingga dengan meningkatnya kadar CB pada pelat bipolar maka kekuatan pelat bipolar akan menurun. Rongga berporos dalam pelat bipolar dapat menurunkan kekuatan fleksural karena rongga-rongga ini akan menginisiasi retak ketika pelat bipolar menerima pembebanan. Faktor ikatan antarmuka antara matriks dengan penguat juga menjadi faktor yang memengaruhi kekuatan pelat bipolar. Semakin baik ikatan antara matriks dengan penguat maka kekuatan suatu komposit juga akan semakin tinggi. Nilai kekuatan fleksural dari sampel uji belum memenuhi standar nilai fleksural untuk aplikasi standar pelat bipolar > 25 MPa.

#### 4.2.5 Perbandingan Sifat komposit

Dari hasil penelitian komposit pelat bipolar dengan matriks *epoxy* dan penguat grafit EAF dengan penambahan 10-20 wt.% *carbon black* sebagai *conducting filler*, maka dapat didapatkan perbandingan antara sifat-sifat komposit pada setiap pelat yang dapat dilihat pada Tabel 4.5.

**Tabel 4.5** Perbandingan Sifat Komposit

Penambahan CB (wt. %)	Densitas (gr.cm <sup>-3</sup> )	Porositas (%)	Konduktivitas Listrik (S.cm <sup>-1</sup> )	Kekuatan Fleksural (MPa)
10,0	1,83	0,48	0,22	13,79
12,5	1,86	0,57	0,10	15,30
15,0	1,84	1,04	0,10	17,20
17,5	1,89	0,61	0,10	12,67
20,0	1,90	0,68	0,13	13,46

Dari Tabel 4.5. dapat dilihat diambil kesimpulan bahwa pelat bipolar yang memiliki nilai karakteristik yang mendekati optimum terdapat pada penambahan 10 wt. %. CB dengan nilai konduktivitas tertinggi dan fleksural tertinggi ketiga sedangkan nilai densitas tidak terlihat perbedaan yang signifikan.

## BAB 5

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Pelat bipolar grafit komposit dengan penambahan 10-20 wt.% CB meningkatkan kemampubasahan antara matrik dan penguat karena membentuk sudut  $\theta < 90^\circ$ , penambahan methanol berfungsi untuk meningkatkan *wettability* dari konstituen penyusun pelat bipolar grafit.
2. Pelat bipolar grafit komposit dengan penambahan 10-20 wt.% CB meningkatkan nilai densitas dan masih dalam rentang standar pelat bipolar untuk aplikasi *fuel cell*. Dengan nilai densitas terendah pada komposisi 10 wt.% CB sebesar 1,83 gr/cm<sup>3</sup>. Penambahan wt.% CB tidak banyak berpengaruh terhadap densitas pelat bipolar.
3. Pelat bipolar grafit komposit dengan penambahan 10-20 wt.% CB meningkatkan nilai porositas karena ukuran partikel CB yang lebih besar berkontribusi terhadap pembentukan poros.
4. Pelat bipolar grafit komposit dengan penambahan 10-20 wt.% CB mempengaruhi nilai konduktivitas listrik. Pada 12,5-17,5 wt.% CB cenderung mengalami penurunan. Dan nilai konduktivitas terbesar pada 10 wt.% CB yaitu 0,22 S/cm. Namun nilai ini masih jauh untuk memenuhi standar ideal pelat bipolar.
5. Pelat bipolar grafit komposit dengan penambahan 10-20 wt.% CB menurunkan kekuatan fleksural karena tingkat porositas yang meningkat seiring penambahan wt.% CB berkontribusi terhadap pembentukan rongga yang menginisiasi retak ketika menerima pembebanan.



## DAFTAR REFERENSI

- [1] Mahasiswanegarawan. (2007). *Sel Bahan Bakar (Fuel Cell) Sebuah Energi Alternatif Berkelanjutan dan Ramah Lingkungan*. December 6, 2009. Wordpress.  
<http://mahasiswanegarawan.wordpress.com/2007/08/18/sel-bahan-bakar-fuel-cell-sebuah-energi-alternatif-berkelanjutan-dan-ramah-lingkungan/>
- [2] J.H. Hirschenhofer, *et al.* (1998). *Fuel Cell Handbook* (4th ed.), Parsons Corporation.
- [3] Y. Wang. (2006). *Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. *Thesis Master of Applied Science*, Chemical Engineering University of Waterloo, Ontario Canada. 1-78. December 6, 2009.  
<http://etd.uwaterloo.ca/etd/y74wang2006.pdf>
- [4] <http://www.greentechgazette.com/index.php/fuel-cells/hydrogen-fuel-cell-technology/> diakses pada 6 Desember 2009
- [5] Rayment, Chris .2003. *Introduction to Fuel Cell Technology*. Department of Aerospace and Mechanical Engineering. Notre Dame
- [6] <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/types.php> diakses pada 10 Desember 2009
- [7] Nikhil H. Jalani. (2008). *Development of Nanocomposite Polymer Electrolyte Membrane for Higher Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*. Worcester Polytechnic Institute. December 6, 2009. <http://www.greentechgazette.com/index.php/fuel-cells/hydrogen-fuel-cell-technology/>
- [8] J.Jayaraj, Y.C. Kim, K.B.Kim, H.K. Seok, E.Fleury. (2005). Corrosion studies on Fe-based amorphous alloys in simulated PEM fuel cell environment. *Science and Technology of Advanced Materials*, 6, 282-289.

- [9] A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Sagnol. (2005). Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 1297 – 1302.
- [10] Tsuchiya H, Kobayashi O. (2005). *International Journal Hydrogen Energy* 29: 985–90.
- [11] H. Tawfik, Y. Hung, D. Mahajan. (2007). Metal bipolar plates for PEM fuel cell—A review. *Journal of Power Sources*, 163, 755–767
- [12] V. Mehta dan J. S. Cooper. (2003). Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing, *Journal of Power Sources*, 32 – 53.
- [13] [http://www.sentrapolimer.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=34&Itemid=1](http://www.sentrapolimer.com/index.php?option=com_content&task=view&id=34&Itemid=1) diakses pada 11 Desember 2009
- [14] Shaw, Leon L & Man Wu. (2005), *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 373 – 380
- [15] <http://physics.nist.gov/MajResFac/NIF/pemFuelCells.html> diakses pada 6 Desember 2009
- [16] Joyce S. Cooper, *Design Analysis of PEMFC Bipolar Plates Considering Stack Manufacturing and Environment Impact* (Elsevier, 2003)
- [17] 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* (Elsevier, 2004)
- [18] Hoogers, Gregor. (2003). *Fuel Cell Technology Handbook*. CRC Press. Washington D.C.
- [19] V. Vasiliev dan E. V. Morozov, *Advanced Mechanics of Composite Materials* (Elsevier, 2007)
- [20] <http://ramatawa.wordpress.com/2008/11/23/komposit-part-definisiklasifikasiaplikasi/> diakses pada 10 Desember 2009 20.50 WIB

- [21] Zulfia, Anne. (2009). *Diktat Kuliah Teknologi Komposit MMF420803*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [22] Yuwono, Akhmad Herman. (2007). *Diktat Kuliah Polimer Adesif* . Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [23] Edward E. Muccio, (1994), *Plastics Processing Technology*. USA: ASM International, hlm. 37-173.
- [24] Anatole A. Klyosov, (2007). *Wood Plastic Composites*. New York: John Willey & Sons, hlm. 161 – 173.
- [25] R. J. Crawford, (1998). *Plastics Engineering* (3rd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann, hlm. 8 – 9, 18 – 28, 245 – 351.
- [26] A. Heinzl, *et al.*, “Injection molded low cost bipolar plates for PEM fuel cells”.<http://www.zbt-duisburg.de/downloads/Grove2003-ZBT-Bipolar.pdf> diakses pada 10 Desember 2009
- [27] D.Hull dan T.W Clyne, (1996). *An Introduction to Composite Material* (2nd ed.).Cambridge: Cambridge University Press, hlm.134-135,154.
- [28] T. Surdia, Saito S.,(1992). *Pengetahuan Bahan Teknik* (2nd ed.). Jakarta: Pradnya Paramita, hlm. 173 – 213.
- [29] Suharno, Bambang., (2008). *Lecturer Notes Iron and Steel MakingProcess*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [30] BDG Graphite and Carbon Fibers. *Buckyballs, Diamond, and Graphite*. <http://www.chem.wisc.edu/~newtrad/CurrRef/BDGTopic/BDGtext/BDGGraph.html> diakses pada 5 Desember 2009.
- [31] Graphite India Ltd. (1999). *Glimpses of Graphite India and Manual Book of Graphite Electrode* .(TUV Certification)RWTUV
- [32] [www.graphite.de/pdf/infoblatt-brennstoff-engl.pdf](http://www.graphite.de/pdf/infoblatt-brennstoff-engl.pdf) diakses pada 18 Mei 2009

- [33] <http://www.asbury.com/Carbons.html> diakses pada 10 Desember 2009
- [34] [http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_black](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_black) diakses pada 10 Desember 2009
- [35] <http://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy> diakses pada 6 Desember 2009
- [36] [http://www.huntsman.com/advanced\\_materials/index.cfm?PageID=5865](http://www.huntsman.com/advanced_materials/index.cfm?PageID=5865) diakses pada 6 Desember 2009
- [37] Harper.A. Charles. (2000). *Modern Plastics Handbook 2000*. USA: Mc Graw-Hill published company, hlm 2.62.
- [38] Presentasi Epoxy. (2008). *Mata Kuliah Material Adhesive*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. .
- [39] D.F. Caulfield et al., (2005). *Wood Thermoplastic Composites Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite*, Chapter 13, hlm 4-5.

Lampiran 1. Hasil Pengujian Konduktivitas

	Epoxy (%)	CB (%)	Grafit EAF (%)	Resistivitas ( $\Omega\text{cm}^{-1}$ )	Konduktivitas (Scm)	Konduktivitas Rata2 (Scm)
I	20	10,0	70,0	3,56	0,28	0,22
II	20	10,0	70,0	5,02	0,20	
III	20	10,0	70,0	5,14	0,19	
I	20	12,5	67,5	10,5	0,095	0,10
II	20	12,5	67,5	8,77	0,11	
III	20	12,5	67,5	9,7	0,10	
I	20	15,0	65,0	12,54	0,08	0,10
II	20	15,0	65,0	12,37	0,08	
III	20	15,0	65,0	7,77	0,13	
I	20	17,5	62,5	9,16	0,11	0,10
II	20	17,5	62,5	9,09	0,11	
III	20	17,5	62,5	14,46	0,07	
I	20	20,0	60,0	8,15	0,12	0,13
II	20	20,0	60,0	7,87	0,13	
III	20	20,0	60,0	6,47	0,15	

Lampiran 2. Hasil Pengujian Densitas

		A (Udara) (gr)	B (Air) (gr)	A-B (gr)	$\rho$ air (gr/cm <sup>3</sup> )	Densitas (gr/cm <sup>3</sup> )	Densitas rata2 (gr/cm <sup>3</sup> )
CB 10,0%	I	4,36	1,98	2.38	0,996089	T = 28.5 <sup>0</sup> C	1.83
	II	4,94	2,24	2.70	0,996089		
	III	4,78	2,18	2.60	0,996089		
	IV	3,88	1,77	2.11	0,996089		
	V	4,63	2,11	2.53	0,996089		
CB 12,5%	I	3,39	1,57	1,82	0,995796	T = 29.5 <sup>0</sup> C	1.86
	II	3,46	1,60	1,85	0,995796		
	III	3,54	1,64	1,89	0,995796		
	IV	3,33	1,55	1,78	0,995796		
	V	3,50	1,64	1,87	0,995796		
CB 15,0%	I	4,38	2,04	2,35	0,995796	T = 29.5 <sup>0</sup> C	1.84
	II	4,67	2,14	2,54	0,995796		
	III	4,57	2,10	2,47	0,995796		
	IV	4,64	2,12	2,51	0,995796		
CB 17,5%	I	3,50	1,61	1,89	0,995796	T = 29.5 <sup>0</sup> C	1.89
	II	3,22	1,51	1,71	0,995796		
	III	3,68	1,69	1,98	0,995796		
	IV	3,61	1,66	1,94	0,995796		
	V	3,62	1,69	1,94	0,995796		
CB 20,0%	I	3,58	1,70	1,88	0,995796	T = 29.5 <sup>0</sup> C	1.90
	II	3,37	1,60	1,77	0,995796		
	III	3,13	1,49	1,64	0,995796		
	IV	3,59	1,71	1,88	0,995796		
	V	3,43	1,63	1,80	0,995796		

Lampiran 3. Hasil Pengujian Porositas

		D (gr)	S (gr)	Sw (gr)	Sw-D (gr)	D-S (gr)	Porositas (%)	Porositas rata2 (%)
CB 10,0%	I	4,32	1,99	4,33	0,01	2,33	0,52	0,53
	II	4,89	2,24	4,91	0,01	2,65	0,45	
	III	4,73	2,17	4,74	0,01	2,56	0,55	
	IV	3,84	1,77	3,85	0,01	2,07	0,66	
	V	4,60	2,12	4,61	0,01	2,48	0,47	
CB 12,5%	I	3,36	1,58	3,37	0,01	1,79	0,57	0,60
	II	3,43	1,61	3,44	0,01	1,82	0,64	
	III	3,51	1,64	3,52	0,01	1,87	0,58	
	IV	3,30	1,55	3,32	0,01	1,76	0,62	
	V	3,48	1,63	3,49	0,01	1,85	0,56	
CB 15,0%	I	4,33	2,00	4,33	0,03	2,33	1,16	1,29
	II	4,61	2,11	4,91	0,02	2,50	0,97	
	III	4,52	2,08	4,54	0,02	2,44	0,99	
	IV	4,58	2,11	4,63	0,05	2,47	2,05	
	V							
CB 17,5%	I	3,45	1,62	3,46	0,01	1,83	0,80	0,67
	II	3,18	1,50	3,19	0,01	1,67	0,64	
	III	3,62	1,69	3,63	0,01	1,93	0,59	
	IV	3,55	1,65	3,56	0,01	1,90	0,61	
	V	3,57	1,68	3,58	0,01	1,89	0,70	
CB 20,0%	I	3,56	1,71	3,58	0,01	1,85	0,68	0,64
	II	3,35	1,61	3,36	0,01	1,74	0,72	
	III	3,15	1,49	3,16	0,01	1,66	0,42	
	IV	3,58	1,71	3,59	0,01	1,86	0,68	
	V	3,41	1,64	3,42	0,01	1,77	0,68	

Lampiran 4. Hasil Pengujian Fleksural

		<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>L (mm)</b>	<b>P (N)</b>	<b><math>\sigma_f</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_f</math> rata2 (MPa)</b>
CB 0%	I	13,70	4,70	64	44,80	14,21	13,79
	II	13,20	4,40	64	35,20	13,22	
	III	13,10	4,30	64	35,20	13,95	
CB 12.5%	I	13,10	3,80	64	35,20	17,86	15,30
	II	13,30	3,90	64	32,00	15,19	
	III	14,15	4,30	64	35,20	12,92	
	IV	13,40	4,40	64	40,00	14,80	
	V	13,60	4,15	64	38,40	15,74	
CB 15%	I	14,70	4,20	64	48,00	17,77	17,20
	II	14,40	4,10	64	43,20	17,13	
	III	16,50	3,70	64	38,40	16,32	
	IV	15,50	3,60	64	36,80	17,59	
CB 17.5%	I	13,70	3,05	64	24,00	18,08	12,67
	II	14,30	4,30	64	24,00	8,71	
	III	14,85	4,20	64	35,20	12,90	
	IV	13,50	4,10	64	28,80	12,18	
	V	14,10	3,90	64	25,60	11,46	
CB 20%	I	13,70	3,60	64	32,00	17,30	13,46
	II	13,30	4,45	64	32,00	11,66	
	III	13,40	4,20	64	28,80	11,70	
	IV	13,45	4,30	64	30,40	11,74	
	V	13,55	4,00	64	33,60	14,88	






## Lampiran 5. Tabel Densitas Air (simetric.co.uk)



Densitas air ( $\text{g/cm}^3$ ) di berbagai temperatur mulai dari  $0^\circ\text{C}$  (*liquid state*) sampai  $30.9^\circ\text{C}$  dengan peningkatan  $0.1^\circ\text{C}$

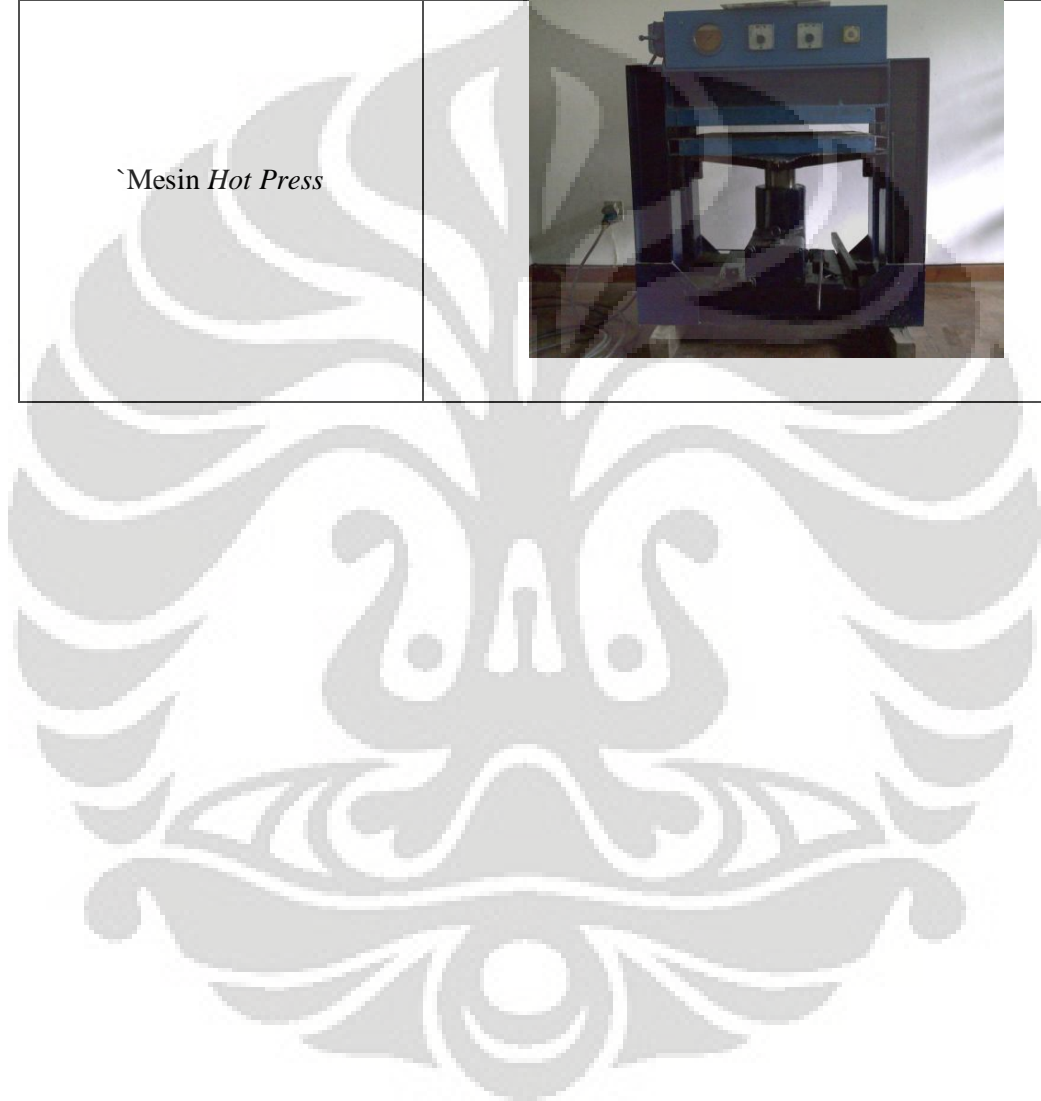
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0.999841	0.999847	0.999854	0.999860	0.999866	0.999872	0.999878	0.999884	0.999889	0.999895
1	0.999900	0.999905	0.999909	0.999914	0.999918	0.999923	0.999927	0.999930	0.999934	0.999938
2	0.999941	0.999944	0.999947	0.999950	0.999953	0.999955	0.999958	0.999960	0.999962	0.999964
3	0.999965	0.999967	0.999968	0.999969	0.999970	0.999971	0.999972	0.999972	0.999973	0.999973
4	0.999973	0.999973	0.999973	0.999972	0.999972	0.999972	0.999970	0.999969	0.999968	0.999966
5	0.999965	0.999963	0.999961	0.999959	0.999957	0.999955	0.999952	0.999950	0.999947	0.999944
6	0.999941	0.999938	0.999935	0.999931	0.999927	0.999924	0.999920	0.999916	0.999911	0.999907
7	0.999902	0.999898	0.999893	0.999888	0.999883	0.999877	0.999872	0.999866	0.999861	0.999855
8	0.999849	0.999843	0.999837	0.999830	0.999824	0.999817	0.999810	0.999803	0.999796	0.999789
9	0.999781	0.999774	0.999766	0.999758	0.999751	0.999742	0.999734	0.999726	0.999717	0.999709
10	0.999700	0.999691	0.999682	0.999673	0.999664	0.999654	0.999645	0.999635	0.999625	0.999615
11	0.999605	0.999595	0.999585	0.999574	0.999564	0.999553	0.999542	0.999531	0.999520	0.999509
12	0.999498	0.999486	0.999475	0.999463	0.999451	0.999439	0.999427	0.999415	0.999402	0.999390
13	0.999377	0.999364	0.999352	0.999339	0.999326	0.999312	0.999299	0.999285	0.999272	0.999258

14	0.999244	0.999230	0.999216	0.999202	0.999188	0.999173	0.999159	0.999144	0.999129	0.999114
15	0.999099	0.999084	0.999069	0.999054	0.999038	0.999023	0.999007	0.998991	0.998975	0.998959
16	0.998943	0.998926	0.998910	0.998893	0.998877	0.998860	0.998843	0.998826	0.998809	0.998792
17	0.998774	0.998757	0.998739	0.998722	0.998704	0.998686	0.998668	0.998650	0.998632	0.998613
18	0.998595	0.998576	0.998558	0.998539	0.998520	0.998501	0.998482	0.998463	0.998444	0.998424
19	0.998405	0.998385	0.998365	0.998345	0.998325	0.998305	0.998285	0.998265	0.998244	0.998224
20	0.998203	0.998183	0.998162	0.998141	0.998120	0.998099	0.998078	0.998056	0.998035	0.998013
21	0.997992	0.997970	0.997948	0.997926	0.997904	0.997882	0.997860	0.997837	0.997815	0.997792
22	0.997770	0.997747	0.997724	0.997701	0.997678	0.997655	0.997632	0.997608	0.997585	0.997561
23	0.997538	0.997514	0.997490	0.997466	0.997442	0.997418	0.997394	0.997369	0.997345	0.997320
24	0.997296	0.997271	0.997246	0.997221	0.997196	0.997171	0.997146	0.997120	0.997095	0.997069
25	0.997044	0.997018	0.996992	0.996967	0.996941	0.996914	0.996888	0.996862	0.996836	0.996809
26	0.996783	0.996756	0.996729	0.996703	0.996676	0.996649	0.996621	0.996594	0.996567	0.996540
27	0.996512	0.996485	0.996457	0.996429	0.996401	0.996373	0.996345	0.996317	0.996289	0.996261
28	0.996232	0.996204	0.996175	0.996147	0.996118	0.996089	0.996060	0.996031	0.996002	0.995973
29	0.995944	0.995914	0.995885	0.995855	0.995826	0.995796	0.995766	0.995736	0.995706	0.995676
30	0.995646	0.995616	0.995586	0.995555	0.995525	0.995494	0.995464	0.995433	0.995402	0.995371
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

## Lampiran 6. Peralatan Preparasi Sampel

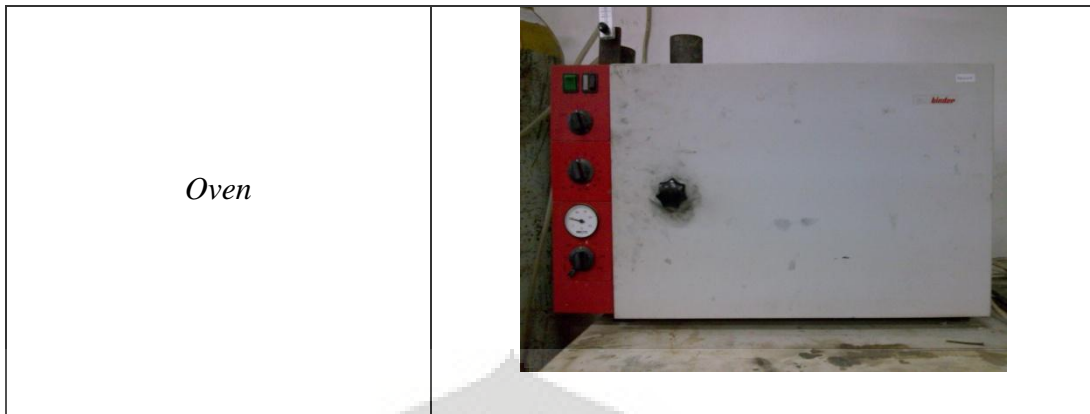
Nama Alat	Foto Alat
Timbangan Digital	
<i>Hot Plate Magnetic Stirring</i>	
<i>Cetakan Stainless Steel</i>	

<p><i>Mixer</i></p>	
<p><i>Mesin Hot Press</i></p>	



## Lampiran 7. Peralatan Pengujian Karakterisasi

Nama Alat	Foto Alat
<p><i>Conductivity Four Point Probe Test Machine</i></p>	
<p><i>Universal Testing Machine</i></p>	
<p><i>Dryer</i></p>	



## Lampiran 8. Spesifikasi Epoxy Resin


 Technical Information
 EP
**Bakelite® EPR 174**

 Unmodified, liquid standard epoxy resin based on  
Bisphenol-A

**Characteristics**
**Properties**

Properties	Unit	Value
Viscosity at 25 °C	mPa·s	13000 ± 2000
Epoxy equivalent	g/equiv.	189 ± 5
Hydrolyzable chlorine 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 0164/LV 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".

 P.T. JUSTUS KIMARAYA  
JAKARTA

## Lampiran 9. Spesifikasi Epoxy 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.

#### SPECIFICATION :

Appearance	: Brown clear liquid
Colour (gardner)	: <10
Viscosity (poise/25°C)	: 100-200
Amine Value (mg KOH/g)	: 335-550

#### TYPICAL PROPERTIES :

Theoretical Amino Hydrogen Equi. Wt.	: 105
Solid %	: 100
Mix ratio with 190 EEW Epoxy Liquid	: 55 (phr)

#### TYPICAL PROPERTIES IN A CURED COATING :

Tack Free Time , hours	: 5
Pot Life , minutes	: 120
Geltime , minutes	: 108
Through Cure Time, hours	: 23

#### TYPICAL CURED RESIN PROPERTIES :

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

#### CHEMICAL RESISTANCE PROPERTIES :

(weight change after 10 days immersion, %)

Water destilated	: 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

*P.T. Justus Kimiara*  
JAKARTA



## Lampiran 10. 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 & Spesification	Material Unit Group	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.

( sambungan)

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

CILEGON -----

INVENTORY CONTROL SYSTEM

Item No : 00908011

DATE : 04.12.2007

GROUP/CLASS : 443019132

Nato-name : ELECTRODE,

Material Code	Material Unit	BOH	Min	Max
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 CONTENT'S:0.5% MAX

AVERAGE LINEAR COEFICIENT OF THERMAL EXPANS:

(0.5-2.5)X0.000001/K

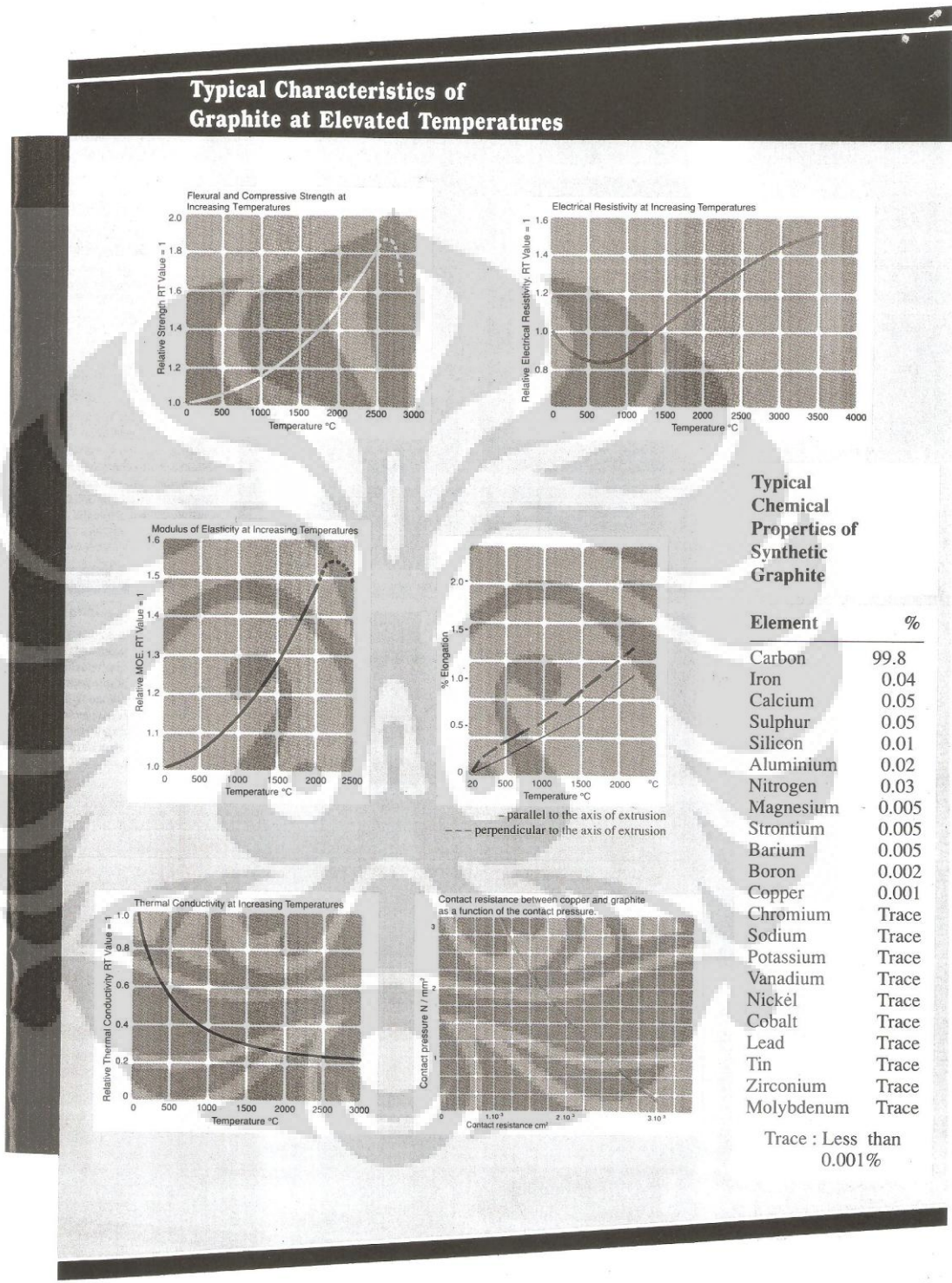
COMPLETE WITH ACCESSORIES :

- 3 EA NIPPLE TRANSPORT FOR 20 TON GRAPHITE ELECTRODE
- PRESET LONG NIPPLE
- 1 EACH ELASTIC CRANE SUSPENSION GEAR FOR ELECTRODE 16 IN

MANUFACTURE :

GENSUPP ELECTRODE-ARC-D406MMX1800MM-20-46KA

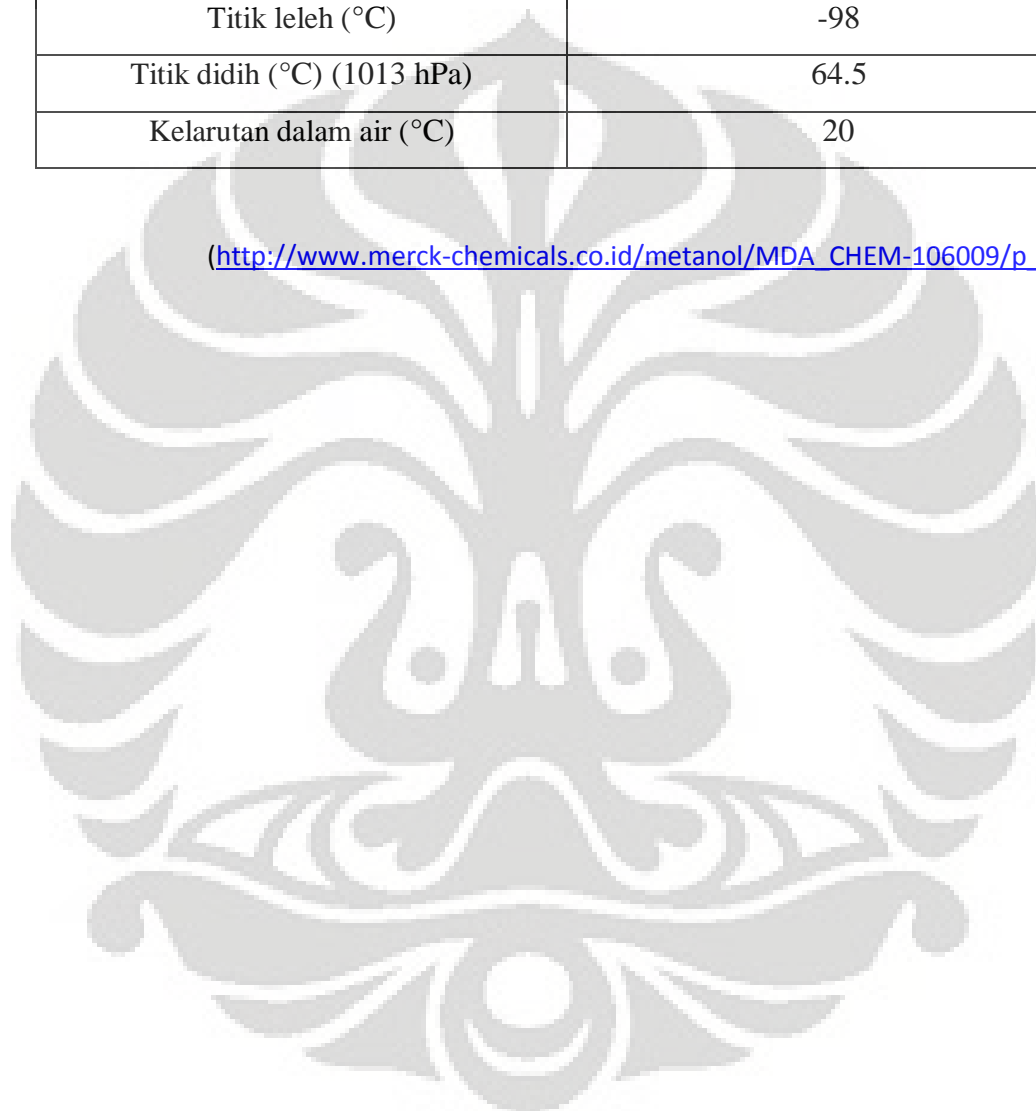
Lampiran 11. Komposisi Kimia Grafit EAF



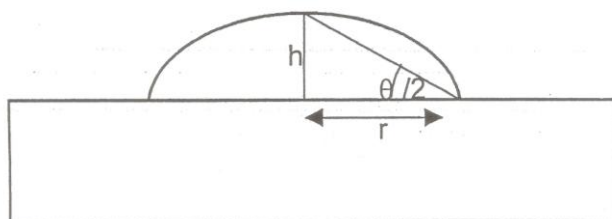
**Lampiran 12. Spesifikasi Metanol MERCK**

<b>Sifat</b>	<b>Nilai</b>
Formulasi kimia	CH <sub>3</sub> OH
Massa molar (g/mol)	32.04
Densitas (g/cm <sup>3</sup> ) (20 °C)	0.792
Titik leleh (°C)	-98
Titik didih (°C) (1013 hPa)	64.5
Kelarutan dalam air (°C)	20

[http://www.merck-chemicals.co.id/metanol/MDA\\_CHEM-106009/p\\_uuid](http://www.merck-chemicals.co.id/metanol/MDA_CHEM-106009/p_uuid)



### Lampiran 13. Perhitungan Sessile Drop



$$\theta = 2 \tan^{-1} h/r$$

Sampel	h (mm)	r (mm)	$\theta$
CB 10,0 wt. %	7,50	8,50	82,85°
CB 12,5 wt. %	11,0	15,0	72,51°
CB 15,0 wt. %	9,00	17,5	54,43°
CB 17,5 wt. %	10,0	19,5	54,29°
CB 20,0 wt. %	11,0	23,0	51,12°