



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH TEKANAN *COMPRESSION MOULDING*  
TERHADAP PERFORMA PELAT BIPOLAR KOMPOSIT  
KARBON EAF/RESIN EPOKSI DENGAN KOMPOSISI 5%  
*CARBON BLACK***

**SKRIPSI**

**SETIADI PUTRA  
0606075271**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK  
JULI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH TEKANAN *COMPRESSION MOULDING*  
TERHADAP PERFORMA PELAT BIPOLAR KOMPOSIT  
KARBON EAF/RESIN EPOKSI DENGAN KOMPOSISI 5%  
*CARBON BLACK***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Sarjana Teknik (S.T)**

**SETIADI PUTRA  
0606075271**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK  
JULI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Setiadi Putra**

**NPM : 0606075271**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 09 Juli 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Setiadi Putra  
NPM : 0606075271  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengaruh Tekanan *Compression Moulding*  
terhadap Performa Pelat Bipolar Komposit  
Karbon EAF/Resin Epoksi dengan Komposisi 5%  
*Carbon Black*

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 : Ir. Yunita Sadeli, M.Sc ( )  
Penguji 1 : Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T ( )  
Penguji 2 : Dr. Ir. A. Herman Yuwono, M. Phil. Eng. ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 09 Juli 2010

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan kehendak-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Kepada-Nya penulis menyerahkan segala urusan dalam penyelesaian skripsi yang berjudul “**Pengaruh Tekanan *Compression Moulding* terhadap Performa Pelat Bipolar Komposit Karbon EAF/Resin Epoksi dengan Komposisi 5% *Carbon Black***”, yang dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

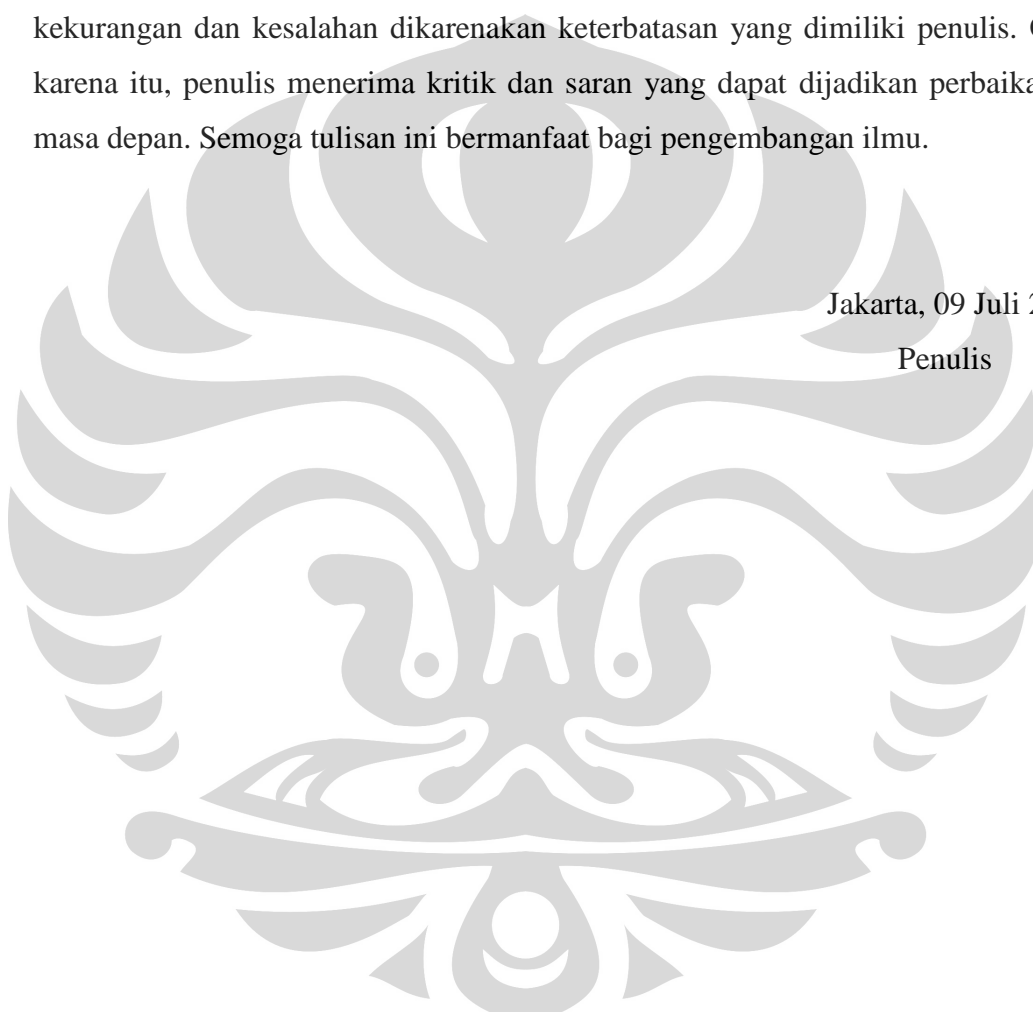
1. Ir. Yunita Sadeli, M.Sc dan Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T, selaku pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini;
2. Dr. Ir. A. Herman Yuwono, M. Phil. Eng., selaku penguji dan koordinator tugas akhir yang telah menyediakan waktu ditengah kesibukan beliau;
3. Bapak Andi, Joko, Subhan, dan Hendra dari Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, yang telah menyediakan waktu, tempat, bahan baku dan peralatan, serta arahan selama penelitian yang dilakukan oleh penulis;
4. Karyawan Departemen Metalurgi dan Material yang telah membantu penulis selama penelitian;
5. Tiga insan terbaik yang sangat penulis cintai di dunia ini, ibuku, ibuku, ibuku, ayahku, serta kakakku, yang telah memberikan segalanya bagi penulis. Skripsi ini penulis hadiahkan untuk mereka.
6. Desto Wahyu Novianto dan Kenya Diestha L. C., selaku rekan penulis dalam penelitian ini;

7. Teman-teman Metal 2006, yang juga tengah berjuang dengan penelitian dan tugas akhir mereka;
8. Pihak-pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Kepada mereka penulis mengucapkan terima kasih yang setulusnya, disertai doa *Allaahummarham huma fiddunya wal akhirah*.

Penulis menyadari bahwa, dalam penulisan skripsi ini terdapat banyak kekurangan dan kesalahan dikarenakan keterbatasan yang dimiliki penulis. Oleh karena itu, penulis menerima kritik dan saran yang dapat dijadikan perbaikan di masa depan. Semoga tulisan ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu.

Jakarta, 09 Juli 2010

Penulis



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

---

---

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

Nama : Setiadi Putra  
NPM : 0606075271  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

Pengaruh Tekanan *Compression Moulding* terhadap Performa Pelat Bipolar  
Komposit Karbon EAF/Resin Epoksi dengan Komposisi 5% *Carbon Black*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola, dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan 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 : Jakarta

Pada tanggal : 09 Juli 2010

Yang menyatakan

(Setiadi Putra)

**vi**

## ABSTRAK

Nama : Setiadi Putra  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Pengaruh Tekanan *Compression Moulding* terhadap Performa Pelat Bipolar Komposit Karbon EAF/Resin Epoksi dengan Komposisi 5% *Carbon Black*

PEMFC merupakan energi alternatif yang menjanjikan untuk dikembangkan, karena teknologi ini memiliki beberapa keunggulan dalam hal efisiensi proses yang tinggi, ramah lingkungan, dan waktu pakai yang lama. Namun penggunaannya belum optimal, dikarenakan biaya produksinya yang tinggi, yang sebagian besar dipengaruhi oleh pelat bipolar. Oleh karena itu, diperlukan suatu pelat bipolar yang memiliki bobot yang ringan, sifat mekanis dan konduktivitas listrik yang tinggi, mudah diproses, dan murah.

Pelat bipolar dibuat dari material komposit berbasis resin epoksi yang diperkuat dengan partikel grafit dan *carbon black* melalui metode *compression moulding*. Fokus penelitian ini adalah mengetahui pengaruh peningkatan tekanan *compression moulding* terhadap sifat mekanis dan konduktivitas listrik dari pelat bipolar yang telah dibuat, dengan melakukan variasi penekanan pada 300, 350, 400, dan 450 kg/cm<sup>2</sup>, pada temperatur 70 °C selama 4 jam.

Peningkatan tekanan berpengaruh terhadap nilai densitas dan porositas dari pelat. Peningkatan nilai densitas dan penurunan porositas berpengaruh secara langsung pada peningkatan nilai konduktivitas listrik dan kekuatan fleksural. Nilai densitas bertambah dari 1,770 sampai 1,784 gr/cm<sup>3</sup>, sedangkan porositasnya berkurang dari 0,87% sampai 0,72% ketika tekanan ditingkatkan. Sementara itu, nilai konduktivitas listrik meningkat dari 0,74 sampai 1,09 S/cm, dan kekuatan fleksural meningkat dari 15,29 sampai 23,25 MPa.

Kata kunci:

PEMFC, *Compression moulding*, tekanan, pelat bipolar, komposit polimer diperkuat partikel grafit, konduktivitas listrik, kekuatan fleksural



## ABSTRACT

Name : Setiadi Putra  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : The Influences of Compression Moulding Pressure on Composite EAF Carbon/Epoxy Resin Bipolar Plate Performance with Composition of 5% Carbon Black

PEMFC is a promising alternative energy to be developed, because this technology has some advantages in terms of high process efficiency, environmentally friendly, and wear a long time. However, its use is not optimal yet, due to high production costs, which largely affected by bipolar plate. Therefore, we need a bipolar plate that have a light weight, high mechanical properties and electrical conductivity, easily processed, and cheap.

The bipolar plates made of epoxy resin-based composite materials reinforced with graphite and carbon black particles by compression moulding method. The focus of this experiment was to find out the influences of increasing compression moulding pressure on the mechanical properties and electrical conductivity of the bipolar plates that have been produced, with varying pressure on 300, 350, 400, and 450 kg/cm<sup>2</sup>, at a temperature of 70 °C for 4 hours.

The increasing of pressure affected on density and porosity of the plates. Increased density and decreased porosity value directly impact on increasing electrical conductivity and flexural strength. Density increased from 1,770 to 1,784 gr/cm<sup>3</sup>, whereas the porosity is reduced from 0,87% to 0,72% as the pressure is increased. Meanwhile, the electrical conductivity increased from 0,74 to 1,09 S/cm, and flexural strength increased from 15,29 to 23,25 MPa.

Keywords :

PEMFC, Compression moulding, pressure, bipolar plate, graphite particles-reinforced polymer composite, electrical conductivity, flexural strength

## DAFTAR ISI

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
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....	4
1.5 Sistematika Penulisan .....	5
<b>2. TEORI PENUNJANG .....</b>	<b>6</b>
2.1 Sel Tunam ( <i>Fuel Cell</i> ) .....	6
2.1.1 Jenis-jenis <i>Fuel Cell</i> .....	6
2.1.2 <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i> (PEMFC) .....	8
2.1.3 Prinsip Dasar PEMFC .....	9
2.2 Komponen Penting pada Sistem PEMFC .....	11
2.2.1 Penggabungan Membran Elektroda ( <i>Membrane Electrode Assembly</i> ) ..	11
2.2.2 Elektroda .....	13
2.2.3 Pelat Bipolar .....	14
2.2.3.1 Fungsi Pelat Bipolar pada PEMFC .....	14
2.2.3.2 Jenis-jenis Pelat Bipolar .....	16
2.2.3.3 Pelat Bipolar Grafit .....	18
2.2.3.4 Pelat Bipolar Komposit .....	19
2.2.3.5 Pelat Bipolar Komposit Karbon/Polimer .....	20
2.3 Material-material Penyusun Pelat Bipolar Komposit Karbon/Epoksi .....	21
2.3.1 Resin Epoksi .....	21
2.3.1.1 Umum .....	21
2.3.1.2 Stuktur dan Sifat .....	22
2.3.2 Grafit .....	23
2.3.2.1 Sifat/Struktur .....	23
2.3.3 <i>Carbon Black</i> .....	28
2.3.3.1 Umum .....	28
2.3.3.2 Sifat/Struktur .....	29
2.3.4 Zat Pelarut .....	33
2.3.4.1 Metanol .....	33

2.4 Hukum Pencampuran .....	34
2.5 Metode Fabrikasi: <i>Compression Moulding (Hot Pressing)</i> .....	37
<b>3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>41</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	41
3.2 Peralatan dan Bahan .....	42
3.2.1 Peralatan .....	42
3.2.2 Bahan .....	43
3.2.2.1 Resin Epoksi .....	43
3.2.2.2 Grafit .....	44
3.2.2.3 <i>Carbon Black</i> .....	44
3.2.2.4 Metanol .....	45
3.3 Prosedur Penelitian .....	45
3.3.1 Preparasi Bahan .....	46
3.3.1.1 Proses Penghalusan Grafit .....	46
3.3.2 Proses Pencampuran Bahan-bahan Penyusun Komposit .....	47
3.3.2.1 Komposisi Bahan-bahan Penyusun Komposit .....	47
3.3.2.2 Proses Pencampuran .....	47
3.3.3 Proses Pencetakan .....	48
3.3.4 Pembuatan Sampel Uji .....	49
3.3.5 Proses Karakterisasi Material Pelat Bipolar .....	50
3.3.5.1 Pengujian Konduktivitas .....	50
3.3.5.2 Pengujian Densitas .....	51
3.3.5.3 Pengujian Porositas .....	53
3.3.5.4 Pengujian Fleksural .....	54
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>56</b>
4.1 Pengamatan Visual Pelat Bipolar Hasil Pencetakan .....	56
4.2 Karakterisasi Pelat Bipolar Komposit .....	57
4.2.1 Pengujian Porositas .....	58
4.2.2 Pengujian Densitas .....	60
4.2.3 Pengujian Fleksural .....	63
4.2.4 Pengujian Konduktivitas .....	64
4.3 Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar dengan Kenaikan Tekanan pada <i>Compression Moulding</i> .....	67
<b>5. KESIMPULAN .....</b>	<b>69</b>
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>70</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>75</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Pola Konsumsi Energi Dunia .....	1
Gambar 2.1.	Reaksi Anoda dan Katoda dari Berbagai Jenis <i>Fuel cell</i> .....	8
Gambar 2.2.	Gambaran Skematik PEMFC Hidrogen .....	10
Gambar 2.3.	Sistem <i>Stack</i> PEMFC .....	11
Gambar 2.4.	a.) Susunan MEA pada PEMFC dan b.) Komponen Penyusun MEA	12
Gambar 2.5.	Pelat Bipolar .....	14
Gambar 2.6.	Klasifikasi Pelat Bipolar Berdasarkan Material Penyusunnya .....	17
Gambar 2.7.	Reaksi Pembentukan Resin Epoksi .....	22
Gambar 2.8.	Reaksi antara Resin Epoksi dan <i>Hardener</i> .....	23
Gambar 2.9.	Struktur Kristal Grafit .....	24
Gambar 2.10.	Proses Peleburan Bahan Baku Pembuatan Baja pada Dapur Busur Listrik .....	25
Gambar 2.11.	Pengaruh Penambahan Grafit terhadap Resistansi Listrik .....	26
Gambar 2.12.	Pengaruh Penambahan Grafit terhadap: a.) Densitas, b.) Kekuatan fleksural, c.) Porositas [31], dan d.) Konduktivitas .....	27
Gambar 2.13.	Ilustrasi dari Struktur <i>Carbon Black</i> .....	30
Gambar 2.14.	Skema <i>Carbon Black</i> dalam Matriks Polimer pada Komposit .....	31
Gambar 2.15.	Pengaruh Penambahan <i>Carbon Black</i> terhadap Densitas, Konduktivitas Listrik, dan Kekuatan Fleksural .....	32
Gambar 2.16.	Ilustrasi Skematik dari (a) Bagaimana Beragam Resistansi Terjadi yang Didefinisikan dengan Keseluruhan Resistansi, $R$ ; (b) Partikel <i>Carbon Black</i> Ditempatkan di antara Lapisan Grafit untuk Mengurangi Nilai $R_e$ .....	33
Gambar 2.17.	Struktur dari Metanol .....	33
Gambar 2.18.	Parameter dari Fasa Terdispersi .....	35
Gambar 2.19.	Daya Pembasahan Berdasar Sudut Kontak .....	36
Gambar 2.20.	Kesetimbangan Tiga Tegangan Permukaan pada Kondisi Pembasahan dengan Tetes Cairan pada Permukaan Padat Komposit	36
Gambar 2.21.	Ikatan Antarmuka .....	37
Gambar 2.22.	Ikatan Antarfasa .....	37
Gambar 2.23.	Ilustrasi Pembuatan Pelat Bipolar dengan Metode <i>Compression</i> <i>Moulding</i> .....	38
Gambar 2.24.	Pengaruh Penambahan Tekanan pada Proses <i>Compression</i> <i>Moulding</i> terhadap Nilai Konduktivitas Listrik. Zona I Bermakna Material yang Mengalami Proses <i>Curing</i> masih dalam Bentuk Serbuk, sedangkan Zona II telah Menghasilkan Bentuk yang Terkonsolidasi .....	40
Gambar 2.25.	Nilai Konduktivitas Listrik dari Komposit Epoksi terhadap Fungsi dari Waktu .....	40
Gambar 3.1.	Diagram Alir Penelitian .....	41
Gambar 3.2.	Resin dan <i>Hardener</i> Epoksi .....	43
Gambar 3.3.	Ilustrasi Skematis pada Pembuatan <i>Carbon Black</i> .....	45
Gambar 3.4.	Ilustrasi Skematis pada Penghalusan Grafit EAF .....	46

Gambar 3.5.	Hasil Pencampuran Bahan-bahan Penyusun Komposit .....	48
Gambar 3.6.	Cetakan yang Digunakan (Kiri) dan Penempatan Cetakan pada Mesin <i>Hydraulic Pressure Machine</i> (Kanan) .....	49
Gambar 3.7.	Sampel Uji Konduktivitas, Densitas, dan Porositas .....	49
Gambar 3.8.	Sampel Uji Fleksural .....	50
Gambar 3.9.	(a) Mesin Veeco FPP 5000 - <i>Four Point Probe Test</i> dan (b) Ilustrasi Skematis dari Mesin <i>Four Point Probe Test</i> .....	51
Gambar 3.10.	Penimbangan Sampel di Air .....	52
Gambar 3.11.	Sampel Direbus pada $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	53
Gambar 3.12.	Skema Pengujian Fleksural .....	54
Gambar 3.13.	Proses Uji Fleksural .....	55
Gambar 4.1.	Pelat Bipolar yang Dihasilkan pada Tekanan: 1.) $300\text{ kg/cm}^2$ , 2.) $350\text{ kg/cm}^2$ , 3.) $400\text{ kg/cm}^2$ , dan 4.) $450\text{ kg/cm}^2$ .....	56
Gambar 4.2.	Pengaruh Peningkatan Tekanan terhadap Porositas .....	58
Gambar 4.3.	Pengaruh Peningkatan Tekanan terhadap Densitas .....	61
Gambar 4.4.	Pengaruh Peningkatan Tekanan terhadap Kekuatan Fleksural .....	63
Gambar 4.5.	Pengaruh Peningkatan Tekanan terhadap Konduktivitas Listrik .....	65



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Jenis-jenis <i>Fuel Cell</i> dan Karakteristiknya .....	7
Tabel 2.2.	Energi dan Efisiensi dari Beberapa Sistem Konversi Energi .....	8
Tabel 2.3.	Target Teknis DOE untuk Pelat Bipolar .....	16
Tabel 2.4.	Kelebihan dan Kekurangan dari Material Pelat Bipolar .....	18
Tabel 2.5.	Perbandingan Nilai Konduktivitas dari Material Pelat Bipolar .....	21
Tabel 2.6.	Sifat Umum Grafit .....	24
Tabel 2.7.	Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel dari Grafit .....	27
Tabel 2.8.	Klasifikasi Proses Fabrikasi dan Penggunaan dari <i>Carbon Black</i> .....	29
Tabel 2.9.	Sifat Fisik Beberapa Jenis <i>Carbon Black</i> untuk Aplikasi Konduktivitas Listrik .....	30
Tabel 2.10.	Sifat Umum Metanol .....	33
Tabel 3.1.	Peralatan-peralatan yang Digunakan dalam Penelitian .....	42
Tabel 3.2.	Komposisi dari Pelat Bipolar .....	47
Tabel 4.1.	Hasil Pengujian Porositas .....	58
Tabel 4.2.	Hasil Pengujian Densitas .....	61
Tabel 4.3.	Hasil Pengujian Fleksural .....	63
Tabel 4.4.	Hasil Pengujian Konduktivitas .....	65
Tabel 4.5.	Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar dengan Kenaikan Tekanan pada <i>Compression Moulding</i> .....	68

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Hasil Pengujian Porositas .....	75
Lampiran 2.	Hasil Pengujian Densitas .....	76
Lampiran 3.	Hasil Pengujian Fleksural .....	77
Lampiran 4.	Hasil Pengujian Konduktivitas .....	78
Lampiran 5.	Tabel Densitas Air (simetric.co.uk) .....	79
Lampiran 6.	Peralatan yang Digunakan pada Penelitian .....	80
Lampiran 7.	Spesifikasi Resin Epoksi .....	83
Lampiran 8.	Spesifikasi <i>Hardener</i> Epoksi .....	84
Lampiran 9.	Spesifikasi Grafit EAF .....	85
Lampiran 10.	Spesifikasi Metanol .....	87



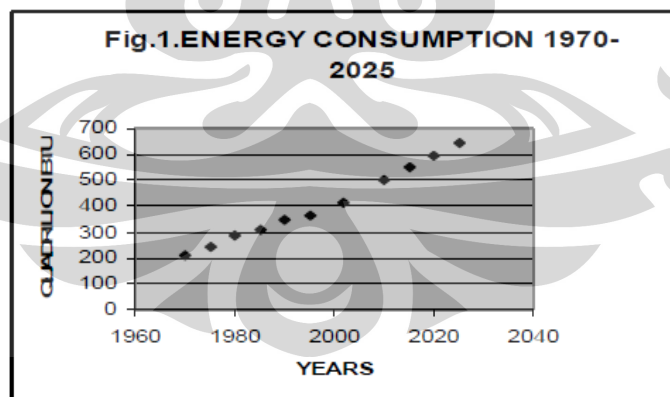
# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Standar kehidupan manusia dari beberapa negara dianggap proporsional dengan kebutuhan akan konsumsi energi pada negara tersebut. Pola konsumsi energi sampai saat ini hanya menitikberatkan pada tiga sumber energi utama, antara lain minyak bumi, batu bara, dan gas alam [1]. Seperti pada tahun 2007, konsumsi energi dunia sebanding dengan 12 milyar ton minyak (sekitar 88 milyar barel), dengan 80% konsumsi tersebut dipenuhi dari 34% minyak bumi, 26,5% batu bara, dan 20,9% gas alam [1].

Pola konsumsi energi dunia cenderung meningkat setiap tahun, menjadi tiga kali dalam periode 50 tahun [2], sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.1, sedangkan cadangan dari sumber-sumber energi tersebut terus menurun setiap tahunnya. Di Indonesia sendiri, berdasarkan data yang dikeluarkan oleh British Petroleum pada tahun 2009, diketahui bahwa sampai akhir tahun 2008, cadangan energi fosil Indonesia akan habis dalam jangka waktu 10,2 tahun untuk minyak bumi, 45,7 tahun untuk gas bumi, dan 19 tahun untuk batu bara [3].



Gambar 1.1. Pola Konsumsi Energi Dunia [2]

Kondisi tersebut menimbulkan beberapa implikasi yang begitu berat, baik berdampak secara jangka terhadap lingkungan, maupun terhadap pemenuhan energi mendatang [1], sehingga diperlukan suatu langkah strategis dalam



kebijakan energi, yakni dengan mengembangkan energi alternatif baru yang dapat diperbarui, murah, dan efisien.

Terdapat beberapa sumber energi alternatif yang sedang dikembangkan, mulai dari *hydro power*, *biomass*, *biofuel*, *wind power*, *solar power*, *geothermal*, dan salah satu yang lain adalah *fuel cell* atau sel tunam yang sedang marak dikembangkan oleh beberapa negara dan banyak peneliti saat ini.

Sel tunam (*fuel cell*) merupakan suatu energi alternatif pengganti bahan bakar minyak, dengan menggunakan prinsip dasar elektrokimia dengan cara mengkonversi energi kimia menjadi listrik [4]. *Fuel cell* memiliki beberapa kelebihan dibandingkan energi alternatif lain terutama dalam segi efisiensi, portabilitas, kebisingan yang rendah, dan emisi yang dihasilkan [4]. *Fuel cell* menghasilkan energi listrik yang bersih dan efisien karena tidak adanya pembakaran, oleh karena itu tidak dihasilkan polutan yang umumnya dihasilkan oleh *boiler* dan dapur pembakaran.

*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) atau sel tunam berbahan dasar polimer adalah salah satu jenis *fuel cell* yang marak dikembangkan. Hal ini didasarkan oleh PEMFC itu sendiri yang memiliki banyak keunggulan, antara lain efisiensi dan kerapatan arus yang tinggi, temperatur aplikasi yang relatif rendah, suplai bahan bakar yang baik, dan waktu pakai yang panjang [5]. Namun, mahalnya biaya produksi menyebabkan PEMFC ini menjadi tidak ekonomis, sehingga perlu dikaji untuk mereduksi faktor biaya tersebut. Salah satu faktor penyebab tingginya biaya produksi PEMFC adalah pelat bipolar. Pelat bipolar berpengaruh terhadap 80% volume, 70% berat, dan 60% biaya dari *fuel cell* [5]. Hal ini berarti dengan mengurangi ukuran, berat, dan biaya pelat bipolar yang digunakan, maka kita dapat mengurangi biaya produksi dari PEMFC keseluruhan secara signifikan.

Oleh karena itu, inovasi yang dilakukan sekarang adalah bagaimana mendapatkan komponen pelat bipolar dengan spesifikasi berat komponen yang ringan, performa yang baik dalam hal sifat mekanis, fisik, dan konduktivitas listrik, serta biaya produksi yang rendah. Salah satu hal yang dapat dilakukan yakni dengan mensubstitusikan material bahan baku yang digunakan dalam pembuatan pelat bipolar. Pilihan utamanya adalah menggantikan material pelat

bipolar dari logam dengan komposit bermatriks polimer, khususnya polimer resin termoset, mengingat jenis polimer ini memiliki sifat-sifat pendukung, seperti densitas yang rendah, harga yang relatif lebih murah, sifat mekanik yang baik, ketahanan yang baik terhadap korosi, kimia, dan kelembaban, tidak ada emisi penguapan, penyusutan yang rendah selama pemanasan, kestabilan dimensi yang baik, serta sifat termal, adesif, dan listrik yang baik [6].

Dalam pengembangan material ini, perlu juga diperhatikan sifat dan performa pelat bipolar yang dihasilkan, mengingat fungsinya yang amat penting dalam sistem *fuel cell*, seperti sebagai pengumpul arus muatan listrik (*electrical current*), sebagai alur pemasok bahan bakar itu sendiri atau dapat dikatakan sebagai pengatur pendistribusian bahan bakar, sebagai penahan lewatnya gas secara langsung (*gas barrier*), serta sebagai penyalur sisa reaksi/hasil samping [7].

Untuk mendapatkan karakteristik tersebut, pada penelitian ini dibuat pelat bipolar dengan material komposit karbon/polimer, yakni dengan mengkombinasikan polimer termoset (khususnya resin epoksi) dengan bahan pengisi karbon seperti grafit dan *carbon black*. Grafit yang digunakan berasal dari limbah elektroda dapur listrik proses peleburan baja, yang digunakan sebagai pengganti grafit sintetis, sedangkan *carbon black* yang digunakan berasal dari serat alami (serabut kelapa) yang dikarbonisasi. Di tengah isu mengenai pencemaran lingkungan, maka pemanfaatan grafit limbah sisa hasil produksi ini sangatlah tepat.

## 1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian sebelumnya [8], penambahan polimer konduktif yang terlalu sedikit (sampai 200 mg polianilin dari total berat 180 gram) hanya menghasilkan nilai konduktivitas listrik sekitar 0.26 – 0.295 S/cm, jauh di bawah target DOE sekitar 100 S/cm. Banyak hal yang berpengaruh terhadap nilai yang dihasilkan, termasuk faktor penting dalam hal pembuatan pelat bipolar, yakni proses fabrikasi. Oleh karena itu, memungkinkan untuk memaksimalkan dua hal, yakni perbaikan kualitas bahan-bahan penyusun pelat bipolar komposit seperti *carbon black*, serta proses pencampuran dan fabrikasi.

Dalam hal proses, dapat dilakukan variasi dari tekanan pada proses *compression moulding* dengan tetap memperhatikan proses pencampuran (*hot blending*) yang baik, guna menghasilkan ikatan antar bahan penyusun yang maksimal. Variasi ini ditujukan untuk mengetahui pengaruh tekanan pada proses *compression moulding* terhadap sifat mekanik dan nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan, tanpa harus membutuhkan biaya yang besar, jika misalnya hanya memaksimalkan penggunaan bahan polimer konduktif.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Secara khusus, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh peningkatan tekanan pada proses *compression moulding* terhadap sifat mekanik dan nilai konduktivitas listrik pelat bipolar komposit, setelah dilakukan beberapa pengujian fisik, seperti pengujian konduktivitas listrik, porositas, densitas, dan fleksural.
2. Hal lain yang dilakukan setelah karakterisasi adalah membandingkan hasil karakterisasi pelat bipolar yang diteliti dengan karakterisasi pelat bipolar pada penelitian sebelumnya [9].

### 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Penting untuk mengetahui karakteristik dari bahan penyusun dalam pembuatan pelat bipolar komposit pada sistem PEMFC. Material polimer yang digunakan sebagai matriks adalah resin epoksi, yang akan diperkuat (*reinforced*) dengan menggunakan material keramik, seperti grafit EAF dan *carbon black*.

Pada penelitian ini, akan dilakukan beberapa tahapan dalam pembuatan pelat bipolar komposit, antara lain:

- a. Pencampuran antara resin epoksi, grafit EAF, dan *carbon black*.
- b. Pembuatan bakalan dengan metode *hot blending*, yang kemudian dilakukan proses *compression moulding* sehingga menghasilkan pelat bipolar yang siap diuji.
- c. Pengujian terhadap sampel-sampel yang telah dibuat, untuk mengetahui karakteristik dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan. Pengujian-pengujian yang dilakukan, antara lain pengujian konduktivitas listrik (*four*

*point probe testing*), porositas (ASTM C20), densitas (ASTM D792), dan fleksural (ASTM D790).

Kandungan resin epoksi yang digunakan tetap dan mengacu pada penelitian sebelumnya [9], yakni 20% dari total berat bahan penyusun komposit, dengan perbandingan komposisi resin dan *hardener* epoksi 1:1. Kandungan bahan pengisi karbon tetap dan mengacu pada penelitian sebelumnya [9], yakni 80% dari total berat bahan penyusun komposit, dengan perbandingan komposisi grafit dan *carbon black* 19:1 (95%:5%). Total berat bahan penyusun komposit adalah 180 gram. Selain itu, dilakukan variasi pada tekanan *compression moulding* sebesar 300, 350, 400, dan 450 kg/cm<sup>2</sup>.

### **1.5 Sistematika Penulisan**

Penulisan hasil penelitian ini dibagi dalam beberapa bab yang saling berhubungan. Adapun urutan dalam penulisan laporan ini terlihat pada uraian dibawah ini:

#### **Bab 1: Pendahuluan**

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang penelitian, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan penelitian.

#### **Bab 2: Teori Penunjang**

Pada bab ini diuraikan tentang studi literatur yang berkaitan dengan penelitian skripsi ini.

#### **Bab 3: Metodologi Penelitian**

Bab ini berisi prosedur penelitian, serta daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

#### **Bab 4: Hasil dan Pembahasan**

Bab ini berisi data-data hasil penelitian dan analisa dari hasil penelitian tersebut yang dibandingkan dengan hasil dari studi literatur.

#### **Bab 5: Kesimpulan**

Bab ini berisikan kesimpulan akhir berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian ini.

## BAB 2 TEORI PENUNJANG

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

*Fuel cell* merupakan suatu alat konversi energi yang menghasilkan tenaga listrik dan panas secara elektrokimia dengan menggunakan kombinasi antara bahan bakar gas (hidrogen yang dapat berasal dari gas alam, propana, butana, metanol, serta bahan bakar diesel) dan gas oksidan (oksigen yang berasal dari udara) melalui elektroda-elektroda dan melewati elektrolit konduktif ion (*ion conducting electrolyte*) [10]. Selama proses tersebut, air yang dihasilkan akan disalurkan melalui sistem pembuangan. *Fuel cell* tidak memerlukan sistem pengisian ulang, tidak seperti pada baterai, dimana energi akan terus dihasilkan selama bahan bakar diberikan [10].

Karakteristik dari *fuel cell* adalah kemampuannya untuk mengkonversikan energi kimia secara langsung menjadi energi listrik yang memberikan efisiensi proses yang lebih tinggi daripada beberapa sistem termal-mekanik konvensional, yang kemudian menghasilkan lebih banyak energi listrik dari sejumlah bahan bakar yang sama. *Fuel cell* dapat mengkonversikan 50 – 70% bahan bakar yang tersedia menjadi energi listrik (90% dengan *recovery* panas). Dikarenakan sistem operasinya tidak melibatkan proses pembakaran, maka hampir dipastikan bebas polusi dan memiliki sistem operasi yang lebih tenang (dalam parameter kebisingan) sejak tidak adanya komponen yang dipindahkan [10].

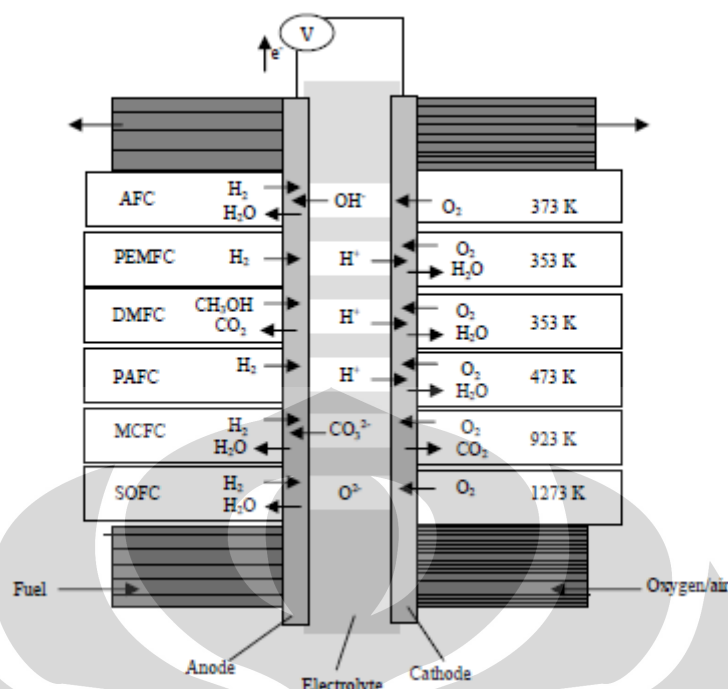
#### 2.1.1 Jenis-jenis *Fuel Cell*

Sampai saat ini, *fuel cell* telah dikelompokkan menjadi lima jenis sel berdasarkan elektrolit yang digunakan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1.** Jenis-jenis *Fuel Cell* dan Karakteristiknya [2,4,10]

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
<b>Elektrolit</b>	<i>Hydrated Polymeric Ion Exchange Membranes</i>	<i>Mobilized or Immobilized Potassium Hydroxide in asbestos matrix</i>	<i>Immobilized Liquid phosphoric Acid in SiC</i>	<i>Immobilized Liquid Molten Carbonate in LiAlO<sub>2</sub></i>	<i>Perovskites (Ceramics)</i>
<b>Elektroda</b>	Karbon	Logam transisi	Karbon	Nikel & nikel oksida	<i>Perovskites and Perovskites/metal content</i>
<b>Katalis</b>	Platina	Platina	Platina	Material elektroda	Material elektroda
<b>Interconnect</b>	Karbon atau logam	Logam	Grafit	Baja tahan karat atau nikel	Nikel, keramik, atau baja
<b>Temperatur operasi</b>	40 – 80 °C	65 – 220 °C	205 °C	650 °C	600 – 1000 °C
<b>Jenis muatan</b>	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	O <sup>-</sup>
<b>External reformer for hydrocarbon fuels</b>	Ya	Ya	Ya	Tidak, untuk beberapa bahan bakar	Tidak, untuk beberapa bahan bakar & desain sel
<b>External shift conversion of CO to hydrogen</b>	Ya, ditambah pemurnian menghilangkan CO	Ya, ditambah pemurnian menghilangkan CO dan CO <sub>2</sub>	Ya	Tidak	Tidak
<b>Komponen sel utama</b>	Berbasis karbon	Berbasis karbon	Berbasis grafit	Berbasis baja tahan karat	Keramik
<b>Pengaturan produk air</b>	Penguapan	Penguapan	Penguapan	Produk gas	Produk gas
<b>Pengaturan produk panas</b>	<i>Process gas + liquid cooling medium</i>	<i>Process gas + electrolyte circulation</i>	<i>Process gas + liquid cooling medium or steam generation</i>	<i>Internal reforming + process gas</i>	<i>Internal reforming + process gas</i>

Keterangan pada Tabel 2.1 di atas menunjukkan bahwa kelima jenis *fuel cell* menggunakan sumber energi yang berbeda dan menghasilkan emisi yang berbeda pula jika digunakan untuk bahan bakar hidrokarbon. Akibatnya, reaksi yang terjadi pada anoda dan katoda dari masing-masing sel berbeda sesuai dengan bahan bakar yang digunakan, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Reaksi Anoda dan Katoda dari Berbagai Jenis *Fuel cell* [2]

Dalam aplikasinya, *fuel cell* menghasilkan energi yang cukup besar dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sistem energi lain, misalnya *reciprocating engines*, *biomass-based generators*, *photovoltaic*, *wind turbines*, dan *micro-turbines*. Tabel 2.2 menunjukkan keluaran energi dan efisiensi proses dari beberapa sistem konversi energi.

Tabel 2.2. Energi dan Efisiensi dari Beberapa Sistem Konversi Energi [4]

Type	Size	Efficiency, %
Reciprocating Engines	50 kW – 6 MW	33 – 37
Micro turbines	10 kW – 300 kW	20 – 30
Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	50 kW – 1 MW	40
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	5 kW – 3 MW	45 – 65
Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM)	<1 kW – 1 MW	34 – 36
Photovoltaics (PV)	1 kW – 1 MW	NA
Wind Turbines	150 kW – 500 kW	NA
Hybrid Renewable	<1 kW – 1 MW	40 – 50

### 2.1.2 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Di antara semua jenis *fuel cell* yang dikembangkan, PEMFC merupakan sumber energi yang paling berpotensi untuk aplikasi pada perumahan danomotif, dikarenakan keunggulannya seperti menghasilkan energi yang besar,

temperatur operasi yang rendah, sehingga membuat sel ini dapat bereaksi lebih cepat, dan dapat meminimalisasi adanya unsur penyebab korosi [4], suplai bahan bakar yang sesuai, serta daya tahan yang baik [11]. Namun bagaimanapun juga, dalam prakteknya, kehilangan tegangan dan *overpotential* yang terjadi selama beroperasi dapat mengurangi efisiensi dari keunggulannya tersebut [11]. Selain itu sel ini juga mengalami keterbatasan terhadap bahan bakar yang digunakan, yaitu hidrogen, mengingat kadar  $H_2$  di udara cukup rendah dan biaya pembuatannya pun masih mahal, sehingga perlu pengembangan desain dan material [5].

Teknologi PEMFC berbeda dengan jenis *fuel cell* lain, yakni adanya membran polimer padat yang digunakan sebagai sel pemisah/elektrolit [4]. Dikarenakan sel pemisah adalah lapisan polimer dan sel beroperasi pada temperatur rendah, maka hal-hal seperti perakitan dan *handling* menjadi lebih sederhana jika dibandingkan dengan kebanyakan *fuel cell* lain. Selain itu, kebutuhan untuk menghilangkan zat asam atau basa yang korosif dapat diminimalisasi dalam sistem ini [4].

Pengaturan air dalam membran sangat penting guna menghasilkan performa yang efisien, sehingga sel harus dioperasikan dibawah kondisi dimana air yang dihasilkan tidak menguap lebih cepat dibandingkan proses pembuatannya karena membran harus cukup memiliki kelembaban [2]. Oleh karena itu, temperatur operasi dari PEMFC biasanya kurang dari  $120\text{ }^\circ\text{C}$  , yakni sekitar  $60 - 80\text{ }^\circ\text{C}$  [2].

### 2.1.3 Prinsip Dasar PEMFC

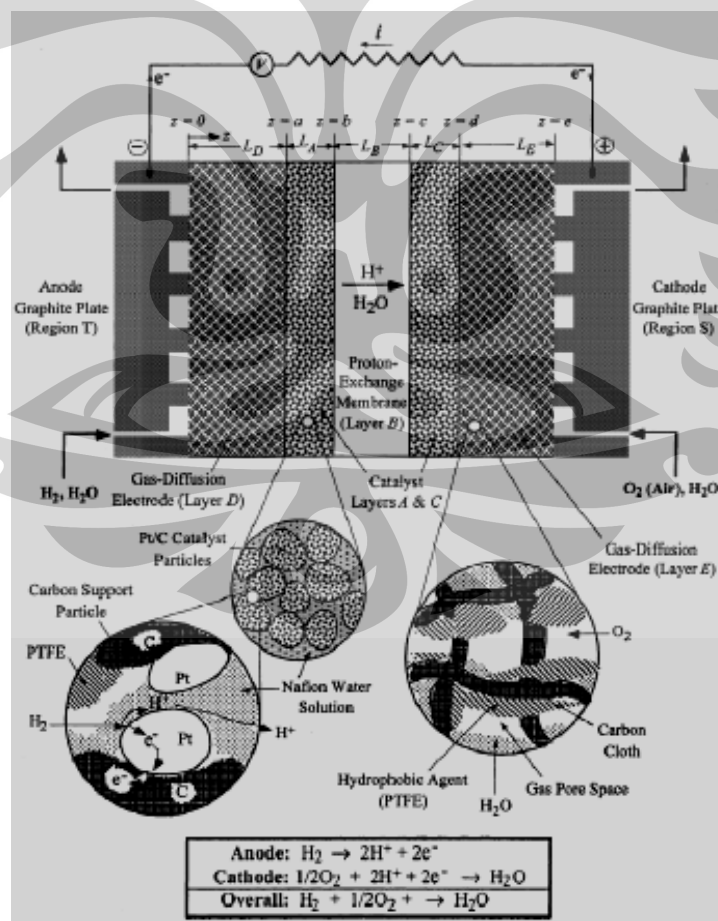
Prinsip dasar dari sistem PEMFC sangat sederhana, yaitu terjadinya reaksi oksidasi-reduksi dari dua sumber gas yang digunakan, hidrogen dan oksigen, yang akan bereaksi menghasilkan air dan pada saat yang bersamaan juga membangkitkan energi listrik dan panas [13].

Reaksi terjadi di dalam struktur *fuel cell* (sel elektrokimia sederhana), yang terdiri dari dua elektroda (anoda dan katoda), yang dipisahkan oleh elektrolit, yakni material yang membolehkan ion untuk melaluinya. Pada prosesnya, gas hidrogen yang bertekanan masuk melalui sisi anoda. Molekul  $H_2$  akan terpecah menjadi proton  $H^+$  dan elektron ( $e^-$ ) setelah bersentuhan dengan kandungan



platina pada katalis [14]. Proton  $H^+$  tersebut bergerak menuju katoda dengan menembus membran tipis berpori yang dibantu oleh adanya medan listrik pada membran, sedangkan elektron yang terkonduksi di anoda akan keluar melalui *external wire* karena terhalang oleh membran menuju sisi katoda dari sel dan dipergunakan untuk menghasilkan energi listrik [15].

Sementara di sisi katoda, gas oksigen merupakan oksidan yang paling umum digunakan karena tingkat ketersediaan dan nilai keekonomian yang cukup baik. Gas tersebut akan dialirkan melalui katoda, masing-masing dari dua atom oksigen mempunyai sepasang elektron dan menarik dua ion  $H^+$  melalui membran, sehingga akan bereaksi menghasilkan molekul air ( $H_2O$ ) [14]. Reaksi ini dalam *fuel cell* tunggal hanya menghasilkan 0,6 – 0,7 V dari energi listrik dengan rapat arus 0,6 – 0,8  $A/cm^2$ , sehingga perlu dilakukan peningkatan dengan mengkombinasikan komponen-komponen sel membentuk suatu tumpukan *fuel cell* [14,16]. Gambar 2.2 menunjukkan skematisasi proses pada sistem PEMFC.

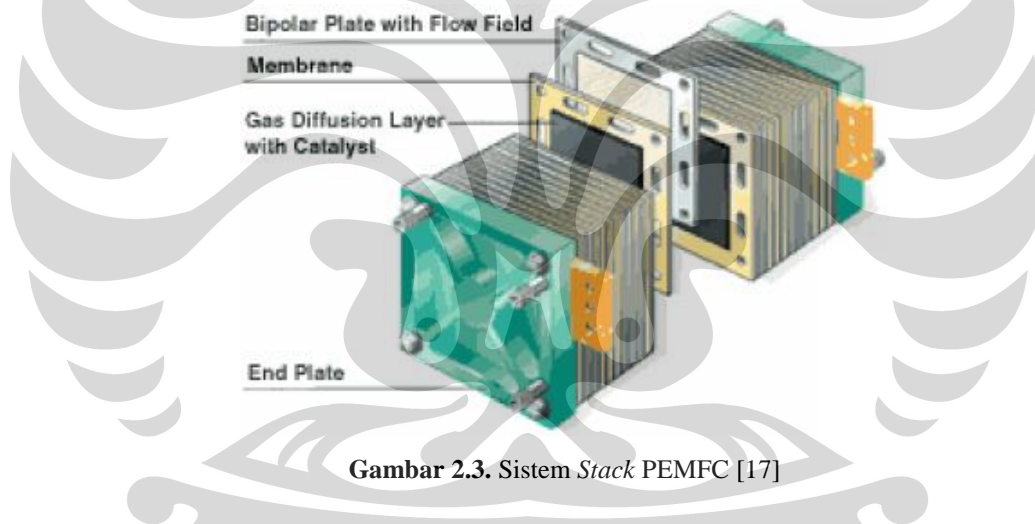


**Gambar 2.2.** Gambaran Skematik PEMFC Hidrogen [15]

Secara teoritis, substansi apapun yang mempunyai kemampuan oksidasi kimia dapat digunakan sebagai bahan bakar pada anoda *fuel cell*. Pada katoda, cairan apapun yang dapat tereduksi secara sempurna juga dapat digunakan sebagai oksidan. Namun, harga, ketersediaan, dan reaktivitas menjadi pertimbangan dalam penggunaannya dalam aplikasi sel [15].

## 2.2 Komponen Penting pada Sistem PEMFC

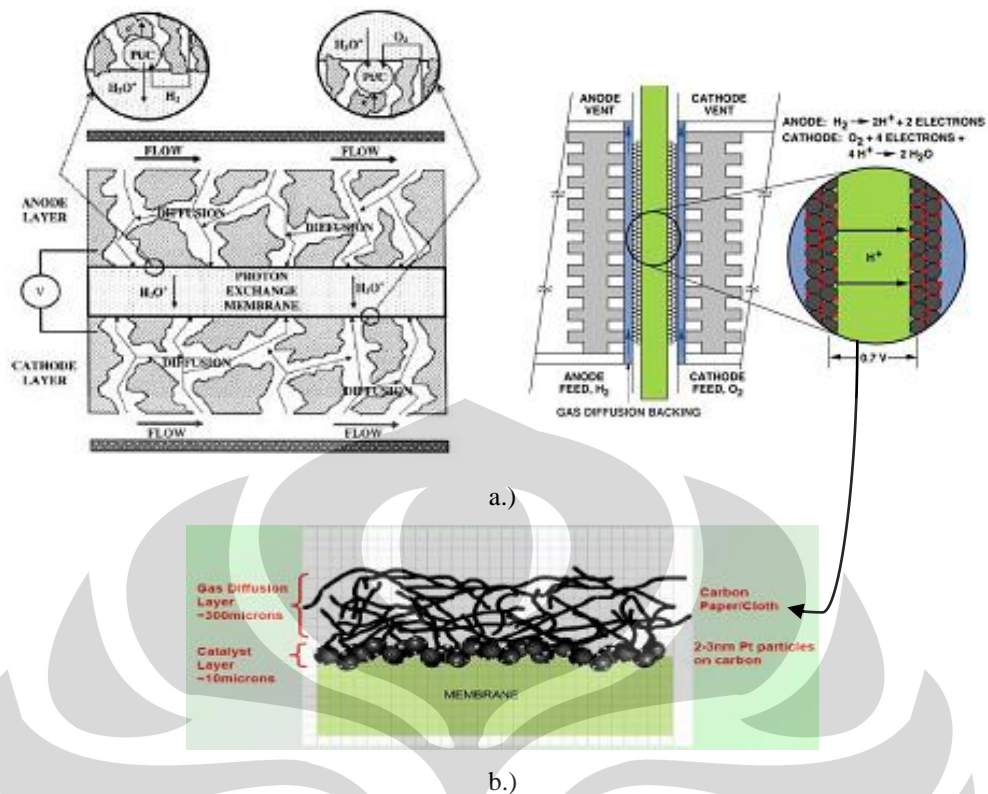
Sistem *fuel cell* tunggal memiliki keterbatasan dalam tegangan yang dihasilkan, yakni biasanya kurang dari 1 Volt. Agar menghasilkan tegangan yang lebih besar sehingga dapat digunakan pada beberapa aplikasi, maka beberapa unit sel harus dihubungkan dalam suatu susunan berupa tumpukan dari *fuel cell*. Nantinya, tegangan yang dihasilkan bergantung pada jumlah unit sel dalam suatu tumpukan. Gambar 2.3 menunjukkan struktur komponen dari sistem PEMFC.



Gambar 2.3. Sistem *Stack* PEMFC [17]

### 2.2.1 Penggabungan Membran Elektroda (*Membrane Electrode Assembly*)

MEA yang digunakan pada PEMFC terdiri dari beberapa bagian, antara lain lapisan katalis, membran, dan lapisan difusi gas, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. a.) Susunan MEA pada PEMFC [4] dan b.) Komponen Penyusun MEA [18]

Lapisan katalis dan difusi gas terikat pada bagian membran melalui suatu pengikat. Pengikat tersebut berfungsi untuk memperbaiki struktur partikel dari lapisan katalis. Jenis pengikat yang biasa digunakan adalah asam politetrafluorosulfonik [4]. Pengikat ini juga berfungsi untuk mencegah terjadinya penumpukan air dengan strukturnya yang berlubang dan memudahkan gas berdifusi ke dalam lapisan katalis.

Material yang digunakan sebagai lapisan katalis adalah platina, yang dapat menyediakan media transfer proton yang baik dan meningkatkan kemampularutan proton sebaik kemampularutan oksigen. Lapisan katalis tersebut memicu terjadinya reaksi, baik oksidasi maupun reduksi pada anoda dan katoda.

Lapisan difusi gas pada PEMFC menjamin gas-gas reaktan berdifusi secara efektif pada lapisan katalis. Lapisan difusi gas adalah konduktor listrik yang memindahkan elektron dari dan menuju lapisan katalis. Lapisan ini juga dapat berfungsi sebagai tempat pengelolaan air yang dihasilkan sebagai zat buangan. Lapisan ini dibentuk oleh karbon berporos dengan ketebalan 100 – 300  $\mu\text{m}$ . Bahan utamanya adalah material konduktif berpori, dan yang biasa digunakan

adalah *carbon cloth* atau *carbon paper*. Substrat terlebih dahulu diberi perlakuan dengan *fluoropolymer* dan *carbon black* dengan tujuan untuk memperbaiki pengaturan air dan sifat elektrik [12].

Membran sendiri pada MEA merupakan suatu padatan tipis yang membolehkan proton (kation) mengalir melalui sisi katoda, namun memisahkan molekul hidrogen dan oksigen, kemudian mencegah terjadinya pembakaran langsung, sehingga dapat dikatakan bahwa membran menyediakan media transfer bagi proton dari satu sisi elektroda ke sisi elektroda lain. Selain itu, membran juga berfungsi sebagai penyekat elektronik di antara pelat bipolar [12].

Pada saat transfer ion, perpindahan tersebut dipengaruhi oleh ikatan dari polimer dan kandungan air di dalamnya (sifat hidrofilik). Selain itu, konduktivitas dari membran sangat sensitif terhadap kontaminasi unsur lain. Sebagai contoh ketika membran bersentuhan dengan pengotor logam, maka ion logam akan berdifusi ke dalam membran dan menggantikan proton sebagai sumber energi sehingga konduktivitas dari membran menjadi lebih rendah [12].

Terdapat beberapa persyaratan mengenai material yang digunakan sebagai membran, antara lain [19]:

- a) Kestabilan yang baik terhadap reaksi kimia
- b) Sifat mampu permesinan yang baik (memungkinkan untuk dilakukan pembentukan partikel hingga berukuran 50  $\mu\text{m}$ )
- c) Bersifat asam
- d) Memiliki kemampuan menyerap air yang baik (sifat hidrofilik)
- e) Merupakan konduktor proton ( $\text{H}^+$ ) yang baik ketika terhidrasi

### 2.2.2 Elektroda

Sebuah membran diapit di antara dua elektroda. Semua reaksi elektrokimia terjadi pada permukaan elektroda. Pada anoda, hidrogen teroksidasi dan pada katoda oksigen tereduksi, membentuk air pada permukaan katalis [20]. Agar memungkinkan terjadinya reaksi, permukaan katalis harus memiliki akses bagi konduktif proton, konduktif elektron, dan fasa gas. Oleh karena itu, elektroda memiliki struktur yang poros yang mengandung polimer konduktif proton dan katalis pendukung [20]. Selain itu, partikel katalis dapat mempercepat terjadinya

reaksi sel. Biasanya digunakan platina atau logam mulia karena dapat menyediakan akses proton yang baik dan meningkatkan kelarutan proton. Temperatur operasi dan pH yang rendah membuat penggunaan katalis menjadi sangat penting, khususnya ketika reaksi reduksi oksigen pada katoda [12].

Elektroda terdiri dari platina berukuran nano (sekitar 3 – 5 nm) yang didukung oleh partikel karbon (30  $\mu\text{m}$ ) untuk memberikan konduktivitas elektron yang cukup [20]. Di setiap bagian atas kisi elektroda terdapat kisi difusi gas dengan tebal 100 – 300  $\mu\text{m}$  yang terbuat dari karbon berpori [15].

### 2.2.3 Pelat Bipolar

Pelat bipolar adalah komponen kunci dari PEMFC dengan sifat yang multifungsional [21]. Hal tersebut dikarenakan pelat bipolar memiliki fungsi ganda, yakni mengalirkan gas dan udara secara seragam ke lapisan difusi gas melalui *flow channel* dan mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda [10]. Selain itu, pelat ini berfungsi menghilangkan panas dari daerah aktif dan mencegah kebocoran dari gas dan pendingin [21]. Gambar 2.5 merupakan contoh visualisasi dari pelat bipolar yang digunakan pada sistem PEMFC.



Gambar 2.5. Pelat Bipolar [17]

#### 2.2.3.1 Fungsi Pelat Bipolar pada PEMFC

Dalam susunan *fuel cell*, pelat bipolar berfungsi memisahkan gas yang ada pada sel, mengalirkan arus listrik, dan juga berperan sebagai penyokong struktur dari sel. Pelat bipolar mempunyai *flow channel* di kedua sisinya, yang membentuk kutub anoda dan katoda yang saling berlawanan pada sisi pelat. Dalam sel tunggal, pelat pemisah hanya memiliki *flow channel* pada satu sisi, dan biasa dinamakan pelat monopolar [12].

Adanya dua kutub pada pelat, membuat fungsi pelat bipolar menjadi lebih kompleks, yakni [5]:

- a) menghantarkan elektron menuju sirkuit, termasuk:
  - mengumpulkan dan mengalirkan elektron dari anoda ke katoda
  - menghubungkan komponen sel, yang membentuk susunan *fuel cell* yang menghasilkan suatu tegangan
- b) menyediakan *flow field (flow channel)* untuk mengalirkan gas bahan bakar ( $H_2$ ) dan oksidan ( $O_2$ ) secara merata ke seluruh elektroda
- c) menyediakan kekuatan mekanik dan ketangguhan yang baik agar dapat menyokong membran dan elektroda
- d) menyediakan konduksi termal untuk mengatur temperatur bahan bakar dan melepaskan panas dari elektroda ke bagian pendingin.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa pelat bipolar hampir mempengaruhi 60% biaya produksi dari *fuel cell* [5], sehingga perlu dikembangkan suatu material baru untuk dapat mengurangi biaya produksi. Target keberhasilan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan pelat bipolar untuk PEMFC yang mengacu pada standar DOE (US Department of Energy), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3 berikut:

**Tabel 2.3.** Target Teknis DOE untuk Pelat Bipolar [22]

Characteristic	Units	2005 Status <sup>a</sup>	2010	2015
Cost <sup>b</sup>	\$/kW	10 <sup>c</sup>	5	3
Weight	kg/kW	0.36	<0.4	<0.4
H <sub>2</sub> permeation flux	cm <sup>3</sup> sec <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> @ 80°C, 3 atm (equivalent to <0.1 mA/cm <sup>2</sup> )	<2 x 10 <sup>-6</sup>	<2 x 10 <sup>-6</sup>	<2 x 10 <sup>-6</sup>
Corrosion	μA/cm <sup>2</sup>	<1 <sup>d</sup>	<1 <sup>d</sup>	<1 <sup>d</sup>
Electrical conductivity	S/cm	>600	>100	>100
Resistivity <sup>e</sup>	Ohm-cm	<0.02	0.01	0.01
Flexural Strength <sup>f</sup>	MPa	>34	>25	>25
Flexibility	% deflection at mid-span	1.5 to 3.5	3 to 5	3 to 5

<sup>a</sup> This is the first year for which status is available. 2005 status is for carbon plates, except for corrosion status which is based on metal plates.

<sup>b</sup> Based on 2002 dollars and costs projected to high volume production (500,000 stacks per year).

<sup>c</sup> Status is from 2005 TIAx study and will be periodically updated.

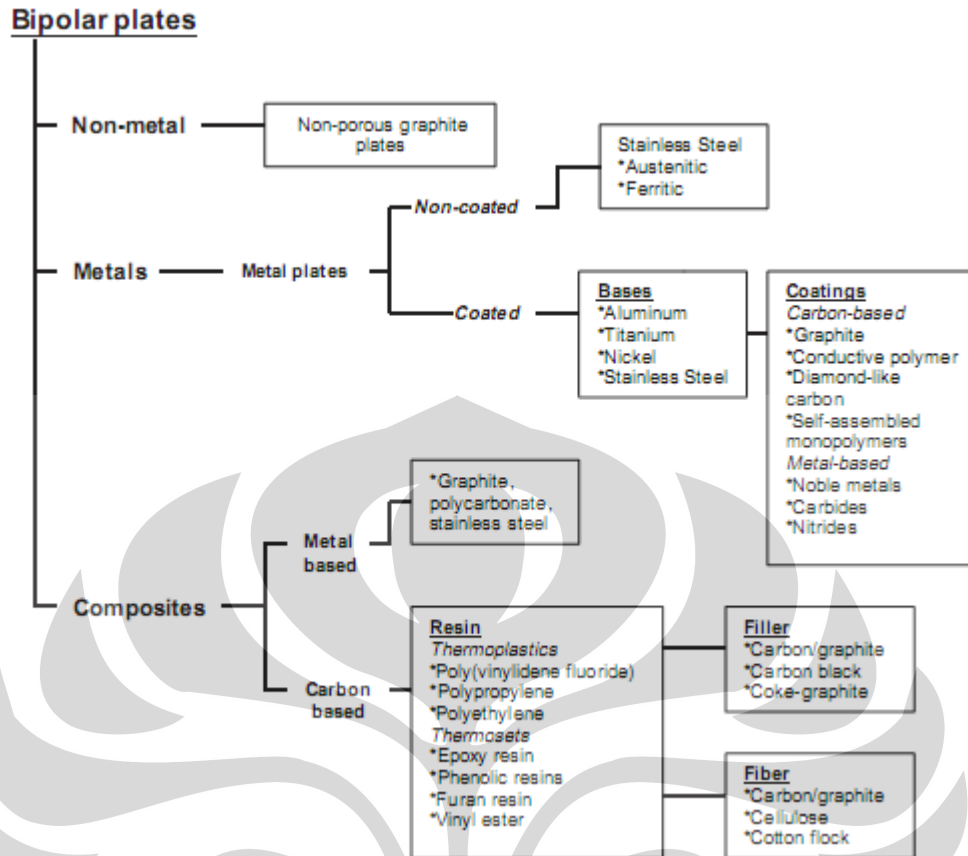
<sup>d</sup> May have to be as low as 1 nA/cm if all corrosion product ions remain in ionomer.

<sup>e</sup> Includes contact resistance.

<sup>f</sup> Developers have used ASTM C-651-91 Standard Test Method for Flexural Strength of Manufactured Carbon and Graphite Articles Using Four Point Loading at Room Temperature.

### 2.2.3.2 Jenis-jenis Pelat Bipolar

Semakin berkembangnya penelitian mengenai pembuatan pelat bipolar, saat ini terdapat berbagai jenis pelat bipolar berdasarkan material penyusun utamanya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6.** Klasifikasi Pelat Bipolar Berdasarkan Material Penyusunnya [21]

Pelat bipolar dengan material penyusun utama yang berbeda, tentunya akan memiliki karakteristik yang berbeda dari pelat yang dihasilkan. Masing-masing memiliki keunggulan dan kekurangan. Adapun karakteristik dari masing-masing material yang digunakan sebagai material penyusun utama dari pelat bipolar dapat dilihat pada Tabel 2.4.



Tabel 2.4. Kelebihan dan Kekurangan dari Material Pelat Bipolar [21,23]

Material	Kelebihan	Kekurangan
<b>Grafit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ketahanan korosi baik</li> <li>• Resistivitas rendah</li> <li>• Resistansi kontak rendah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sifat mekanik yang buruk (kegetasan)</li> <li>• Porositas</li> <li>• Volume dan berat besar</li> <li>• Biaya produksi mahal</li> </ul>
<b>Komposit karbon - karbon</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densitas rendah</li> <li>• Ketahanan korosi baik</li> <li>• Resistansi kontak rendah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kekuatan mekanik rendah</li> <li>• Konduktivitas listrik rendah</li> <li>• Harga tinggi</li> </ul>
<b>Komposit karbon - polimer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biaya rendah</li> <li>• Ketahanan korosi baik</li> <li>• Bobot yang ringan</li> <li>• Tidak menggunakan proses permesinan</li> <li>• Ketersediaan bahan baku</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kekuatan mekanik rendah</li> <li>• Konduktivitas listrik rendah</li> </ul>
<b>Logam</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konduktivitas listrik baik</li> <li>• Konduktivitas panas baik</li> <li>• Biaya produksi rendah</li> <li>• Sifat mekanik yang baik</li> <li>• Proses fabrikasi yang mudah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rentan terhadap korosi (pembentukan oksida pada permukaan)</li> </ul>

### 2.2.3.3 Pelat Bipolar Grafit

Pelat bipolar yang telah banyak digunakan dan dikembangkan pada sistem PEMFC adalah pelat berbasis grafit, yang memberikan beberapa keuntungan dalam hal ketahanan terhadap korosi, menghasilkan konduktivitas panas dan listrik yang baik, dan memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan pelat logam [14,24]. Namun, sifat mekanik yang dihasilkan buruk, karena pelat ini sangat getas dan berpori. Akibatnya, pelat ini membutuhkan suatu proses permesinan yang kompleks dan mengkonsumsi waktu yang lebih lama, sehingga akan menaikkan biaya produksi [25].

Selain itu, karena sifatnya yang getas, pelat bipolar harus lebih tebal agar menghasilkan kekuatan mekanis yang cukup ketika dilakukan proses pengerjaan pelat dan perakitan *fuel cell*. Maka dari itu, berat dan volume dari pelat bipolar grafit menjadi lebih besar, sehingga susunan sel yang dihasilkan pun menjadi lebih berat. Hal ini akan meningkatkan biaya produksi dari pelat, sehingga perlu menjadikan pertimbangan dalam penggunaannya sebagai komponen PEMFC dengan biaya yang rendah [5,24].

#### 2.2.3.4 Pelat Bipolar Komposit

Jenis pelat ini dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu komposit berbasis logam dan karbon. Biasanya, pelat bipolar dengan material komposit logam menggunakan grafit berpori, plastik polikarbonat, dan baja tahan karat, sedangkan pada komposit berbasis karbon biasa digunakan penguat berupa polimer, baik polimer termoplastik, seperti polipropilen dan polietilen, serta polimer termoset, seperti resin epoksi, resin *phenolic*, maupun vinil ester. Selain itu pada komposit karbon biasa ditambahkan bahan pengisi (*filler*), baik yang berbentuk partikel maupun serat (*fiber*) guna meningkatkan sifat dari pelat bipolar [5].

Penggunaannya dalam berbagai aplikasi, pelat bipolar komposit banyak diminati karena pelat ini mampu menggabungkan kelebihan dari dua sifat material yang berbeda dan meminimalisasi kerugian dari material tersebut, sehingga sampai saat ini pengembangan material komposit untuk komponen pelat bipolar terus dilakukan guna mendapatkan sifat material yang baik dan memenuhi persyaratan dari pelat bipolar. Adapun sifat-sifat yang dihasilkan dari pelat bipolar komposit antara lain [25]:

- a) Memiliki stabilitas kekuatan yang cukup baik untuk menahan beban kompresi
- b) Memiliki berat dan volume yang rendah
- c) Memiliki nilai konduktivitas termal dan listrik yang tinggi
- d) Permeabilitas gas yang rendah untuk hidrogen
- e) Memiliki ketahanan kimia dan korosi yang baik
- f) Harga material dan proses yang relatif kecil

### 2.2.3.5 Pelat Bipolar Komposit Karbon/Polimer

Material komposit berbasis karbon dan pengikat (*binder*) polimer lebih sesuai untuk mencapai sifat yang diinginkan dari suatu pelat bipolar, serta kemampuannya untuk meningkatkan teknologi manufaktur, mencakup pembuatan *flow field* dan *cooling channel* [25]. Pelat bipolar komposit ini dibuat secara komersial dengan menggunakan polimer sebagai bahan pengikat dan kandungan yang tinggi dari paduan karbon konduktif (seperti serbuk grafit, baik sintetik maupun alami, *carbon black*, dan *carbon nanotube*) yang dapat meningkatkan konduktivitas. Polimer yang digunakan dapat berasal dari material termoplastik, seperti *polyvinylidene fluoride* (PVDF), polietilen, polipropilen, *liquid crystal polymer*, dan *polyphenyl sulfide* (PPS), maupun material termoset seperti *vinyl ester*, resin penolik, dan resin epoksi [25].

Material termoplastik dijadikan sebagai matriks karena memiliki beberapa kelebihan, antara lain ketahanan terhadap lingkungan kimia, sifat mekanik baik, impermeabilitas gas, dan harga yang murah. Tetapi, jika dibandingkan dengan material termoplastik, material termoset memiliki kelebihan dalam hal waktu produksi, dimana jenis material ini membutuhkan waktu yang lebih singkat, karena material termoset dapat langsung dilepas dari cetakan ketika masih dalam keadaan panas [5].

Meskipun pelat bipolar komposit polimer memiliki banyak kelebihan dibandingkan pelat bipolar berbahan dasar grafit atau logam, namun material komposit polimer memiliki kendala, yakni nilai konduktivitas listrik yang dihasilkan tidak mencapai standar pelat bipolar yang dibutuhkan. Hal tersebut dikarenakan kebanyakan polimer memiliki nilai konduktivitas listrik yang rendah [5]. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu bahan tambahan guna meningkatkan nilai konduktivitas listrik dari pelat, dan bahan yang biasa digunakan adalah karbon, baik grafit, serat karbon, maupun *carbon black*. Namun, sebelum menambahkan suatu material konduktif ke dalam sistem komposit, terlebih dahulu perlu diketahui nilai konduktivitas listrik dari bahan-bahan tersebut, sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 2.5.

**Tabel 2.5.** Perbandingan Nilai Konduktivitas dari Material Pelat Bipolar [23]

Material	Konduktivitas ( $\text{Scm}^{-1}$ )
Polimer	1
Grafit	$10^3$
Komposit polimer/grafit	10
Paduan Fe	$5300 \times 10^3$
Ti	$2400 \times 10^3$
Emas	$45000 \times 10^3$

Partikel konduktif akan membentuk *percolation network* dalam matriks polimer. Untuk menghasilkan pelat bipolar dengan stabilitas mekanik yang baik serta permeabilitas gas yang rendah, diperlukan suatu kualitas dispersi dari komponen partikel konduktif dan bahan pengikat polimer. Proses ini dapat dilakukan secara diskontinu dengan menggunakan *kneader* atau secara kontinu dengan *extruder*, walaupun material dengan homogenitas tinggi diperoleh dengan menggunakan *twin extruder* [25]. Butir-butir bakalan material komposit yang dihasilkan dari *extruder* kemudian dapat diproses melalui *compression moulding* ataupun *injection moulding* untuk menghasilkan pelat bipolar [25].

### 2.3 Material-material Penyusun Pelat Bipolar Komposit Karbon/Epoksi

Material-material penyusun dari pelat bipolar perlu mendapat perhatian lebih, karena karakteristik dari pelat bipolar yang dihasilkan akan tergantung pada material yang digunakan.

Pada penelitian ini, digunakan material-material penyusun dalam sistem komposit seperti resin epoksi, grafit, khususnya yang berasal dari limbah elektroda listrik dalam proses peleburan baja, serta *carbon black*. Keterangan dan karakteristik dari masing-masing material akan diterangkan sebagai berikut.

#### 2.3.1 Resin Epoksi

##### 2.3.1.1 Umum

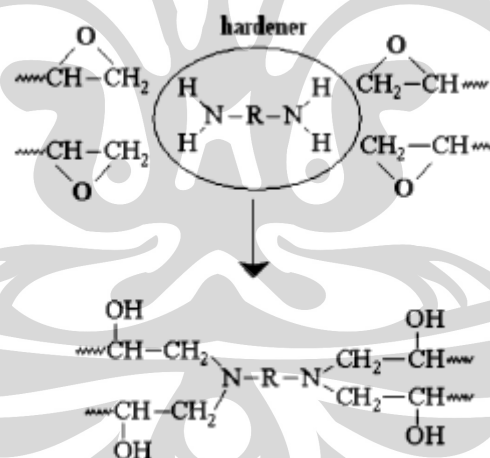
Epoksi merupakan salah satu jenis polimer yang tergolong dalam polimer termoset, yang memiliki sifat tidak dapat menerima siklus pemanasan dan

pendinginan berulang secara kontinu, seperti halnya pada jenis polimer termoplastik. Ketika dipanaskan pada tahap awal, polimer ini akan melunak dan mampu mengalir di dalam cetakan, kemudian akan mengalami reaksi kimia yang diikuti dengan pengerasan. Ketika dipanaskan ulang, epoksi tidak mampu kembali ke bentuk semula (melunak), melainkan akan terdegradasi [26].

### 2.3.1.2 Stuktur dan Sifat

Resin epoksi telah menjadi material yang sangat penting dalam industri, sebagai contoh untuk aplikasi pelapisan, matriks pada komposit, enkapsulan, bahan perekat struktural, dan sebagainya. Hal tersebut dikarenakan resin epoksi memiliki keunggulan dalam kemampuan proses, murah, ketahanan korosi yang baik, sifat termal dan mekanik yang baik, serta penyusutan yang kecil pada saat *curing* [14].

Mengenai reaksi yang terjadi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.7, resin epoksi akan mengalami proses *curing*, dan membentuk struktur jaring bersilang (*crossed-link*) ketika dicampur dengan unsur katalis atau *hardener*.



Gambar 2.7. Pembentukan Jaringan dan Ikatan dari Resin Epoksi [11]

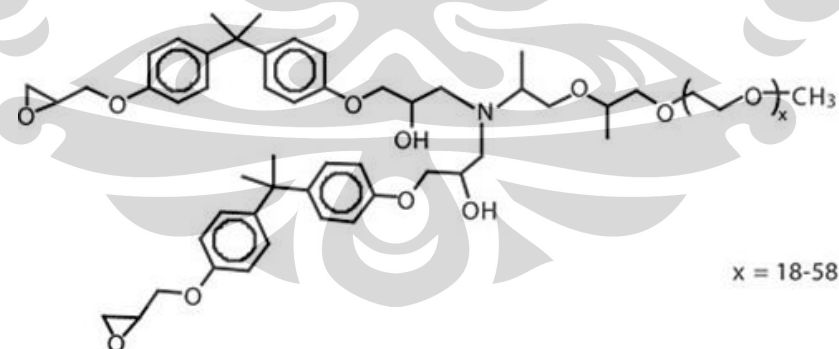
Struktur kimia resin epoksi dari berbagai macam proses reaksi *curing* akan mempengaruhi sifat dari resin epoksi yang dihasilkan. Pada umumnya, resin epoksi memiliki sifat sebagai berikut [8]:

- Kekuatan adhesi yang sangat baik
- Ketahanan yang baik terhadap panas dan zat kimia lain
- Moisture resistance* yang baik

- d) Sifat mekanis yang cukup baik (tergantung dari jenis epoksi)
- e) Sifat *electrical insulating* yang sangat baik
- f) Dapat dengan mudah diperbaiki sifatnya (misalnya konduktivitas listrik dapat mudah ditingkatkan dengan penambahan aditif/*filler* yang mampu menghantarkan listrik dengan baik)

Pada sistem komposit, resin epoksi sering digunakan sebagai material utama atau matriks dibandingkan dengan polimer lainnya. Hal tersebut dikarenakan resin epoksi memiliki daya isi dan kemampuan yang baik dalam mengkonsolidasikan material lain pada sistem komposit. Selain itu reaksi yang terjadi antara resin epoksi dengan unsur lain tidak memerlukan daya pembasahaan yang banyak, sehingga proses pencampuran pun menjadi lebih sederhana. Namun, resin epoksi sendiri bersifat isolator, sehingga diperlukan penambahan material lain untuk meningkatkan nilai konduktivitas listrik, jika nantinya akan digunakan pada aplikasi PEMFC.

Sebagai salah satu material penyusun pelat bipolar komposit, resin epoksi dicampurkan dengan *hardener*. Gambar 2.8 menunjukkan hasil reaksi *curing* yang dilakukan dengan pemberian panas setelah pencampuran antara resin epoksi dan *hardener* (khususnya pada *amine hardener system*), yang kemudian berfungsi sebagai matriks pada sistem komposit.



**Gambar 2.8.** Reaksi antara Resin Epoksi dan *Hardener* [27]

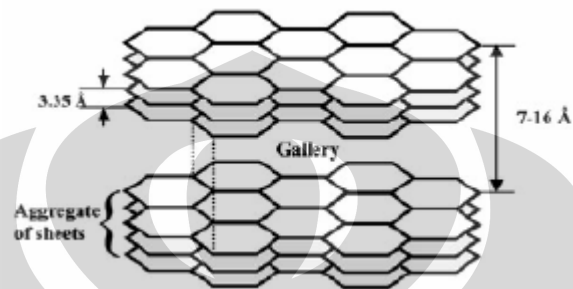
## 2.3.2 Grafit

### 2.3.2.1 Sifat/Struktur

Polimer biasanya dianggap sebagai material isolasi (*insulating material*). Apabila bahan pengisi konduktif seperti grafit atau *carbon black* didispersikan ke

dalam matriks polimer di atas konsentrasi *threshold*, maka material tersebut akan menjadi konduktif [28].

Grafit merupakan salah satu bentuk alotropi dari karbon yang terdiri dari susunan atom-atom karbon secara heksagonal yang membentuk kisi planar dengan ikatan antar lapisan yang lemah, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Struktur Kristal Grafit [17]

Kisi yang terbentuk memiliki kekakuan yang tinggi, namun mudah mengalami pergeseran antar lapisan. Grafit dengan struktur seperti ini akan menghasilkan sifat yang unik, sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi, baik sebagai material utama maupun material pengisi. Secara umum, sifat dari grafit dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Sifat Umum Grafit [17]

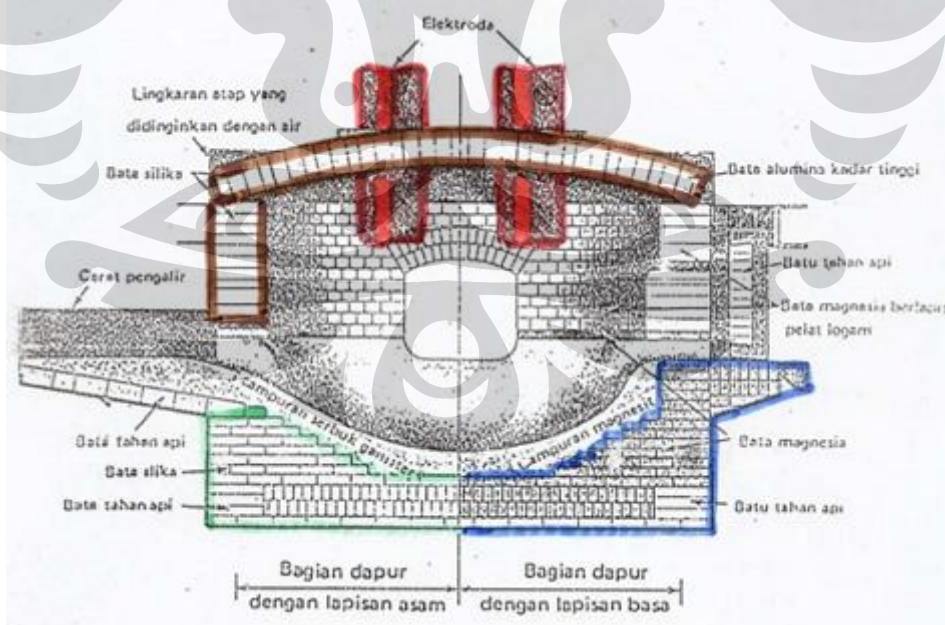
Sifat	Unit	Nilai
Densitas	g/cc	1,3 – 1,95
Porositas	%	0,7 – 53
Modulus Elastisitas	GPa	8 – 15
Kekuatan Tekan	MPa	20 – 200
Kekuatan Fleksural	MPa	7 – 100
Konduktivitas Termal	W/m K	25 – 470
Panas Spesifik	J/kg K	710 – 830
Koef. Ekponensial Termal	m/m K	$2,2 – 6,0 \times 10^{-4}$
Resistivitas Listrik	Ohm-m	$5 – 30 \times 10^{-6}$

Adapun sifat kimia dan fisik dari grafit adalah [8]:

- Memiliki konduktivitas panas dan listrik yang sangat baik
- Memiliki sifat pelumasan yang baik pada tekanan dan temperatur yang tinggi
- Ketahanan oksidasi dan daya tahan terhadap unsur kimia tinggi
- Kemampuan untuk mengikat molekul kimia di antara lapisan grafit

Grafit alami terbentuk akibat tekanan dan panas yang tinggi dari dalam bumi, sedangkan grafit sintesis terbentuk secara mekanis, dimana grafit ini memiliki kekuatan mekanik yang tinggi dan mengandung sedikit abu.

Pada proses peleburan bahan baku pembuatan baja, khususnya dengan menggunakan dapur busur listrik seperti yang terlihat pada Gambar 2.10, dibutuhkan suatu elektroda yang berfungsi untuk mengalirkan arus yang besar, sehingga dapat melebur besi spons (*sponge iron*) dan besi tua (*scrap*) sebagai bahan baku utama pembuatan besi dan baja. Oleh karena itu, grafit yang memiliki nilai konduktivitas listrik yang tinggi dipilih sebagai material utama untuk aplikasi elektroda. Grafit yang digunakan adalah grafit sintesis yang diperoleh dengan memanaskan karbon pada temperatur tinggi.

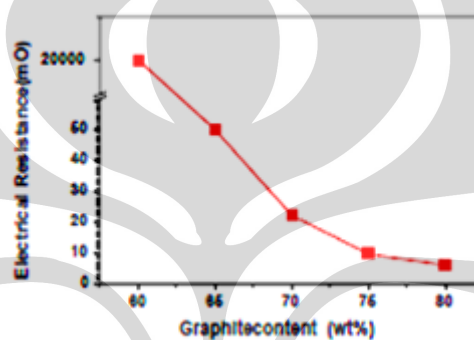


**Gambar 2.10.** Proses Peleburan Bahan Baku Pembuatan Baja pada Dapur Busur Listrik [29]



Pada penelitian ini, grafit limbah proses peleburan, digunakan sebagai material penguat pada sistem komposit berbasis polimer dikarenakan harganya yang murah dibandingkan grafit sintesis dan dapat berpotensi mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah elektroda.

Grafit dalam matriks polimer dapat berfungsi sebagai aditif konduktif yang dapat mengurangi resistansi listrik dari pelat bipolar komposit, selain itu grafit dapat meningkatkan koefisien friksi, serta meningkatkan konduktivitas termal [30]. Gambar 2.11 menunjukkan pengaruh penambahan grafit terhadap resistansi listrik dari pelat bipolar.



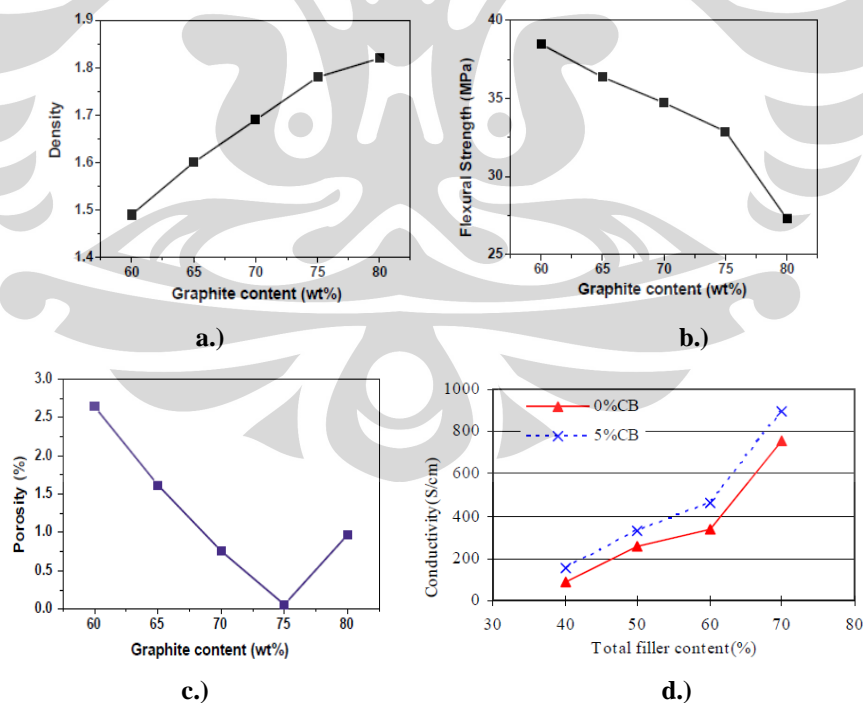
**Gambar 2.11.** Pengaruh Penambahan Grafit terhadap Resistansi Listrik [31]

Ukuran, arah, dan bentuk dari partikel grafit yang digunakan akan mempengaruhi sifat dari komposit yang dihasilkan, terutama konduktivitas listrik. Grafit yang memiliki arah orientasi partikel yang tegak lurus terhadap arah penekanan pada saat pencetakan akan memiliki nilai konduktivitas yang lebih baik dibandingkan dengan arah orientasi yang sejajar dengan arah penekanan. Selain itu, kekuatan fleksural dari grafit yang berbentuk partikel lebih baik daripada grafit dengan bentuk serpih (*flake*), karena tegangan yang diterima oleh grafit akan tersebar merata di seluruh permukaannya, sehingga regangan yang terjadi akan semakin kecil. Pada Tabel 2.7 terlihat bahwa semakin kecil ukuran dari partikel, akan menurunkan nilai konduktivitasnya, namun secara tidak langsung akan meningkatkan kekuatannya.

**Tabel 2.7.** Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel dari Grafit [32]

Sample	Particle size	Direction	Bulk electrical conductivity (S/cm)	Thermometric conductivity [W/(m·°C)]	Flexural strength (MPa)
Spherical graphite	250~325 mesh	//	84.0	18.9	39.5
		⊥	387.3	71.9	
	-325 mesh	//	60.0	12.5	44.0
		⊥	326.9	61.4	
Flake-like graphite	250~325 mesh	//	76.0	20.3	35.0
		⊥	566.5	113.0	
	-325 mesh	//	45.8	13.0	39.8
		⊥	420.3	105.5	

Namun penambahan dari grafit juga harus dibatasi. Sesuai dengan literatur [31], penambahan dilakukan sekitar 50 – 80%. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.12, apabila penambahan yang dilakukan melebihi 80% dari keseluruhan fraksi volume, maka dapat mengakibatkan turunnya kekuatan fleksural dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan. Nilai densitas dari sistem komposit akan bertambah seiring dengan kenaikan muatan grafit (sampai dengan 80%), sedangkan nilai porositasnya akan berkurang sampai penambahan 75% grafit [31], serta nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar akan bertambah sampai penambahan 70% grafit [14].



**Gambar 2.12.** Pengaruh Penambahan Grafit terhadap: a.) Densitas, b.) Kekuatan fleksural, c.) Porositas [31], dan d.) Konduktivitas [14]

### 2.3.3 Carbon Black

#### 2.3.3.1 Umum

*Carbon black* merupakan bentuk amorf dari karbon dengan susunan struktur yang hampir sama dengan grafit. Ketika hidrokarbon aromatik diperlakukan pada pembakaran yang tidak sempurna pada temperatur tinggi, molekul-molekulnya kemudian akan terdisosiasi melalui pemutusan ikatan molekul C—H. Setelah itu, atom-atom karbon dan atom radikal aromatik bereaksi membentuk struktur lapisan dari cincin karbon heksagonal, yang cenderung membentuk tiga sampai empat lapisan, yang membentuk struktur kristalografi. Kristalit kemudian membentuk partikel primer, yang diikuti oleh fusi ke dalam bentuk agregat primer. Gaya van der Waals menyebabkan agregat-agregat yang terbentuk bergabung membentuk aglomerat [28].

Ada sedikitnya lima tipe pembuatan *carbon black* dalam industri, antara lain *furnace black*, *thermal black*, *lampblack*, *channel black*, dan *acetylene black* [28]. Proses yang berbeda akan menghasilkan sifat fisik dan kimia dari *carbon black* yang berbeda pula, dimana sekitar 90% partikel *carbon black* dihasilkan melalui proses *furnace black* [28]. Keterangan mengenai proses pembuatan *carbon black* ditunjukkan pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8. Klasifikasi Proses Fabrikasi dan Penggunaan dari *Carbon Black* [33]

Chemical Process	Production Process	Feedstock	Uses
<b>Thermal-oxidative decomposition</b>			
Closed System (Turbulent flow)	Furnace black process	Aromatic oils based on coal tar or crude oil, natural gas	Tires, non-tire rubber applications, and pigments
	Lampblack process	Aromatic oils based on coal tar or crude oil	Mechanical rubber goods, electrodes, and carbon brushes
Open System (Diffusion flames)	Dequssa gas black process	Coal tar distillates	Mechanical rubber goods, electrodes, and carbon brushes
	(Channel black process) <sup>a</sup>	Natural Gas	Pigments
<b>Thermal decomposition</b>			
Discontinuous	Thermal black process	Natural Gas (Oils)	Specialty applications
Continuous	Acetylene black process	Acetylene	Electric cells and conductive and antistatic rubber and plastic applications

### 2.3.3.2 Sifat/Struktur

Ketika digunakan sebagai bahan pengisi konduktif, *carbon black* dikarakterisasi berdasarkan tiga sifat utama, yakni ukuran partikel (luas permukaan), struktur, dan sifat kimia permukaan dari *carbon black* [28]. Umumnya, sifat *carbon black* berhubungan dengan proses pelarutan yang bergantung pada ukuran dan struktur partikel [34].

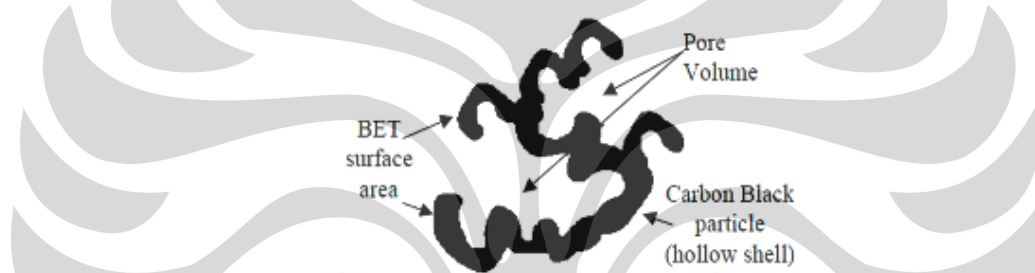
- Ukuran Partikel/Luas permukaan

Ukuran partikel utama dari *carbon black* akan menentukan derajat kemampudispersian yang lebih baik. Semakin kecil ukuran partikelnya, akan menghasilkan luas permukaan yang lebih besar, yang kemudian akan berpengaruh terhadap sifat kemampubasahannya. Selain itu, ukuran partikel yang lebih kecil akan menghasilkan volume konsentrasi yang lebih besar, misalnya dalam sistem komposit, dengan penambahan berat yang sama, sehingga akan menghasilkan jarak antar agregat yang semakin kecil.

- Struktur

Struktur *carbon black* yang besar akan lebih mudah terdispersi daripada struktur yang kecil. Struktur yang lebih besar menunjukkan bidang terpadat

yang rendah, sehingga akan menyediakan ruang yang lebih besar bagi resin polimer ketika dicampurkan untuk mengisi bidang kosong dari karbon dan membentuk ikatan kimia yang baik. Struktur partikel yang lebih besar juga penting dalam pencapaian konduktivitas listrik yang tinggi [28]. *Carbon black* dikarakterisasi berdasarkan jumlah partikel utama (*prime particle*) yang terkandung dalam aglomerat *carbon black*. Ketika mengandung lebih sedikit partikel utama, maka disebut *low-structure black* [28]. Ketika *carbon black* memiliki *high-structure black* yang cenderung menghasilkan jarak antar agregat yang lebih kecil, maka akan menghasilkan konduktivitas listrik yang lebih besar dengan penambahan berat yang sama [28]. Gambar 2.13 dan Tabel 2.9 memperlihatkan struktur dan sifat umum dari *carbon black*.



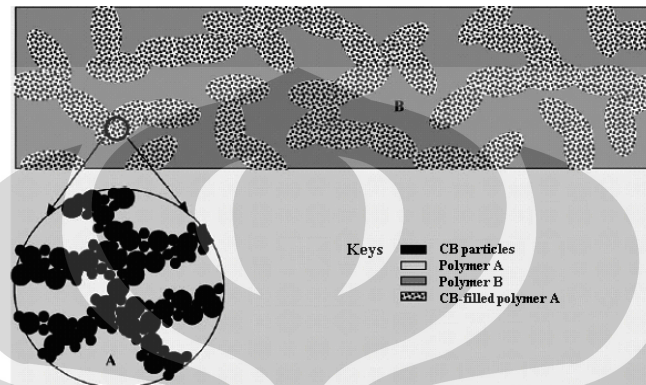
**Gambar 2.13.** Ilustrasi dari Struktur *Carbon Black* [33]

**Tabel 2.9.** Sifat Fisik Beberapa Jenis *Carbon Black* untuk Aplikasi Konduktivitas Listrik [28]

Name	Diameter (nm)	Nitrogen Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	DBP Absorption (cm <sup>3</sup> /100 g)	Volatiles (%)
Black Pearls 2000	12	1500	330	2.0
Vulcan XC72	30	254	178	1.5
Vulcan PA90	20	140	116	1.5
Elftex TP	20	130	98	1.5
Vulcan P	20	140	116	1.4

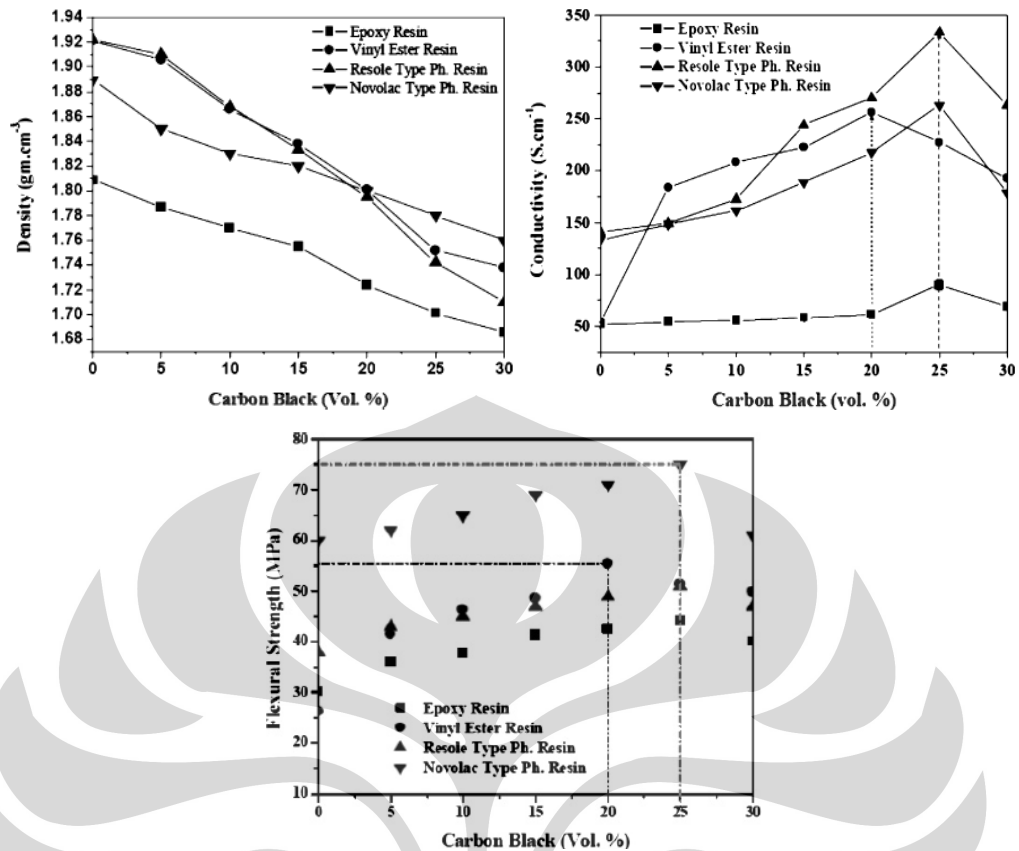
Pada pelat bipolar komposit, perlu dilakukan penambahan suatu material konduktif dengan tujuan untuk meningkatkan nilai konduktivitas listrik dari pelat, sehingga dapat menghantarkan listrik dalam sel bahan bakar secara efisien, dan material yang biasa digunakan adalah *carbon black* karena memiliki nilai konduktivitas listrik yang cukup baik, serta harganya yang cukup murah jika

dibandingkan dengan *carbon active*. *Carbon black* juga digunakan karena kemampuannya dalam meningkatkan stabilitas dimensi, penstabil (*stabilizer*) terhadap cahaya ultraviolet, antioksidan, dan zat pewarna [28]. Pada sistem komposit, *carbon black* akan mengikat polimer dan membentuk jaringan antar karbon, seperti terlihat pada Gambar 2.14, sehingga dapat dengan mudah mengalirkan arus listrik dan mengurangi efek isolator dari polimer.



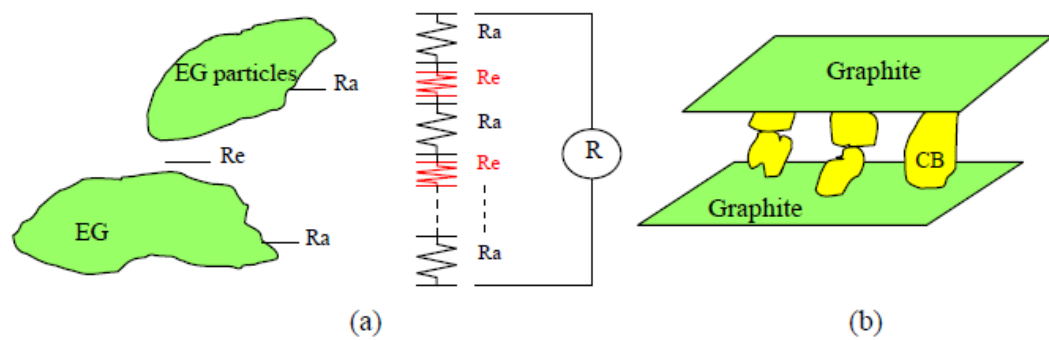
**Gambar 2.14.** Skema *Carbon Black* dalam Matriks Polimer pada Komposit [23]

Namun, penambahan *carbon black* yang terlalu banyak akan menurunkan sifat mekanis dari pelat bipolar, karena *carbon black* memiliki struktur yang berpori sehingga beban yang diterima oleh pelat menjadi berkurang, serta densitas yang dihasilkan juga akan meningkat. Gambar 2.15 menunjukkan pengaruh penambahan *carbon black* terhadap sifat pelat bipolar yang dibuat dengan metode *compression moulding* pada tekanan  $\sim 100 \text{ kg/cm}^2$ .



**Gambar 2.15.** Pengaruh Penambahan *Carbon Black* terhadap Densitas, Konduktivitas Listrik, dan Kekuatan Fleksural [11]

Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.16, resistansi total dari pelat bipolar komposit terutama berasal dari resistansi pada daerah antar agregat (*inter-aggregate space*),  $R_e$ . Oleh karena itu, kehadiran partikel *carbon black* memberikan hubungan tambahan antar lapisan grafit, yang kemudian akan mengurangi nilai  $R_e$  [14]. Perlu diperhatikan pula bahwa *carbon black* dapat secara efisien meningkatkan nilai konduktivitas listrik dengan penambahan yang minimum karena partikel tersebut memiliki struktur yang bulat dan bercabang, dengan luas permukaan yang tinggi dan ukuran partikel yang kecil.



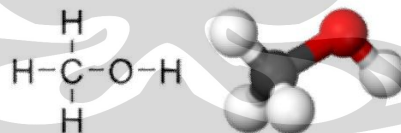
**Gambar 2.16.** Ilustrasi Skematik dari (a) Bagaimana Beragam Resistansi Terjadi yang Didefinisikan dengan Keseluruhan Resistansi, R; (b) Partikel *Carbon Black* Ditempatkan di antara Lapisan Grafit untuk Mengurangi Nilai  $R_e$  [14]

## 2.3.4 Zat Pelarut

### 2.3.4.1 Metanol

Metanol yang dikenal sebagai pelarut organik polar, digunakan sebagai pelarut atau pengencer untuk resin dan *hardener* epoksi, sehingga resin epoksi dapat bercampur dengan grafit. Daya pembasahan resin terhadap grafit akan meningkat dan dapat membasahi seluruh permukaan grafit, sehingga ikatan yang terbentuk antara resin dan grafit menjadi lebih kuat.

Adapun struktur dan sifat dari metanol secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.17 dan Tabel 2.10.



**Gambar 2.17.** Struktur dari Metanol [35]

**Tabel 2.10.** Sifat Umum Metanol [35]

<b>Molecular formula</b>	CH <sub>3</sub> OH
<b>Molar mass</b>	32.05 g/mol
<b>Appearance</b>	colorless liquid
<b>Density</b>	0.7918 g/cm <sup>3</sup>
<b>Melting point</b>	-97 °C, -142.9 °F (176 K)
<b>Boiling point</b>	64.7 °C, 148.4 °F (337.8 K)
<b>Solubility in water</b>	miscible



## 2.4 Hukum Pencampuran [36]

Pada umumnya, sifat material komposit dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, antara lain:

### 1. Material penyusun

Dalam penelitian ini, digunakan material polimer sebagai matriks karena memiliki sifat mekanis yang baik dan harganya relatif murah. Namun, polimer memiliki kendala pada sifat isolatornya, sehingga diperlukan penambahan material lain yang bersifat konduktif, yang juga berfungsi sebagai material penguat, seperti grafit dan *carbon black*.

### 2. Jumlah material yang digunakan

Jumlah dari material penyusun akan mempengaruhi sifat yang dihasilkan dari komposit. Komposisi antara matriks dan penguat sebaiknya seimbang, karena jika jumlah material penguat lebih banyak dari matriks, maka sifat yang dihasilkan tidak mencapai nilai optimum. Pengaruh jumlah material terhadap sifat komposit, seperti modulus elastisitas dan densitas, dapat diprediksi dengan menggunakan *rule of mixture*.

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

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

dimana, E = Modulus Elastisitas (komposit (c), penguat (f), matriks (m)) [Pa]

V = Fraksi volume (komposit (c), penguat (f), matriks (m)) [%]

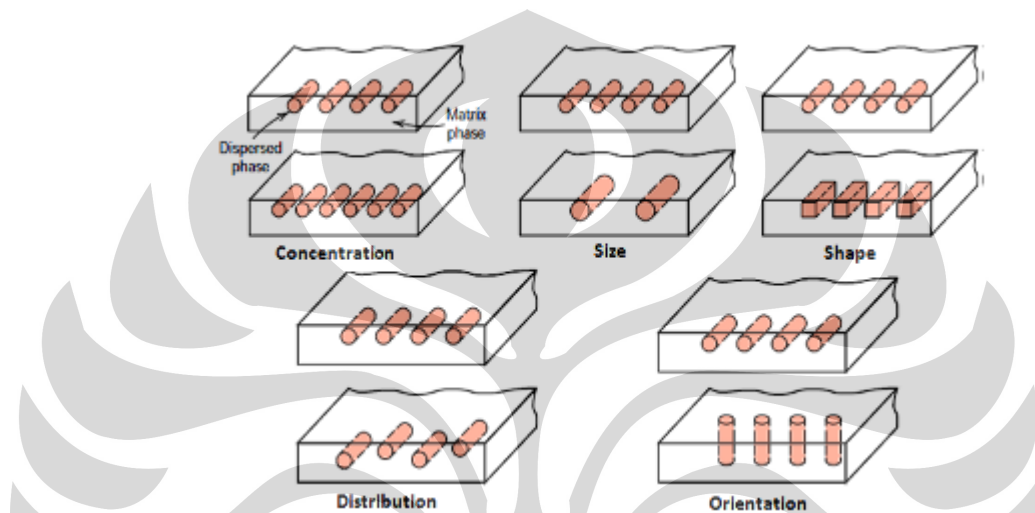
$\rho$  = Densitas (komposit (c), penguat (f), matriks (m)) [gr/cm<sup>3</sup>]

### 3. Bentuk fasa yang terdispersi

Fasa yang terdispersi dalam matrik juga mempengaruhi sifat komposit, baik dari distribusi, konsentrasi, orientasi, ukuran maupun bentuk dari fasa, seperti yang terlihat pada Gambar 2.18.

- Fasa yang terdistribusi secara acak akan memiliki sifat yang lebih baik.
- Semakin banyak fasa yang terdispersi dalam matriks, maka akan menghasilkan sifat mekanis yang lebih baik

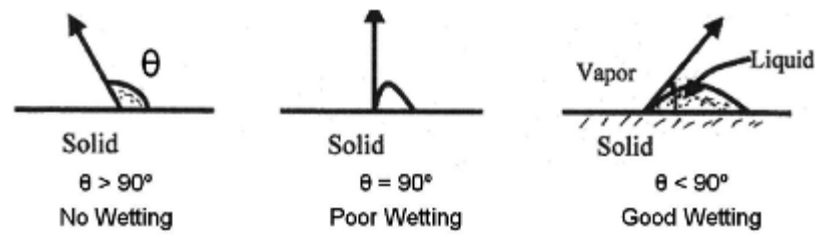
- Pada sistem komposit, penguat dengan orientasi yang searah dengan pembebanan akan mampu memberikan sifat mekanis yang lebih baik terhadap pembebanan tersebut.
- Fasa yang memiliki bentuk silinder lebih baik karena tidak mempunyai tegangan sisa, sehingga lebih tahan terhadap pembebanan.
- Ukuran fasa yang kecil lebih baik karena mampu menahan dan mentransfer beban.



**Gambar 2.18.** Parameter dari Fasa Terdispersi [37]  
(telah diolah kembali)

#### 4. Daya Pembasahan

Daya pembasahan merupakan kemampuan matriks untuk membasahi seluruh permukaan grafit agar terjadi kekuatan ikatan yang baik dan mereduksi jumlah porositas. Kemampubasahan matriks terhadap penguat dapat dilihat melalui sudut kontak (*contact angle*) antara matriks dan penguat. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19, apabila sudut kontak yang terbentuk di bawah  $90^\circ$ , maka kemampubasahan dari matriks baik, sedangkan bila sudut kontak lebih dari  $90^\circ$ , maka pembasahan tidak akan terjadi, sehingga diperlukan agen pembasahan (*wetting agent*) untuk meningkatkan daya pembasahan dari matriks.

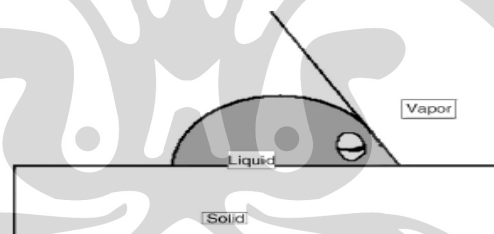


**Gambar 2.19.** Daya Pembasahan Berdasar Sudut Kontak [36]

Pembasahan yang baik memerlukan energi permukaan (*surface energy*) pada *reinforcement* yang lebih besar dari energi permukaan matriks, dimana dapat ditentukan dengan persamaan *work of adhesion* ( $W_A$ ), yaitu energi yang dibutuhkan untuk memisahkan dua material, dan didefinisikan sebagai energi permukaan. Gambar 2.20 memperlihatkan ilustrasi dari pembasahan yang baik, yang menunjukkan energi permukaan pada *reinforcement* yang lebih besar dari energi permukaan matriks.

$$W_A = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \quad (2.3)$$

dimana,  $\gamma$  = energi bebas permukaan (*surface free energy*)

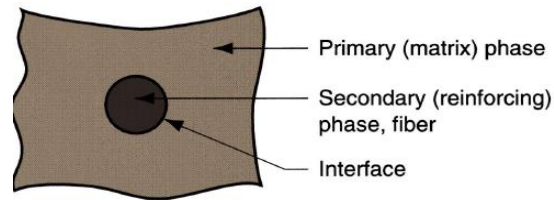


**Gambar 2.20.** Keseimbangan Tiga Tegangan Permukaan pada Kondisi Pembasahan dengan Tetes Cairan pada Permukaan Padat Komposit [38]

##### 5. Ikatan antarmuka dan antarfasa

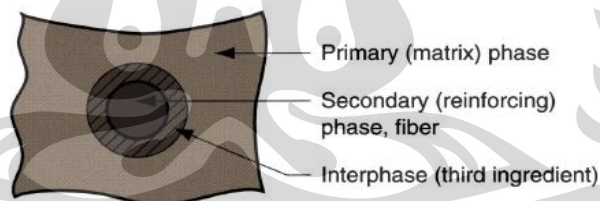
Ikatan antara penguat dan matriks memiliki peranan yang besar dalam penentuan sifat komposit. Hal tersebut berkaitan dengan fenomena ikatan antarmuka dan antarfasa. Ikatan antarmuka adalah ikatan yang terbentuk antara dua fasa yang berbeda. Ikatan antarmuka berfungsi sebagai media transfer beban dari matriks dan penguat. Semakin luas bidang sentuh antar permukaan, maka semakin besar efek yang dihasilkan dari ikatan tersebut, sehingga dapat meningkatkan sifat ikatan dari material komposit yang diinginkan. Ikatan antarmuka ini mempengaruhi kekuatan, kekakuan,

ketahanan mulur, dan degradasi akibat lingkungan pada material komposit. Gambar 2.21 menunjukkan ilustrasi ikatan antarmuka yang terjadi antara matriks dan penguat dalam sistem komposit.



Gambar 2.21. Ikatan Antarmuka [36]

Ikatan antarfasa adalah sebuah fenomena dimana terbentuk sebuah lapisan fasa ketiga dalam suatu ikatan antarmuka, seperti yang terlihat pada Gambar 2.22. Ikatan antarfasa dapat terbentuk apabila ikatan antarmuka dari konstituen penyusun sangat baik dan mampu berdifusi, sehingga akan menciptakan daerah baru, yang biasa disebut fasa ketiga. Untuk mendapatkan ikatan antarfasa dari dua material yang berbeda, maka dapat dilakukan dengan menambahkan suatu aditif. Fasa ketiga yang terbentuk akan memiliki sifat gabungan dari kedua fasa pembentuknya, sehingga sangat berpengaruh terhadap sifat komposit yang terbentuk.



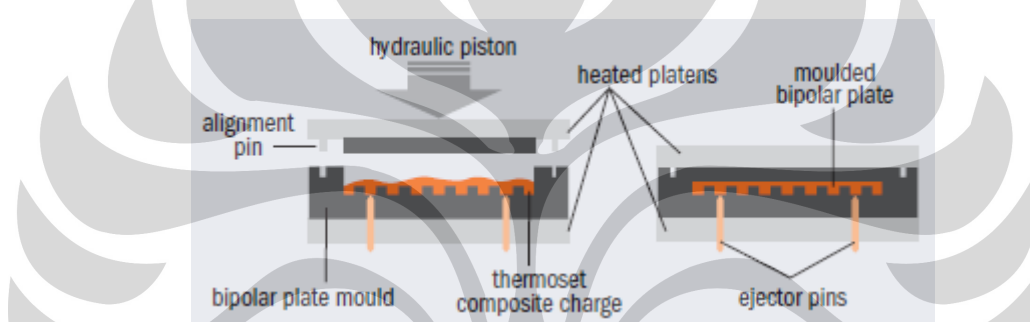
Gambar 2.22. Ikatan Antarfasa [36]

## 2.5 Metode Fabrikasi: *Compression Moulding (Hot Pressing)*

Mengenai proses pembuatan pelat, metoda yang relatif sukses dan biasa digunakan untuk produksi massal dari komposit polimer pelat bipolar adalah dengan metoda *compression moulding*. Kebanyakan dari proses *compression moulding* yang digunakan dalam literatur [14] dimulai dengan senyawa serbuk atau campuran yang dipreparasi dengan *kneader* atau *extruder* pada temperatur yang sesuai dari resin polimer dan partikel pengisi konduktif. Campuran serbuk tersebut kemudian dimasukkan ke dalam cetakan yang dipanaskan, dimana

campuran tersebut dapat mengalir, mengisi lubang-lubang cetakan, kemudian dicetak dengan tekanan langsung pada pelat bipolar. Apabila material polimernya adalah resin termoset, konversi kimia dari resin harus terjadi sebelum pelat dipindahkan dari cetakan, dengan kata lain harus diperhatikan waktu pencetakannya [14].

Salah satu keuntungan dengan penggunaan proses *compression* tersebut adalah bahwa campuran serbuk tidak perlu untuk dibuat menjadi sangat cair. Hal tersebut membolehkan pengisian bahan pengisi berbasis karbon menjadi lebih tinggi dalam komposit, sehingga konduktivitas listrik yang memadai dapat tercapai [14]. Gambar 2.23 menunjukkan skematisasi proses pembuatan pelat bipolar dengan metode *compression moulding*.



**Gambar 2.23.** Ilustrasi Pembuatan Pelat Bipolar dengan Metode *Compression Moulding* [39]

Berbagai material polimer termoplastik dan resin termoset yang diperkuat dengan berbagai bahan pengisi konduktif karbon telah digunakan dalam pembuatan pelat bipolar komposit dengan menggunakan proses *compression moulding*. Tinjauan singkat mengenai pembuatan pelat bipolar komposit yang dikembangkan dengan menggunakan metode *compression moulding* diterangkan sebagai berikut:

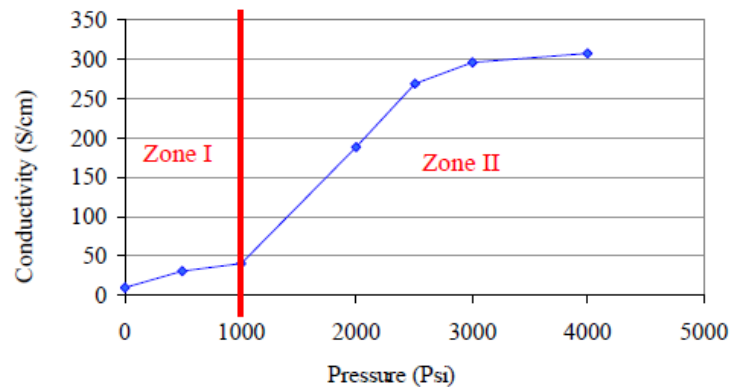
1. Biraj Kumar Kakati et al., yang mengembangkan pelat bipolar komposit berbahan resin epoksi/5%CB/CF/NG dengan metode *compression moulding* pada tekanan  $\sim 100 \text{ kg/cm}^2$  dan menghasilkan pelat dengan karakteristik: nilai konduktivitas listrik mencapai  $\sim 60 \text{ S/cm}$ , kekuatan fleksural  $\sim 36 \text{ MPa}$ , dan densitas  $\sim 1,79 \text{ g.cm}^{-3}$  [11].
2. Ling Du mengembangkan pelat bipolar komposit *expanded graphite/5% CB/resin epoksi* dengan metode *compression moulding* dengan

menggunakan tekanan 4000 psi dan temperatur 180 °C, menghasilkan nilai konduktivitas listrik sebesar 79 S/cm [14].

3. H. S. Lee et al. mengembangkan pelat bipolar komposit berbasis resin epoksi/grafit/*carbon fabric* dengan *compression moulding*. Nilai konduktivitas listrik tertinggi mencapai 11 S/cm dengan komposisi grafit mencapai 90 vol.% pada tekanan dan temperatur proses mencapai 10 MPa dan 120 °C, sedangkan nilai kekuatan fleksuralnya mencapai 56,89 MPa [24].
4. B. K. Kakati et al. mengembangkan pelat bipolar komposit berbasis resin fenol formaldehida/grafit dengan *compression moulding*, yang menghasilkan komposit dengan nilai konduktivitas listrik mencapai ~245 S/cm dengan komposisi grafit mencapai 80 vol.% [40].
5. T. Derieth et al. mengembangkan pelat bipolar komposit berbasis PP/grafit dengan metode *compression moulding*, yang menghasilkan komposit dengan nilai konduktivitas listrik tertinggi mencapai 96,9 S/cm [41].

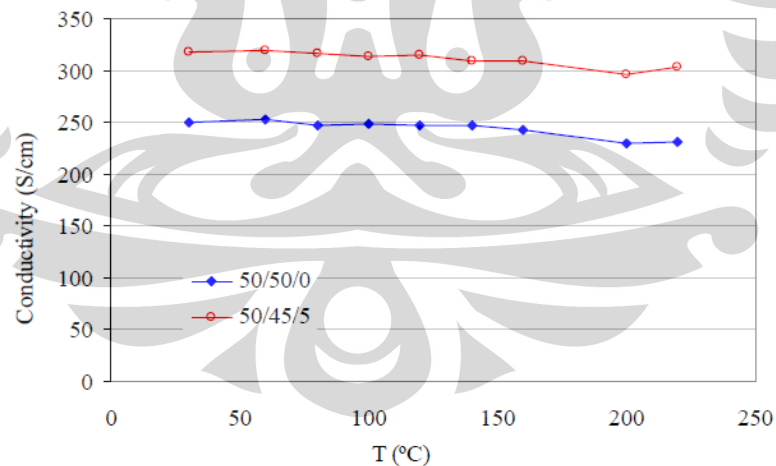
Keterangan tersebut di atas menunjukkan bahwa metode *compression moulding* merupakan salah satu metode yang efektif untuk menghasilkan pelat bipolar komposit dengan karakteristik sesuai dengan yang diinginkan.

Temperatur *curing*, tekanan, dan waktu perlu dioptimalkan karena kondisi *curing* tersebut berpengaruh terhadap sifat dari pelat bipolar komposit (komposit epoksi) yang dihasilkan [14]. Tekanan secara signifikan berpengaruh terhadap konduktivitas listrik dan sifat mekanis dari komposit. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.24, semakin tinggi tekanan yang digunakan, maka porositas dari komposit akan berkurang, densitas akan meningkat, serta menghasilkan nilai konduktivitas listrik dan sifat mekanis yang semakin meningkat [14,24]. Hal tersebut terjadi karena jarak antar partikel yang semakin kecil dari sistem komposit [24].



**Gambar 2.24.** Pengaruh Penambahan Tekanan pada Proses *Compression Moulding* terhadap Nilai Konduktivitas Listrik. Zona I Bermakna Material yang Mengalami Proses *Curing* masih dalam Bentuk Serbuk, sedangkan Zona II telah Menghasilkan Bentuk yang Terkonsolidasi [14]

Mengenai temperatur *curing*, pada beberapa penelitian temperatur yang digunakan berkisar antara 60 – 140 °C [14,16]. Temperatur yang digunakan, sesuai dengan jenis polimer atau resin yang digunakan untuk terjadinya *curing*. Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.25, peningkatan temperatur *curing* tidak berpengaruh secara signifikan pada nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar, namun peningkatan temperatur akan menghasilkan proses *curing* yang semakin cepat dan material akan menjadi semakin rapuh [14].

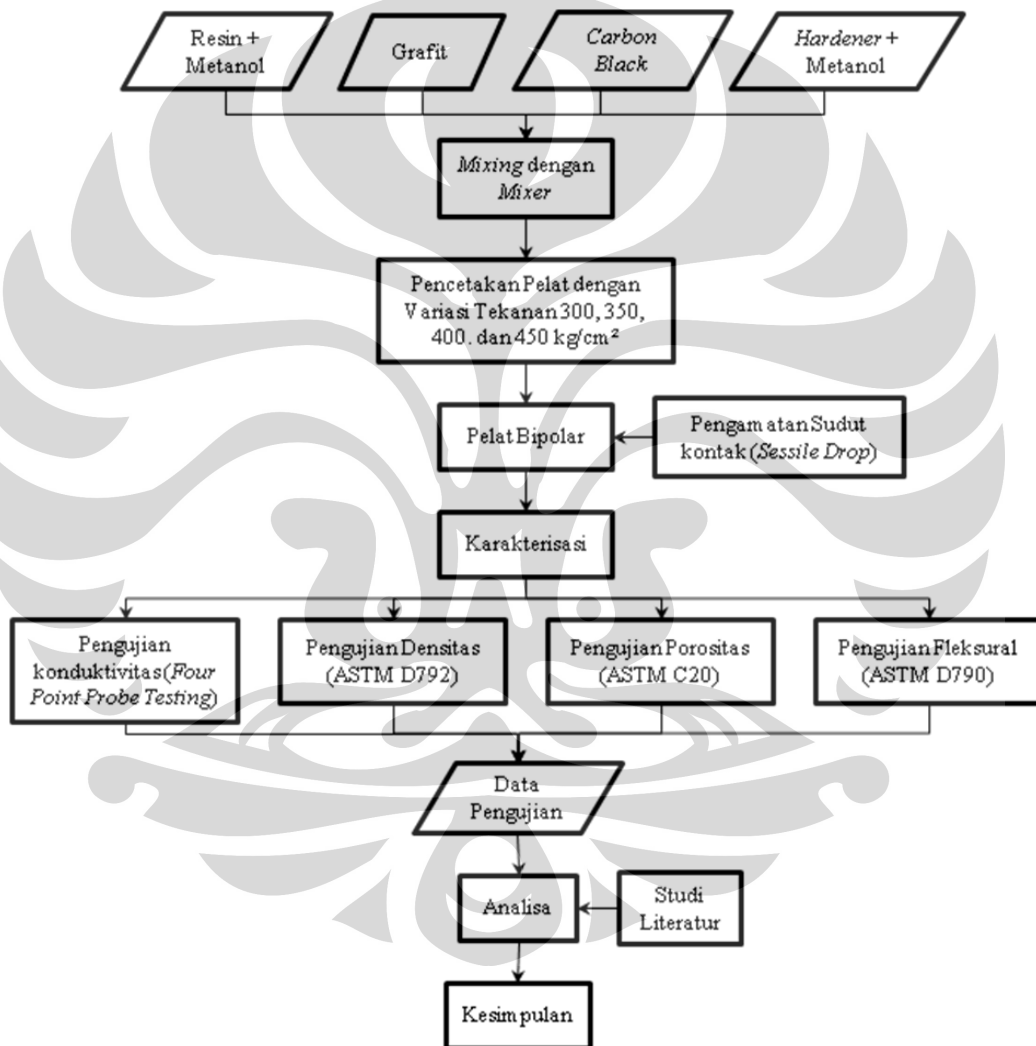


**Gambar 2.25.** Nilai Konduktivitas Listrik dari Komposit Epoksi terhadap Fungsi dari Waktu [14]

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.1 berikut ini menunjukkan diagram alir penelitian, dimulai dari proses pembuatan sampai karakterisasi pelat bipolar dengan variabel penambahan tekanan pada proses *compression moulding*.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian



## 3.2 Peralatan dan Bahan

### 3.2.1 Peralatan

Peralatan pada penelitian ini dibagi menjadi tiga jenis, yakni peralatan dalam preparasi bahan, pembuatan, serta karakterisasi pelat bipolar. Tabel 3.1 menunjukkan peralatan-peralatan yang digunakan, baik pada saat preparasi bahan, pembuatan, maupun karakterisasi pelat bipolar yang dihasilkan.

**Tabel 3.1. Peralatan-peralatan yang Digunakan dalam Penelitian**

<b>Preparasi Bahan</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Planetary ball mill &amp; disc mill</i></li> <li>2. Mesin pengguncang (ayakan)</li> <li>3. Oven (kapasitas temperatur <math>\pm 600</math> °C)</li> <li>4. Mortar</li> </ol>
<b>Pembuatan Pelat Bipolar</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Timbangan digital</li> <li>2. <i>Beaker glass</i> ukuran 100 dan 1000 mL</li> <li>3. Gelas ukur ukuran 35 mL</li> <li>4. <i>Mixer</i></li> <li>5. <i>Hot plate</i></li> <li>6. Cetakan super dupleks ukuran 15x15 cm<sup>2</sup></li> <li>7. Mesin <i>compression moulding</i></li> </ol>
<b>Karakterisasi Pelat Bipolar</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Penggaris</li> <li>2. Gergaji</li> <li>3. Amplas grid 120#, 500#, dan 1000#</li> <li>4. Jangka sorong</li> <li>5. Timbangan digital</li> <li>6. Oven (kapasitas temperatur <math>\pm 1500</math> °C)</li> <li>7. <i>Hot plate</i></li> <li>8. <i>Beaker glass</i> ukuran 1000 mL</li> <li>9. Termometer</li> <li>10. Peralatan pengujian densitas dan porositas</li> <li>11. Kain katun</li> <li>12. <i>Conductivity four point probe test machine</i></li> <li>13. <i>Universal Testing Machine</i></li> </ol>

### 3.2.2 Bahan

Pada penelitian ini, pelat bipolar dihasilkan dari material komposit, dimana resin epoksi yang merupakan salah satu jenis termoset berfungsi sebagai matriks. Selain itu, digunakan bahan pengisi konduktif, seperti grafit dan *carbon black*. Dikarenakan resin dan *hardener* yang digunakan masih memiliki kekentalan yang tinggi, maka diperlukan suatu pelarut organik untuk mengencerkan bahan-bahan tersebut agar nantinya dapat bercampur dengan baik dengan bahan-bahan pengisi konduktif ketika proses pencampuran. Pelarut yang digunakan pada penelitian ini adalah metanol. Berat total dari bahan-bahan yang digunakan berjumlah 180 gram.

#### 3.2.2.1 Resin Epoksi

Pada penelitian ini digunakan resin epoksi (*Bhispenol A-epichlorohydrin*) dan *hardener* epoksi (*Polyaminoamide*) dengan merek dagang Eposchön, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Resin epoksi sebagai matriks dari sistem komposit berfungsi untuk mengikat bahan-bahan pengisi konduktif, seperti grafit dan *carbon black*. Pada penelitian ini digunakan resin dan *hardener* dengan rasio berat 1:1. Secara keseluruhan resin epoksi yang digunakan adalah 20% dari total berat bahan-bahan yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar. Perhitungan jumlah resin dan *hardener* yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.2 dan spesifikasi dari resin dan *hardener* dapat dilihat pada lampiran 7 dan 8.



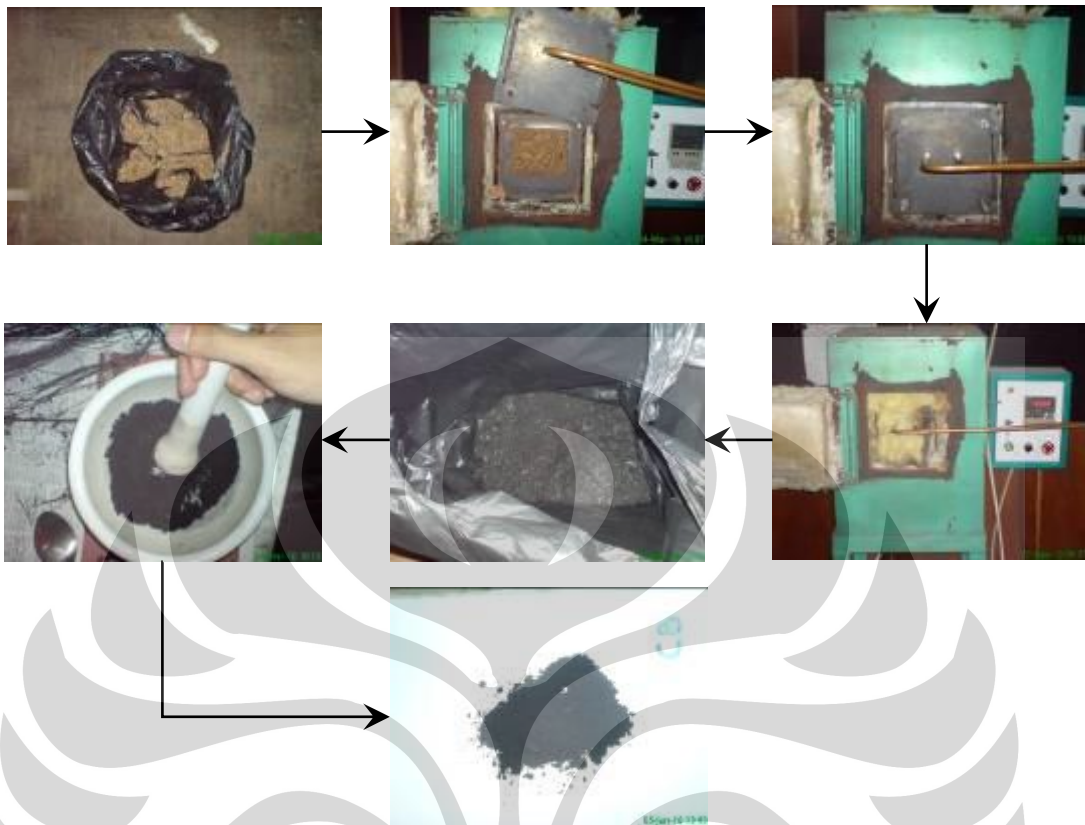
Gambar 3.2. Resin dan *Hardener* Epoksi

### 3.2.2.2 Grafit

Pada penelitian ini digunakan grafit yang berasal dari elektroda limbah industri peleburan baja (elektroda busur listrik (*electric arc furnace*)). Ukuran partikel dari grafit yang digunakan setelah penghalusan dan pengayakan adalah kurang dari 325 mesh (kurang dari 44 $\mu$ m). Berat grafit yang digunakan adalah 95% dari keseluruhan 80% total berat bahan pengisi konduktif yang digunakan. Perhitungan jumlah grafit yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.2 dan spesifikasi dari grafit dapat dilihat pada lampiran 9.

### 3.2.2.3 Carbon Black

Pada penelitian ini *carbon black* yang dipakai dihasilkan dari karbonisasi serat alami (serabut kelapa) pada temperatur  $\pm 600$  °C selama  $\pm 10$  jam. Setelah proses pembuatan, kemudian *carbon black* yang dihasilkan dihaluskan sampai membentuk serbuk dengan ukuran partikel kurang dari 325 mesh (kurang dari 44 $\mu$ m). Ilustrasi skematis pembuatan *carbon black* yang digunakan pada penelitian ini, dapat dilihat pada Gambar 3.3. Diharapkan dengan luas permukaan yang tinggi (ukuran partikel yang kecil), maka akan mampu membentuk jaringan karbon konduktif dengan grafit. Berat *carbon black* yang digunakan adalah 5% dari keseluruhan 80% total berat bahan pengisi konduktif yang digunakan. Perhitungan jumlah grafit yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.2.



Gambar 3.3. Ilustrasi Skematis pada Pembuatan *Carbon Black*

#### 3.2.2.4 Metanol

Penggunaan metanol pada penelitian ini berfungsi sebagai pengencer resin dan *hardener* epoksi, sebelum dicampurkan dengan bahan-bahan pengisi konduktif. Pada penelitian ini digunakan metanol teknis dengan merek dagang BE Reagen. Pada saat pengenceran, ditambahkan metanol sebanyak 35 mL pada masing-masing resin dan *hardener*. Spesifikasi dari metanol dapat dilihat lampiran 10.

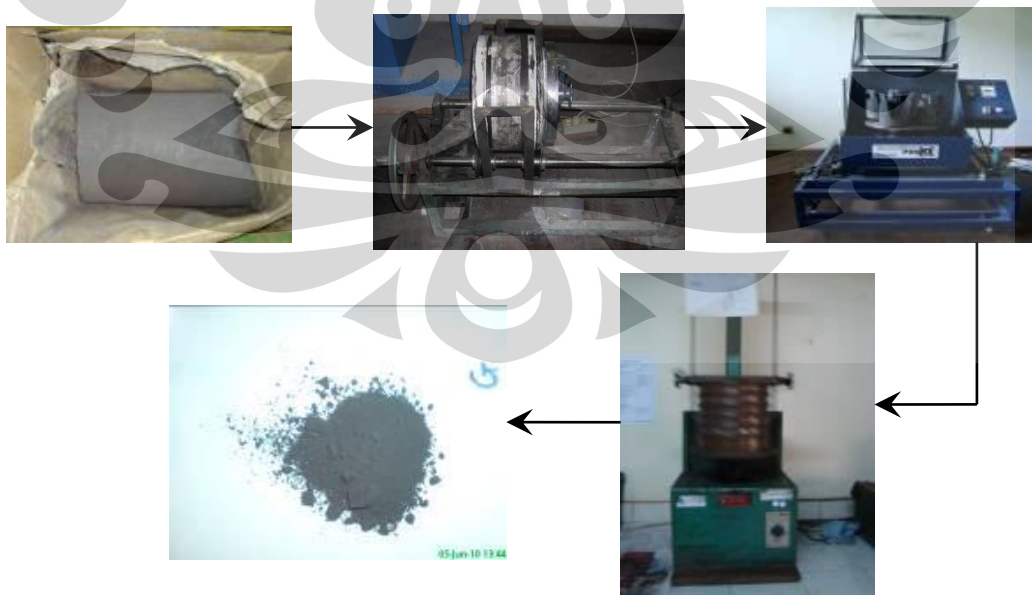
### 3.3 Prosedur Penelitian

Karakteristik yang akan dihasilkan dari suatu pelat bipolar tergantung pada keseluruhan proses pembuatannya. Oleh karena itu, diperlukan beberapa langkah yang dimulai dari proses preparasi bahan-bahan hingga proses karakterisasi dari pelat bipolar yang dihasilkan.

### 3.3.1 Preparasi Bahan

#### 3.3.1.1 Proses Penghalusan Grafit

Grafit yang berasal dari elektroda limbah EAF (*Electric Arc Furnace*) dihancurkan terlebih dahulu melalui proses *milling* dengan menggunakan mesin *disc mill* dan *planetary ball mill* dalam keadaan kering. Pada mesin *disc mill* digunakan toples (*jar*) dan bola penghancur berbahan dasar alumina. Melalui proses ini, bongkahan limbah grafit dapat dihaluskan menjadi partikel-partikel halus. Proses ini dilakukan selama 50 jam. Perbandingan antara jumlah grafit yang akan dihaluskan dengan berat bola alumina yang digunakan adalah 1:10. Pada mesin *planetary ball mill* digunakan bola baja yang telah dikeraskan dengan perbandingan antara jumlah grafit dengan berat bola adalah 1:8. Proses penghalusan pada mesin *planetary ball mill* berlangsung selama 50 jam dengan menggunakan kecepatan 20 Hz atau 180,95 rpm. Untuk mendapatkan partikel grafit dengan ukuran yang seragam, maka kemudian dilakukan pengayakan dengan menggunakan mesin pengguncang dan digunakan penyaring yang berukuran hingga 325 mesh, sehingga akhirnya akan didapatkan grafit dengan ukuran kurang dari 325 mesh (kurang dari 44  $\mu\text{m}$ ). Ilustrasi skematis penghalusan grafit EAF menjadi partikel grafit berukuran 325 mesh, ditunjukkan pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4.** Ilustrasi Skematis pada Penghalusan Grafit EAF

### 3.3.2 Proses Pencampuran Bahan-bahan Penyusun Komposit

#### 3.3.2.1 Komposisi Bahan-bahan Penyusun Komposit

Pada penelitian ini dibuat pelat bipolar dengan berat total bahan-bahan yang digunakan adalah 180 gram pada masing-masing pelat. Keterangan komposisi dari masing-masing bahan yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar ditunjukkan pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2. Komposisi dari Pelat Bipolar

<i>Reinforcement (80%)</i>		<i>Matriks (20%)</i>	<i>Tekanan</i>	<i>Temperatur [°C]</i>
<i>Grafit (95%)</i>	<i>Carbon Black (5%)</i>	<i>Resin Epoksi</i>	<i>kg/cm<sup>2</sup></i>	
136,8 gr	7,2 gr	36 gr	300	70
136,8 gr	7,2 gr	36 gr	350	70
136,8 gr	7,2 gr	36 gr	400	70
136,8 gr	7,2 gr	36 gr	450	70

Penelitian ini difokuskan untuk melihat pengaruh penambahan tekanan pada proses *compression moulding*, sehingga tidak ada perubahan pada komposisi bahan-bahan penyusun komposit dari setiap pelat bipolar yang dibuat. Rasio berat dari matriks dan bahan pengisi sama seperti penelitian sebelumnya [8,9], yakni 80:20, dengan penambahan *carbon black* optimum untuk beberapa karakteristik pelat bipolar sebesar 5% [9].

#### 3.3.2.2 Proses Pencampuran

Seluruh material yang akan digunakan pada proses pembuatan pelat bipolar terlebih dahulu ditimbang sesuai dengan komposisi pada Tabel 3.2. Setelah proses penimbangan, dilanjutkan dengan pencampuran bahan-bahan tersebut. Adapun tahap-tahap yang dilakukan adalah:

1. Resin dan *hardener* epoksi diencerkan masing-masing dengan metanol sebanyak 35 mL pada *beaker glass* berukuran 100 mL.
2. Grafit dan *carbon black* yang telah ditimbang, dicampurkan dan diaduk secara merata dengan *mixer* selama  $\pm 3$  menit, hingga kira-kira tercampur secara homogen dalam *beaker glass* berukuran 1000 mL.

3. Resin yang telah diencerkan, kemudian dimasukkan ke dalam *beaker glass* yang berisi campuran grafit dan *carbon black*. Kemudian bahan-bahan tersebut diaduk kembali dengan menggunakan *mixer* selama  $\pm 5$  menit pada temperatur ruang.
4. *Hardener* yang telah diencerkan, dimasukkan ke dalam *beaker glass* yang berisi campuran grafit, *carbon black*, dan resin, kemudian diaduk selama  $\pm 5$  menit pada temperatur ruang.
5. Pengadukan kemudian dilanjutkan di atas *hot plate* pada temperatur  $\pm 70$  °C dan selama  $\pm 15$  menit, hingga bakalan kering dan membentuk pelet. Proses ini juga bertujuan untuk menguapkan metanol yang ada pada bakalan, sehingga dapat menghindari penguapan metanol yang terjadi pada saat pencetakan, dan pelat yang dihasilkan memiliki permukaan dan struktur yang tidak berpori. Gambar 3.5 merupakan hasil proses *mixing*, menghasilkan bakalan yang siap dicetak menjadi pelat bipolar.



**Gambar 3.5.** Hasil Pencampuran Bahan-bahan Penyusun Komposit

### 3.3.3 Proses Pencetakan

Bakalan yang telah siap, kemudian dimasukkan ke dalam cetakan berukuran  $15 \times 15$  cm<sup>2</sup>. Dalam proses ini, bakalan harus tersebar secara merata di dalam cetakan agar menghasilkan pelat dengan ketebalan yang seragam. Kemudian, cetakan diletakkan pada *hydraulic pressure machine* untuk dilakukan proses *compression moulding* pada temperatur 70 °C dengan tekanan yang divariasikan pada pembuatan masing-masing pelat sebesar 300, 350, 400, dan 450

kg/cm<sup>2</sup> selama 4 jam. Setelah proses pencetakan, dibutuhkan proses pendinginan selama 12 jam dengan tujuan untuk menghindari terjadinya perubahan dimensi dari pelat. Gambar 3.6 menunjukkan jenis dan bentuk cetakan yang digunakan pada penelitian ini, serta penempatan cetakan tersebut pada mesin tekan hidrolis pada saat dilakukan proses pencetakan pelat bipolar.



**Gambar 3.6.** Cetakan yang Digunakan (Kiri) dan Penempatan Cetakan pada Mesin *Hydraulic Pressure Machine* (Kanan)

### 3.3.4 Pembuatan Sampel Uji

Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.7 dan 3.8, sampel uji yang dibuat dari pelat bipolar yang dihasilkan dibagi menjadi tiga bagian, antara lain:

- a) Sampel untuk pengujian konduktivitas, dibuat dengan ukuran 2x2 cm<sup>2</sup> sebanyak 6 buah. Masing-masing sampel diampas permukaannya hingga rata agar arus yang ditembakkan pada permukaan sampel dapat ditangkap, sehingga bisa didapatkan nilai konduktivitas yang akurat.
- b) Sampel untuk pengujian densitas dan porositas, dibuat sampel dengan ukuran 2x2 cm<sup>2</sup> sebanyak 6 buah untuk masing-masing variabel.



**Gambar 3.7.** Sampel Uji Konduktivitas, Densitas, dan Porositas

- c) Sampel untuk pengujian kekuatan fleksural, dibuat dengan ukuran 12x1,3x 0,3 cm<sup>3</sup> sebanyak 5 buah. Masing-masing sampel diampas permukaannya



hingga rata agar menghilangkan retak mikro ataupun sumber konsentrasi tegangan (seperti bekas pemotongan) yang dapat menyebabkan inisiasi retak, sehingga akan dihasilkan nilai kekuatan fleksural yang lebih akurat.



**Gambar 3.8.** Sampel Uji Fleksural

### **3.3.5 Proses Karakterisasi Material Pelat Bipolar**

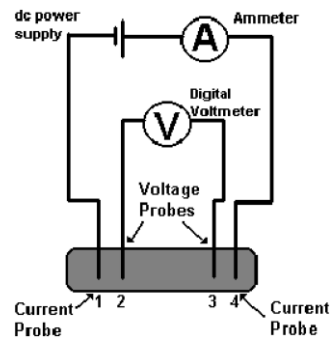
#### **3.3.5.1 Pengujian Konduktivitas**

Pengujian konduktivitas ini sangat penting untuk dilakukan mengingat fungsi utama dari pelat bipolar, yakni sebagai pengumpul dan pembawa elektron dari anoda ke katoda. Dari pengujian ini dapat diketahui sejauh mana pelat bipolar mampu menghantarkan arus listrik.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat digital *four point probe test* [31] (Veeco FPP 5000), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.9a. Prinsip kerja dari alat ini ditunjukkan pada Gambar 3.9b. Alat ini terdiri dari empat buah kawat. Arus akan mengalir melalui kawat no.1 dan 4. Apabila sampel memiliki ketahanan terhadap aliran dari arus listrik, maka akan terjadi penurunan tegangan karena arus mengalir sepanjang sampel. Penurunan tegangan ini terjadi pada kawat 2 dan 3 yang kemudian diukur dengan *voltmeter* digital.



(a)



(b)

**Gambar 3.9.** (a) Mesin Veeco FPP 5000 - *Four Point Probe Test* dan (b) Ilustrasi Skematis dari Mesin *Four Point Probe Test*

Adapun prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut:

1. Siapkan sampel dengan permukaan rata yang akan diuji
2. Nyalakan *voltmeter* dan ubah tipe mesin menjadi DC
3. Masukkan sampel ke dalam alat (sampel diletakkan tepat ditengah dimana 4 buah *probe* berada)
4. Pilih mode *slice* sesuai dengan bentuk sampel yang akan diuji
5. Masukkan data ketebalan dari sampel yang akan diuji
6. Tutup sampel dengan penutup alat
7. Nilai resistivitas (R) akan terlihat pada indikator alat

Dari hasil pengujian ini akan dihasilkan resistivitas listrik ( $\rho$ ), yang kemudian akan diubah menjadi nilai konduktivitas, seperti pada persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.1)$$

dimana,  $\sigma$  = nilai konduktivitas [S/cm]

$\rho$  = resistivitas [ $\Omega$ .cm]

### 3.3.5.2 Pengujian Densitas

Pengujian dilakukan dengan menggunakan prinsip Archimedes, dimana massa di udara akan berbeda dengan massa di dalam air akibat adanya gaya ke

atas dari sampel. Pengujian ini didasarkan pada prosedur standar pengujian ASTM D792 [31]. Adapun prosedur dari pengujian densitas secara bertahap adalah sebagai berikut:

1. Sampel ditimbang pada temperatur ruang dan diperoleh massa kering dari sampel
2. Kemudian sampel dicelupkan dalam *beaker glass* berisi air. Pencelupan ini harus dilakukan hingga seluruh permukaan sampel berada di tengah-tengah *beaker glass*, dan tidak boleh menyentuh dasar dan pinggir dari *beaker glass*, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10. Penimbangan Sampel di Air

Setelah diperoleh massa dari sampel, baik di udara maupun di dalam air, maka dapat dilakukan perhitungan rapat massa atau densitas dari sampel dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\rho = \frac{A}{A - B} \times \rho_{\text{air}} \quad (3.2)$$

Dimana,  $\rho$  = densitas sampel [ $\text{gr}/\text{cm}^3$ ]

A = massa sampel kering [gr]

B = massa sampel tergantung dalam air [gr]

$\rho_{\text{air}}$  = rapat massa air (tergantung pada temperatur air pada saat penimbangan) [ $\text{gr}/\text{cm}^3$ ]

### 3.3.5.3 Pengujian Porositas

Porositas merupakan rongga atau pori yang terbentuk akibat adanya udara yang terperangkap dalam pelat. Pori yang terbentuk akan mempengaruhi performa dari pelat bipolar yang dihasilkan. Pengujian dengan menggunakan prosedur standar pengujian ASTM C20 [31], dapat diketahui seberapa besar (dalam %) porositas yang ada pada pelat bipolar yang dihasilkan. Prinsipnya, pengujian ini dilakukan dengan melihat perbedaan berat dari sampel, baik dalam keadaan kering (setelah dipanaskan), maupun dalam keadaan jenuh (setelah direndam). Adapun tahap-tahap pengujian yang dilakukan, antara lain:

1. Sampel dikeringkan dengan cara dipanaskan dalam oven pada temperatur  $100^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam dengan tujuan untuk menghilangkan uap air, minyak, maupun cairan yang ada pada sampel.
2. Sampel yang telah dikeringkan kemudian ditimbang pada temperatur ruang, setelah itu dicatat berat sampel sebagai berat kering (D).
3. Sampel kemudian direbus dalam air yang dipanaskan pada temperatur  $100^{\circ}\text{C}$  di atas *hot plate* selama 1 jam, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.11. Hal ini dimaksudkan agar air masuk melalui pori-pori yang ada dalam sampel dan mengisi pori-pori tersebut. Sampel yang direbus tidak boleh menyentuh bagian dasar dari dinding *beaker glass*.



**Gambar 3.11.** Sampel Direbus pada  $T = 100^{\circ}\text{C}$

4. Kemudian sampel direndam dalam air dingin selama 12 jam
5. Sampel yang telah direndam selama 12 jam, kemudian ditimbang di dalam air, dan dicatat berat sampel sebagai berat-gantung (*suspended weight*) (S).

6. Pengujian dilanjutkan dengan menghilangkan air yang ada pada permukaan sampel dengan menggunakan kain katun dan sekali lagi dilakukan penimbangan pada temperatur ruang dan dicatat berat sampel sebagai berat jenuh ( $S_w$ ).

Setelah didapatkan berat sampel dengan berbagai perlakuan, maka dapat dilakukan perhitungan % porositas dari sampel yang akan mewakili sifat dari pelat bipolar. Perhitungan nilai porositas dapat dihitung dengan persamaan:

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

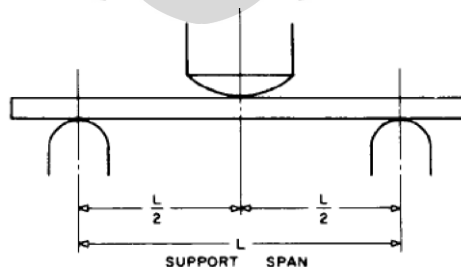
dimana,  $S_w = \text{Saturated Weight [gr]}$

$D = \text{Dry Weight [gr]}$

$S = \text{Suspended Weight [gr]}$

#### 3.3.5.4 Pengujian Fleksural

Pengujian fleksural bertujuan untuk mengetahui ketahanan dari pelat bipolar terhadap beban tekan. Pengujian ini sangat penting untuk dilakukan karena akan menentukan performa dari pelat bipolar ketika digunakan pada berbagai aplikasi, mengingat pelat bipolar banyak mendapatkan tekanan dari gas yang masuk maupun keluar dari sistem sel bahan bakar. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM D790 [31,42]. Pengujian dilakukan dengan metode *three point bending*, dimana beban akan diberikan pada bagian tengah sampel uji, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.12. Ukuran dari sampel uji adalah  $12 \times 1,3 \times 0,3 \text{ cm}^3$ .



Gambar 3.12. Skema Pengujian Fleksural [42]

Prinsip dari pengujian ini adalah sampel diletakkan di antara dua penahan, kemudian penekanan dilakukan ketika mesin bergerak ke atas, sehingga sampel uji mengalami pembebanan pada bagian tengah dari sampel tersebut dengan kecepatan pembebanan yang konstan hingga sampel patah. Pengujian ini menggunakan mesin Universal Testing Machine (UTM) T22K dengan menggunakan panjang penahan 65 mm, diameter *punch* 3,2 mm dan kecepatan pembebanan yang diberikan 1,5 mm/menit. Gambar 3.13 menunjukkan proses pengujian fleksural dengan menggunakan mesin UTM.



**Gambar 3.13.** Proses Pengujian Fleksural

Dari pengujian akan diperoleh beban maksimal ( $P$ ) yang mengindikasikan kemampuan maksimal sampel untuk dapat menahan beban hingga sampel patah, dan untuk mendapatkan nilai kekuatan fleksural dari sampel, maka digunakan persamaan berikut:

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

dimana,  $\sigma_f$  = tegangan / kekuatan lentur [MPa]

$P$  = beban maksimal [N]

$L$  = panjang specimen [mm]

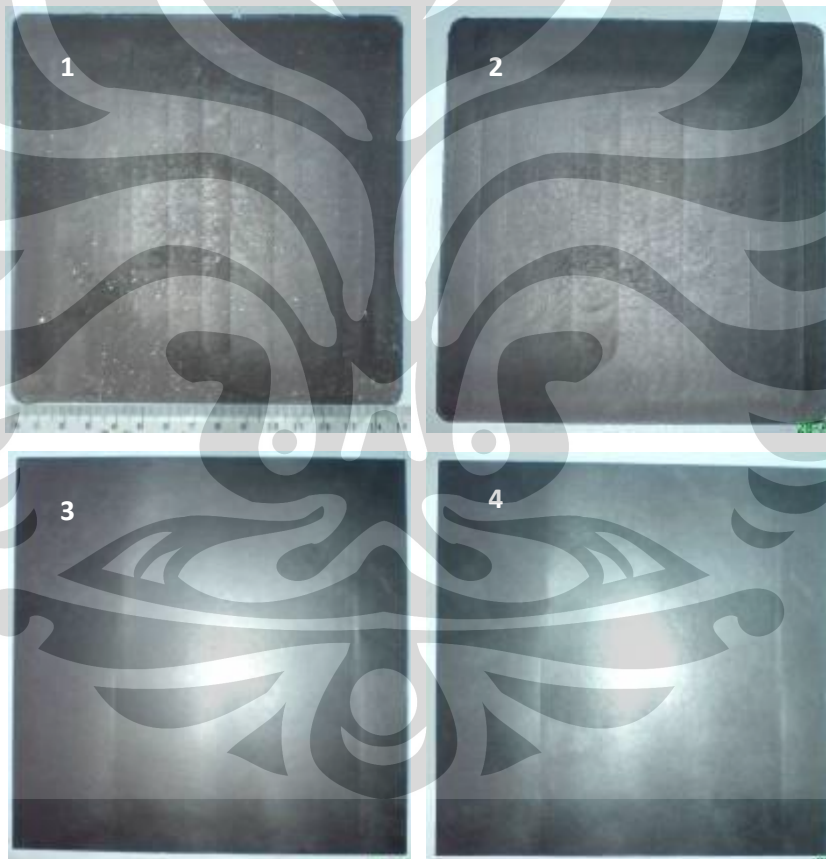
$b$  = lebar specimen [mm]

$d$  = tebal specimen [mm]

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pengamatan Visual Pelat Bipolar Hasil Pencetakan

Pada penelitian ini, dibuat pelat bipolar dengan variasi tekanan pada *compression moulding* sebesar 300, 350, 400, dan 450 kg/cm<sup>2</sup>, dan dengan variabel proses lain yang sama untuk masing-masing pelat, seperti temperatur dan waktu penekanan, yakni 70 °C dan 4 jam. Masing-masing pelat bipolar yang dihasilkan berukuran 15x15 cm<sup>2</sup>, dengan ketebalan pelat yang hampir sama dalam kisaran 0,3 – 0,4 cm.



**Gambar 4.1.** Pelat Bipolar yang Dihasilkan pada Tekanan: 1.) 300 kg/cm<sup>2</sup>, 2.) 350 kg/cm<sup>2</sup>, 3.) 400 kg/cm<sup>2</sup>, dan 4.) 450 kg/cm<sup>2</sup>

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.1, keempat pelat bipolar yang dihasilkan secara umum memiliki sifat fisik yang ringan, serta permukaan yang rata dan cukup halus. Selain itu, pelat juga memiliki kekerasan yang cukup baik

dan tidak rapuh, serta tidak terdapat pori-pori pada permukaan pelat, yang menandakan bahwa proses *curing* sedikit banyak telah terjadi dengan sempurna sampai ke permukaan pelat. Peningkatan tekanan *compression moulding* yang dilakukan pada penelitian ini tidak berpengaruh secara signifikan terhadap proses produksi, atau dengan kata lain, pelat yang dihasilkan tetap memiliki sifat fisik dan visual yang baik.

Semakin besar tekanan yang digunakan pada *compression moulding*, maka pelat yang dihasilkan semakin padat (*dense*) [14]. Hal tersebut dibuktikan pada saat pemotongan pelat menjadi beberapa sampel yang diperlukan, yakni semakin besar tekanan yang digunakan, maka proses pemotongan menjadi semakin sulit.

Hal lain yang perlu diperhatikan adalah ketebalan pelat yang dihasilkan. Ketebalan yang dihasilkan pada masing-masing pelat bervariasi, yaitu antara 0,3 – 0,4 cm. Hal tersebut terjadi karena kurang ratanya penempatan bakalan komposit hasil pencampuran (*mixing*) pada cetakan. Namun hal tersebut tidak berpengaruh secara signifikan pada karakteristik pelat yang dihasilkan jika dibandingkan satu sama lain, selama proses pencampuran berjalan dengan baik. Pengaruh yang mungkin ditimbulkan adalah ketidakseragaman karakteristik yang dihasilkan pada masing-masing pelat, sehingga nantinya pengambilan sampel akan menentukan baik tidaknya data pengujian yang didapatkan.

#### **4.2 Karakterisasi Pelat Bipolar Komposit**

Pada penelitian ini, pembuatan pelat bipolar komposit berbasis resin epoksi dilakukan pada temperatur 70 °C dibawah tekanan yang berbeda untuk masing-masing pelat yang dihasilkan dengan menggunakan mesin *compression moulding*. Seperti disebutkan pada bab 2 bahwa temperatur, tekanan, dan waktu proses harus dioptimalkan karena kondisi tersebut akan berpengaruh terhadap sifat dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan [14]. Khususnya pada penelitian ini dilakukan variasi penekanan pada saat *curing* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap pelat bipolar yang dihasilkan.

Secara umum, tekanan secara signifikan mempengaruhi nilai konduktivitas listrik dan sifat mekanik dari komposit dalam kaitannya dengan porositas. Semakin besar tekanan yang digunakan, maka akan berpengaruh terhadap



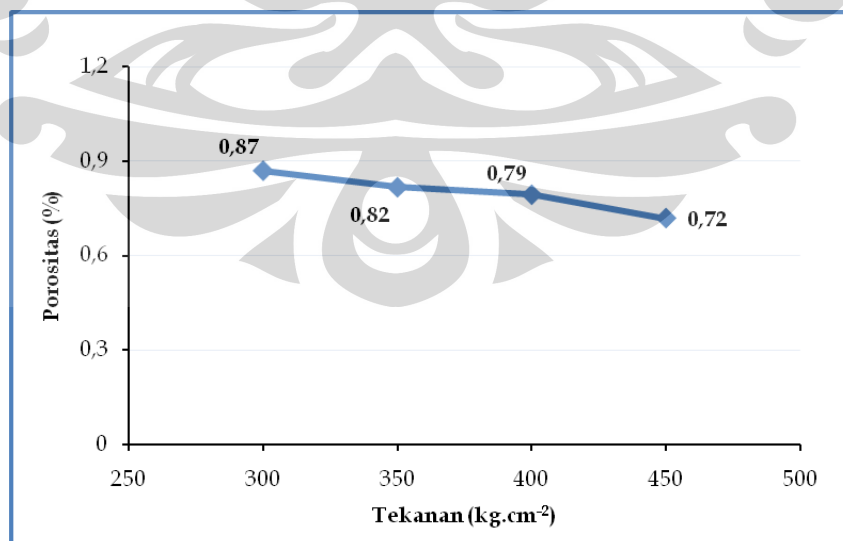
berkurangnya porositas dari komposit, sehingga akan menghasilkan nilai konduktivitas listrik yang semakin tinggi dan sifat mekanik yang semakin kuat [14].

#### 4.2.1 Pengujian Porositas

Pelat bipolar harus memiliki persentase porositas yang kecil, dengan tujuan agar tidak adanya gas lain yang masuk ke dalam sistem *fuel cell* (sifat impermeabilitas), yang kemudian dapat mengganggu performa dan kinerja dari sel tersebut. Nilai porositas dari pelat bipolar diharapkan sekecil mungkin, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan performa dari *fuel cell*. Tabel 4.1 menunjukkan hasil pengujian porositas yang dilakukan pada sampel yang dibuat dari masing-masing pelat yang dihasilkan.

Tabel 4.1. Hasil Pengujian Porositas

Tekanan ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Porositas (%)
300	0,87
350	0,82
400	0,79
450	0,72



Gambar 4.2. Pengaruh Peningkatan Tekanan terhadap Porositas

Pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.2, terlihat bahwa semakin tinggi tekanan yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar, akan menghasilkan penurunan pada porositas dari pelat bipolar yang dihasilkan. Hal tersebut sesuai dengan literatur [14], dimana peningkatan tekanan berpengaruh terhadap pengurangan jarak antar partikel grafit, atau dengan kata lain tingkat porositas dalam sistem komposit yang diakumulasikan dari porositas yang terbentuk baik dari jarak antar partikel bahan pengisi maupun porositas yang terkandung pada struktur bahan pengisi, akan menjadi semakin kecil. Penurunan tingkat porositas seiring dengan penambahan tekanan dari 300 – 450 kg/cm<sup>2</sup> berurutan sebesar 5,75%, 3,66%, dan 8,86%.

Penurunan tingkat porositas secara langsung akan berpengaruh terhadap sifat mekanis dan nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan [14]. Sebagai contoh, ketika tingkat porositas berkurang seiring dengan peningkatan tekanan, maka hal tersebut berpengaruh terhadap berkurangnya jarak antar agregat bahan pengisi, yang kemudian menghasilkan penurunan nilai resistivitas yang dihasilkan pada daerah antar agregat tersebut, sehingga kondisi tersebut berkontribusi dalam peningkatan nilai konduktivitasnya [14]. Hal lain yang terjadi adalah ketersediaan daerah/jalur konduktivitas elektron (*electron conductivity path*) yang semakin banyak [14,24], sehingga kondisi ini pun berpengaruh dalam peningkatan nilai konduktivitas listrik.

Mengenai pengaruhnya terhadap sifat mekanis, tingkat porositas yang semakin kecil akan menyediakan lebih banyak ikatan yang terjadi antara antarmuka bahan pengisi karbon dengan matriks resin epoksi, sehingga diperlukan gaya yang lebih besar untuk memisahkan ikatan tersebut, nilai *work of adhesion* yang dapat juga diindikasikan dengan kekuatan ikatan antara antarmuka bahan pengisi karbon dengan matriks resin epoksi [36], menjadi lebih besar, serta akan menghasilkan sifat mekanis dari pelat bipolar komposit yang semakin tinggi.

Porositas yang terdapat pada sistem komposit, selain yang ditimbulkan dari jarak antar partikel bahan pengisi dan struktur dari bahan pengisi sendiri yang berbentuk poros, kemungkinan disebabkan oleh penguapan zat pelarut yang masih ada bahkan setelah proses pencampuran dengan menggunakan panas. Zat pelarut tersebut menguap ketika dipanaskan selama proses *compression moulding*. Lebih

lanjut, ketika partikel bahan pengisi karbon tidak terbasahi sepenuhnya oleh resin epoksi, maka resin memungkinkan untuk membentuk lubang pada pelat bipolar komposit [31].

Jika dapat disimpulkan dari hasil pengujian tersebut pada sampel yang dibuat dari masing-masing pelat, maka tingkat porositas tertinggi dimiliki oleh sampel yang dihasilkan dengan menggunakan tekanan sebesar  $300 \text{ kg/cm}^2$ , dan yang terendah dimiliki oleh sampel yang dihasilkan dengan menggunakan tekanan sebesar  $450 \text{ kg/cm}^2$ , namun secara keseluruhan, tingkat porositas yang terkandung pada pelat bipolar komposit masih rendah, yakni kurang dari 1%.

Pada penelitian ini juga dilakukan perubahan dalam hal penggunaan bahan pengisi karbon dari penelitian sebelumnya [9]. Perubahan tersebut dilakukan pada *carbon black* dalam hal ukuran partikel. Pada penelitian sebelumnya [9], digunakan partikel *carbon black* dengan ukuran kurang dari  $105 \mu\text{m}$  (140 mesh), dengan komposisi dalam komposit (5%) dan tekanan ( $300 \text{ kg/cm}^2$ ) yang sama, memiliki tingkat porositas sebesar 0,77%. Namun, ketika ukuran partikelnya diperkecil menjadi kurang dari  $44 \mu\text{m}$  (325 mesh) seperti yang digunakan pada penelitian ini, maka terjadi peningkatan tingkat porositasnya menjadi 0,87%. Penurunan dari ukuran partikel akan menyebabkan terjadinya peningkatan kekosongan (*void*) pada komposit, sehingga tingkat porositas dari komposit pun akan meningkat [31]. Selain itu, akibat dari bertambahnya tingkat porositas dari komposit yang dihasilkan, maka akan menyebabkan nilai densitasnya berkurang. Penurunan nilai densitas terjadi dari 1,81 menjadi  $1,77 \text{ gr/cm}^3$ , atau terjadi penurunan sebesar 2,21%.

#### 4.2.2 Pengujian Densitas

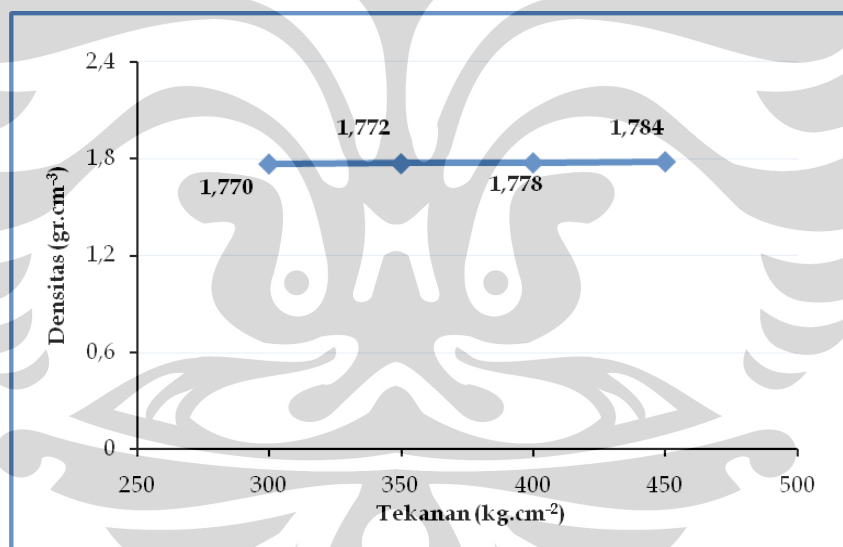
Seperti yang telah disebutkan pada bab 1, bahwa pelat bipolar berpengaruh terhadap 80% volume, 70% berat, dan 60% biaya dari *fuel cell* [5]. Hal ini berarti dengan mengurangi ukuran, berat, dan biaya pelat bipolar yang digunakan, maka kita dapat mengurangi biaya produksi dari PEMFC secara signifikan. Hasil penelitian ini diharapkan akan menghasilkan komposit yang memiliki konduktivitas yang tinggi, **ringan**, dan biaya rendah, serta memiliki optimalisasi

performa yang sangat baik, sehingga dapat mereduksi biaya produksi PEMFC secara keseluruhan.

Pelat bipolar dengan densitas yang rendah dapat meningkatkan efisiensi dari sel, sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi, khususnya *portable application*. Tabel 4.2 menunjukkan hasil pengujian densitas yang dilakukan pada sampel yang dibuat dari masing-masing pelat yang dihasilkan.

**Tabel 4.2.** Hasil Pengujian Densitas

Tekanan ( $\text{kg/cm}^2$ )	Densitas ( $\text{gr/cm}^3$ )
300	1,770
350	1,772
400	1,778
450	1,784



**Gambar 4.3.** Pengaruh Peningkatan Tekanan terhadap Densitas

Pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.3, terlihat bahwa semakin tinggi tekanan yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar, akan menghasilkan peningkatan pada densitas pelat bipolar yang dihasilkan. Hal tersebut sesuai dengan literatur [14,24], dimana peningkatan tekanan berpengaruh dalam menghasilkan komposit yang lebih padat (*dense*). Peningkatan densitas seiring dengan penambahan tekanan dari 300 – 450  $\text{kg/cm}^2$  berurutan sebesar 0,11%, 0,34%, dan 0,34%.

Pada penelitian ini terbukti bahwa dengan meningkatnya tekanan yang digunakan pada *compression moulding* akan meningkatkan nilai densitas dari pelat bipolar, karena peningkatan tersebut berbanding terbalik dengan berkurangnya porositas [14,31], meskipun peningkatan yang terjadi tidak terlalu signifikan. Peningkatan yang terjadi tidak terlalu signifikan, disebabkan oleh temperatur pada saat proses pencetakan pelat bipolar (70 °C) lebih kecil dibandingkan dengan Tg dari resin epoksi (lebih besar dari 135 °C) [6,43]. Tg sendiri merupakan temperatur transisi gelas (hanya dimiliki oleh material polimerik), yang mengindikasikan suatu respon rantai molekul polimer terhadap panas sebagai salah satu bentuk energi kinetik [26]. Ketika suatu proses berada pada temperatur dibawah temperatur Tg, maka polimer bersifat getas menyerupai perilaku gelas karena rantai-rantai molekulnya membeku [26]. Pada kondisi ini, molekul-molekul polimer tidak memiliki energi termal yang cukup untuk melakukan pergerakan (untuk saling bergeser-menggelincir dan berputar (*sliding-rotating*)), sehingga pergerakan termal dari molekul polimer sangat lambat dan tidak terjadi perubahan spesifik volume atau densitas yang signifikan [26].

Nilai densitas ini pun dapat diperkirakan melalui perhitungan pada persamaan 2.2 yang ditunjukkan pada bab II. Berdasarkan persamaan tersebut, dengan menggunakan densitas resin epoksi sebesar 1,17 gr/cm<sup>3</sup> [24] dan densitas bahan pengisi karbon sebesar 1,88 gr/cm<sup>3</sup> [31], nilai densitas komposit dapat diperkirakan sebesar ± 1,7 gr/cm<sup>3</sup>, sedangkan nilai densitas yang diperoleh dari hasil pengujian pada sampel dari masing-masing pelat bipolar komposit pada penelitian ini pun berkisar antara 1,7 – 1,8 gr/cm<sup>3</sup>.

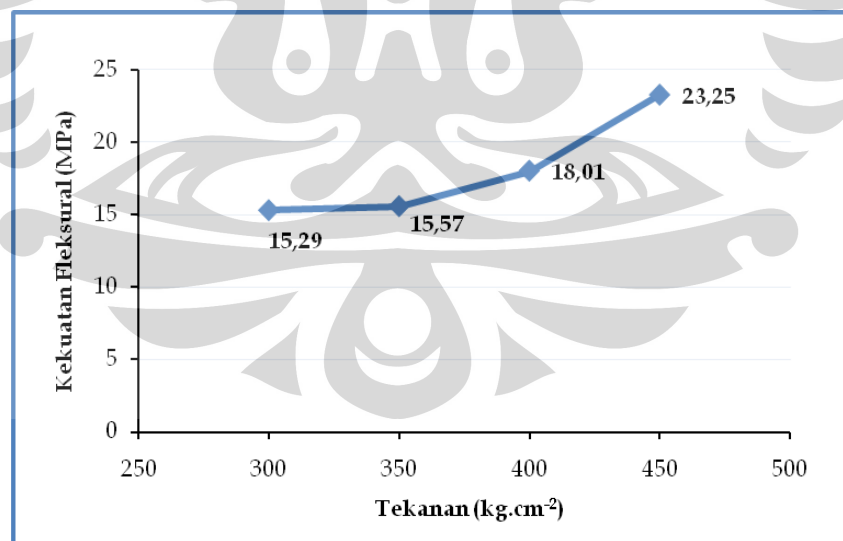
Jika dapat disimpulkan dari hasil pengujian tersebut pada sampel yang dibuat dari masing-masing pelat, maka nilai densitas tertinggi dimiliki oleh sampel yang dihasilkan dengan menggunakan tekanan sebesar 450 kg/cm<sup>2</sup>, dan yang terendah dimiliki oleh sampel yang dihasilkan dengan menggunakan tekanan sebesar 300 kg/cm<sup>2</sup>, dan secara keseluruhan, nilai densitas yang dimiliki oleh masing-masing pelat yang dihasilkan memenuhi standar berat untuk pelat bipolar, yakni kurang dari 5 gr/cm<sup>3</sup> [21].

### 4.2.3 Pengujian Fleksural

Persyaratan mengenai sifat mekanis yang baik mutlak diperlukan bagi setiap pelat bipolar yang dihasilkan. Sesuai dengan persyaratan yang ditunjukkan pada Tabel 2.3 [22], maka sebuah pelat bipolar harus memiliki kekuatan fleksural lebih besar dari 25 MPa. Kekuatan fleksural diperlukan agar pelat bipolar dapat menahan tekanan dari gas, baik yang masuk ataupun keluar dari sistem *fuel cell*, serta dapat menahan komponen lain, atau dengan kata lain memperkuat struktur *fuel cell stack* setelah dilakukan proses perakitan. Tabel 4.3 menunjukkan hasil pengujian fleksural yang dilakukan pada sampel yang dibuat dari masing-masing pelat yang dihasilkan.

**Tabel 4.3.** Hasil Pengujian Fleksural

Tekanan (kg/cm <sup>2</sup> )	Kekuatan Fleksural (MPa)
300	15,29
350	15,57
400	18,01
450	23,25



**Gambar 4.4.** Pengaruh Peningkatan Tekanan terhadap Kekuatan Fleksural

Pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.4, terlihat bahwa semakin tinggi tekanan yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar, akan menghasilkan peningkatan

pada nilai kekuatan fleksural pelat bipolar yang dihasilkan. Hal tersebut sesuai dengan literatur [14], dimana peningkatan tekanan akan menghasilkan sifat mekanis yang semakin kuat. Peningkatan kekuatan fleksural seiring dengan penambahan tekanan dari 300 – 450 kg/cm<sup>2</sup> berurutan sebesar 1,83%, 15,67%, dan 29,1%.

Ada beberapa hal yang berpengaruh terhadap kenaikan yang terjadi pada nilai kekuatan fleksural dari pelat bipolar komposit, antara lain mengenai pembasahan yang terjadi antara antarmuka bahan pengisi karbon dengan matriks resin epoksi. Ketika pembasahan yang terjadi baik, maka diperlukan gaya yang lebih besar untuk dapat memutuskan ikatan antara antarmuka bahan pengisi karbon dengan matriks resin epoksi [36]. Hal lain yang juga berhubungan adalah mengenai tingkat porositas yang terkandung dalam sistem komposit, yakni dengan meningkatnya tekanan, maka tingkat porositas dalam sistem komposit yang diakumulasikan dari porositas yang terbentuk baik dari jarak antar partikel bahan pengisi maupun porositas yang terkandung pada struktur bahan pengisi, akan menjadi semakin kecil [14]. Kondisi tingkat porositas yang semakin kecil akan menyediakan lebih banyak ikatan yang terjadi antara antarmuka bahan pengisi karbon dengan matriks resin epoksi.

Jika dapat disimpulkan dari hasil pengujian tersebut pada sampel yang dibuat dari masing-masing pelat, maka nilai kekuatan fleksural terbaik dimiliki oleh sampel yang dihasilkan dengan menggunakan tekanan sebesar 450 kg/cm<sup>2</sup>, dan yang terburuk terjadi pada sampel yang dihasilkan dengan menggunakan tekanan sebesar 300 kg/cm<sup>2</sup>. Namun secara keseluruhan, nilai kekuatan fleksural yang dimiliki oleh masing-masing pelat yang dihasilkan masih di bawah target yang ditetapkan oleh DOE [22].

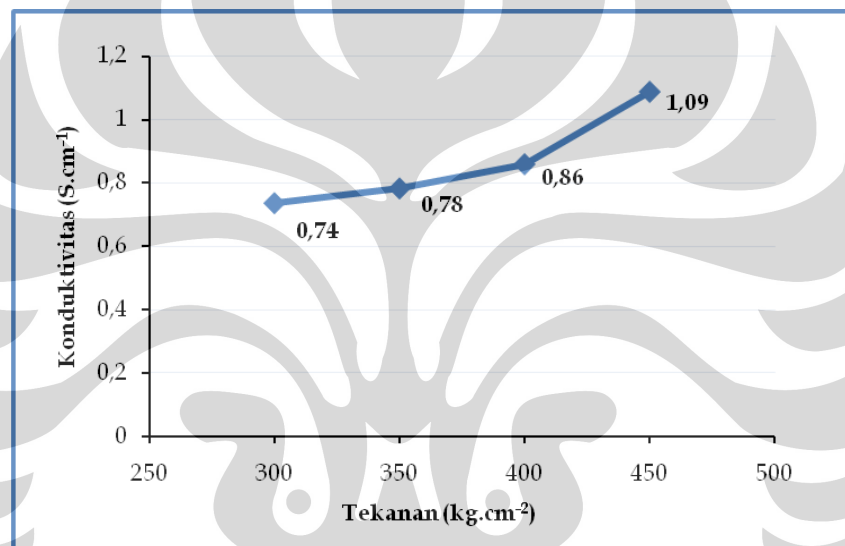
#### **4.2.4 Pengujian Konduktivitas**

Sesuai dengan persyaratan yang ditunjukkan pada Tabel 2.3 [22], maka sebuah pelat bipolar harus memiliki nilai konduktivitas listrik lebih besar dari 100 S/cm. Konduktivitas listrik yang tinggi diperlukan oleh pelat bipolar untuk menjalankan fungsinya dengan baik, antara lain untuk mengumpulkan dan membawa elektron menuju sirkuit, serta mengalirkannya dari anoda ke katoda

[10]. Tabel 4.4 menunjukkan hasil pengujian konduktivitas yang dilakukan pada sampel yang dibuat dari masing-masing pelat yang dihasilkan.

**Tabel 4.4.** Hasil Pengujian Konduktivitas

Tekanan ( $\text{kg/cm}^2$ )	Konduktivitas Listrik ( $\text{S/cm}$ )
300	0,74
350	0,78
400	0,86
450	1,09



**Gambar 4.5.** Pengaruh Peningkatan Tekanan terhadap Konduktivitas Listrik

Tekanan diharapkan secara signifikan mempengaruhi nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan [14]. Pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.5, terlihat bahwa semakin tinggi tekanan yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar, akan menghasilkan peningkatan pada nilai konduktivitas listrik pelat bipolar yang dihasilkan. Hal tersebut sesuai dengan literatur [14,24], dimana peningkatan tekanan akan menghasilkan nilai konduktivitas listrik yang semakin tinggi. Peningkatan konduktivitas listrik seiring dengan penambahan tekanan dari 300 – 450  $\text{kg/cm}^2$  berurutan sebesar 5,41%, 9,74%, dan 26,74%.

Peningkatan nilai konduktivitas listrik terjadi seiring dengan peningkatan tekanan, yang disebabkan karena berkurangnya jarak antar partikel grafit dan



meningkatnya densitas dari partikel grafit, sehingga menghasilkan ketersediaan daerah/jalur konduktivitas elektron (*electron conductivity path*) yang semakin banyak [14]. Peningkatan tekanan juga berpengaruh dalam menghasilkan komposit yang lebih padat (*dense*). Komposit yang lebih padat akan memberikan nilai konduktivitas listrik yang semakin tinggi [14]. Namun, data yang ditunjukkan pada lampiran 4 juga menunjukkan nilai konduktivitas listrik yang tidak seragam pada masing-masing sampel yang dibuat. Kemungkinan hal tersebut disebabkan oleh ketidakseragaman dispersi *carbon black* pada sistem komposit, sehingga ada pada satu bagian yang memiliki nilai konduktivitas listrik yang jauh lebih baik dari daerah yang lain [14]. Setelah ditelaah lebih jauh, ternyata dengan berkurangnya ukuran partikel, maka akan terjadi peningkatan pengumpulan (*aggregation*) dari partikel-partikel yang lebih kecil tersebut [31], sehingga dimungkinkan akan terjadi ketidakseragaman karakteristik yang dihasilkan dari keseluruhan bagian pelat bipolar yang dihasilkan.

Jika dapat disimpulkan dari hasil pengujian tersebut pada sampel yang dibuat dari masing-masing pelat, maka nilai konduktivitas listrik terbaik dimiliki oleh sampel yang dihasilkan dengan menggunakan tekanan sebesar  $450 \text{ kg/cm}^2$ , dan yang terburuk terjadi pada sampel yang dihasilkan dengan menggunakan tekanan sebesar  $300 \text{ kg/cm}^2$ . Namun secara keseluruhan, nilai konduktivitas listrik yang dimiliki oleh masing-masing pelat yang dihasilkan masih di bawah target yang ditetapkan oleh DOE [22].

Seperti yang banyak terjadi pada pembuatan komposit berbasis resin epoksi dengan menggunakan bahan pengisi grafit yang berbentuk partikel, bahwa pada partikel grafit memungkinkan untuk terlapisi oleh lapisan tipis dari resin epoksi, yang kemudian akan menghasilkan nilai konduktivitas listrik yang rendah dari komposit [14]. Berbeda halnya ketika digunakan bahan pengisi grafit yang memiliki struktur berlapis dan jaringan (*network*) seperti pada *expanded graphite* (EG). Pada grafit dengan struktur tersebut tahapan interkalasi dari resin epoksi pada struktur poros grafit dapat terjadi dengan lebih sempurna, sehingga akan menghasilkan nilai konduktivitas listrik yang lebih tinggi [14]. Hal tersebut dikarenakan grafit dengan struktur berlapis dan jaringan akan membentuk fraksi yang besar bagi daerah/jalur konduktivitas elektron, yang tidak terjadi pada grafit

dengan struktur partikel [14]. Selain itu, luas permukaan yang dimiliki oleh grafit dengan struktur partikel lebih kecil jika dibandingkan dengan grafit berstruktur lapisan dan jaringan. Hal tersebut dapat menjadi alasan mengapa nilai konduktivitas listrik yang dihasilkan pada masing-masing pelat bipolar masih dibawah target yang ditetapkan untuk pelat bipolar (Tabel 2.3 [22]).

Pada penelitian ini juga dilakukan perbaikan dalam hal penggunaan bahan pengisi karbon yang memiliki luas permukaan yang lebih besar. Perbaikan tersebut misalnya dilakukan pada *carbon black* dalam hal ukuran partikel. Perbaikan terjadi ketika membandingkan pelat bipolar yang dihasilkan pada penelitian ini dengan penelitian sebelumnya [9], yang menghasilkan peningkatan pada nilai konduktivitas listrik dari komposit yang dihasilkan. Seperti misalnya pada penelitian sebelumnya [9], digunakan partikel *carbon black* dengan ukuran kurang dari 105  $\mu\text{m}$  (140 mesh) dengan komposisi dalam komposit (5%) dan tekanan ( $300 \text{ kg/cm}^2$ ) yang sama, menghasilkan nilai konduktivitas listrik sebesar 0,26 S/cm, namun ketika ukuran partikelnya diperkecil menjadi kurang dari 44  $\mu\text{m}$  (325 mesh) seperti yang digunakan pada penelitian ini, maka akan menghasilkan peningkatan pada nilai konduktivitas listrik sebesar 184,62% atau menjadi 0,74 S/cm. Peningkatan luas permukaan *carbon black* memungkinkan untuk meminimalisasi jarak antar agregat (grafit dan *carbon black*), sehingga membentuk hubungan tambahan antar partikel grafit dan dapat mengurangi resistansi pada daerah antar agregat (Gambar 2.16 [14]).

#### **4.3 Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar dengan Kenaikan Tekanan pada *Compression Moulding***

Pada penelitian ini, material komposit dibuat berbasis resin epoksi dan ditambahkan bahan pengisi karbon seperti grafit EAF dan *carbon black*. Tabel 4.5 menunjukkan karakteristik akhir dari masing-masing pelat yang dihasilkan dengan memvariasikan tekanan yang berbeda untuk masing-masing pelat dengan metode *compression moulding*.

**Tabel 4.5.** Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar dengan Kenaikan Tekanan pada *Compression Moulding*

Tekanan [kg/cm <sup>2</sup> ]	Karakteristik Pelat Bipolar			
	Porositas [%]	Densitas [gr/cm <sup>3</sup> ]	Kekuatan Fleksural [MPa]	Konduktivitas Listrik [S/cm]
300	0,87	1,770	15,29	0,74
350	0,82	1,772	15,57	0,78
400	0,79	1,778	18,01	0,86
450	0,72	1,784	23,25	1,09

Keterangan pada Tabel 4.5 menunjukkan bahwa pelat bipolar komposit terbaik yang dihasilkan pada penelitian ini dimiliki oleh pelat bipolar yang dihasilkan dengan menggunakan tekanan sebesar 450 kg/cm<sup>2</sup>. Pelat bipolar ini memiliki spesifikasi berat yang rendah (nilai densitas kurang dari 5 gr/cm<sup>3</sup>), porositas yang cukup kecil (kurang dari 1%), nilai fleksural yang cukup besar dan hampir memenuhi target DOE sebesar 25 MPa [22], serta nilai konduktivitas listrik tertinggi jika dibandingkan dengan pelat bipolar yang lain.

Hasil karakterisasi tersebut memperlihatkan pengaruh kenaikan tekanan terhadap sifat pelat bipolar komposit yang dihasilkan. Semakin tinggi tekanan yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar dengan metode *compression moulding*, maka akan berpengaruh terhadap peningkatan dari nilai konduktivitas listrik, kekuatan fleksural, dan nilai densitas, serta penurunan tingkat porositas dari pelat bipolar yang dihasilkan.

## BAB 5

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan, sebagai berikut:

1. Kenaikan tekanan dari 300 – 450 kg/cm<sup>2</sup>, secara umum akan berpengaruh terhadap peningkatan nilai densitas, konduktivitas listrik, dan kekuatan fleksural, serta menurunkan tingkat porositas dari pelat bipolar komposit.
2. Pelat bipolar yang dihasilkan dengan menggunakan tekanan sebesar 450 kg/cm<sup>2</sup> memiliki performa terbaik dengan nilai densitas sebesar **1,784** gr/cm<sup>3</sup>, kekuatan fleksural sebesar **23,25** MPa, nilai konduktivitas listrik sebesar **1,09** S/cm, serta porositas sebesar dan **0,72%**.
3. Peningkatan tekanan *compression moulding* pada penelitian ini berpengaruh untuk menghasilkan pelat bipolar dengan bobot yang ringan, serta tingkat porositas yang kecil. Target DOE untuk kedua karakteristik tersebut telah terpenuhi pada penelitian ini.

## DAFTAR REFERENSI

1. IEA (International Energy Agency). *Key World Energy Statistics*. International Energy Agency, Paris, 2009.
2. Viswanathan, B.. *An Introduction to Energy Sources*. National Center for Catalysis Research, Department of Chemistry, Indian Institute of Technology, Madras, 2006.
3. Wibowo, Hartanto Edhie. *Reoptimalisasi Listrik Terbarukan*. Koran Seputar Indonesia Edisi Jumat 30 April 2010.
4. US. Department of Energy. *Fuel Cell Handbook 7<sup>th</sup> Edition*. EG & G Technical Services Inc., Morgantown, West Virginia, 2004.
5. Yuhua Wang. *Thesis: Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. University of Waterloo, Ontario, Canada, 2006.
6. Pham, Ha. Q. and Maurice J. Marks. *Epoxy Resin Vol. 9*. Encyclopedia of polymer Science and Technology, John Wiley & Sons, Dow Chemical.
7. Suharjanto, Yoghi. *Skripsi: Komposit Konduktif Polipropilena (PP)/Maleated-Anhydride-Grafted-Polypropylene (PP-g-MA)/Karbon untuk Aplikasi Pelat Bipolar Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2009.
8. Kurniawan, Rio. *Skripsi: Perancangan Komposit Pelat Bipolar dengan Penambahan Polianilin untuk PEMFC*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010.
9. Febriyani, Dania. *Skripsi: Pengaruh Penambahan 0 – 10 wt.% Carbon Black terhadap Karakterisasi Komposit Epoxy/Grafit EAF sebagai Material Pelat Bipolar pada PEMFC*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010.
10. Stambouli, A. Boudghene and E. Traversa. *Fuel cells, an Alternative to Standard Sources of Energy*. University of Roma, 'Tor Vergata', Department

- of Chemical Science and Technology, Via della Ricerca Scientifica-00133, Roma, Italy, 2001.
11. Kakati, Biraj kumar and Dhanapati Deka. *Effect of Resin Matrix Precursor on the Properties of Graphite Composite Bipolar Plate for PEM Fuel Cell*. Department of Energy, Tezpur University, Assam, Napaam, Dist: Sonitpur, Tezpur, India, 2007.
  12. Mikkola, Mikko. *Experimental Studies on Polymer Electrolyte membrane Fuel Cell Stacks*. Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics, 2001.
  13. Baurens, Pierre and Jean-Philippe Poirot-Crouvezier. *Inovative Concepts for Bipolar Plates*. Technological Research Division, CEA Grenoble Center. CLEFS CEA, No. 50/51, 2004-2005.
  14. Ling Du. *Dissertation: Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. 2008.
  15. Jalani, Nikhil H.. *Development of Nanocomposite Polymer Electrolyte Membranes for Higher Temperature PEM Fuel Cells*. Chemical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, 2006.
  16. Cunningham, B. D., J. Huang, and D. G. Baird. *Review of Materials and Processing Methods Used in The Production of Bipolar Plate for Fuel Cells*. Institute of Materials, Minerals, and Mining ASM International, DOI 10.1179/174328006X102556, Vol. 52, No.1, 2007.
  17. Radhakrishnan, S.. *Presentation: Developments in Conducting Polymer Composites and Coating for Bipolar Plates*. NCL, PUNE.
  18. Mehta, et. al.. *Review and Anaylisis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing*. Department of Mechanical Engineering, University of Washington, Seattle, USA, 2002.
  19. Saputra, Beringin. *Skripsi: Pengaruh Penambahan Polyaniline terhadap Karakterisasi Komposit Epoxy Resin/Grafit Sintesis dan Carbon Black sebagai Material Pelat Bipolar untuk Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010.

20. Noponen, Matti. *Current Distribution Measurements and Modeling of Mass Transfer in Polymer Electrolyte Fuel Cell*. Laboratory of Advanced Energy Systems, Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University of Technology, Finland, 2004.
21. Hermann, Allen, Tapas Chaudhuri, and Priscila Spagnol. *Bipolar plates for PEM Fuel Cells: A Review*. Elsevier International Journal of Hydrogen Energy, 2005.
22. Adrianowycz, Orest L.. *Next Generation Bipolar Plate for Automotive PEM Fuel Cell*. DOE Hydrogen Program, GrafTech International Ltd., 2007.
23. Xiao Zi Yuan, et al.. *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells - From Materials to Processing*. Journal of New Materials for Electrochemical Systems, page 257-267, 2005.
24. H. S. Lee et al.. *Evaluation of Graphite composite Bipolar Plate for PEM (Proton Exchange Membrane) Fuel Cell: Electrical, Mechanical, and Molding Properties*. Journal of Materials Processing Technology, 2007.
25. Heinzl, A., F. Mahlendorf, and C. Jansen. *Bipolar Plates*. University of Duisburg–Essen, Duisburg, Germany, 2009.
26. Yuwono, A. Herman and Sumadi Agustinus. *Diktat Kuliah Teknologi Polimer*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2008.
27. Diakses pada tanggal 10 Juli 2010 pukul 15.44 dari:  
<http://www.pcimag.com/PCI/2006/06/Files/Images/pci0606-Hunt-F3-lg.jpg>
28. Jan-chan Huang. *Carbon Black Filled Conducting Polymers and Polymer Blends*. Plastics Engineering Department, University of Massachusetts Lowell, Lowell, 2002.
29. Suharno, Bambang and Bustanul Arifin. *Bahan Kuliah Proses Pembuatan Besi Baja: Pembuatan Baja pada EAF*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2007.
30. Nicolas, Probst, Eusebiu Grivei, and Thomas Gruenberger. *New Carbon Nano-materials and Carbon Black: Threats and Opportunities*. Timcal 173, Appeldonkstraat Willebroek, Belgium.

31. Hsu-Chiang Kuan, et al.. *Preparation, Electrical, Mechanical and Thermal Properties of Composite Bipolar Plate for A Fuel Cell*. Journal of Power Sources, 2004.
32. Zhang Jie, Zou Yan-wen, and H. E. Jun. *Influence of Graphite Particle Size and Its Shape on Performance of Carbon Composite Bipolar Plate*. Institute of Nuclear Energy and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, China, 2005.
33. Weber, Erik H.. *Dissertation: Development and Modeling of Thermally Conductive Polymer/Carbon Composites*. Bachelor of Science, Michigan Technological University, 1999.
34. Diakses pada tanggal 19 April 2010 pukul 16.54 dari:  
<http://www.moderndispersions.com/images/PLACE%20HOLDER%20FOR%20DISPERSION.pdf>
35. Diakses pada tanggal 10 Juli 2010 pukul 15.46 dari:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol>
36. Zulfia, Anne. *Diktat Kuliah Material Komposit*. Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2009.
37. Callister, William D. Jr.. *Material Science and Engineering an Introduction*. Willey International, John Wiley & Sons Inc., 2003.
38. Tshabalala, A. Mandla. *Surface Characterization, Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite Chap. 8*. Taylor and Francis Group, CRC Press, 2005.
39. "The Fuel Cell review: From Innovation to Manufacturing" Magazine. Vol. 2 Issue 1 Edisi Feb./Mar. 2005.
40. Kakati B. K. et al.. *The Electrical Conductivity of A Composite Bipolar Plate for Fuel Cell Applications*. Department of Chemical Engineering, IIT Guwahati, Guwahati 781039, Assam, India, 2009.
41. T. Derieth et. al.. *Development of Highly Filled Graphite Compounds as Bipolar Plate Materials for Low and High Temperature PEM Fuel Cells*. Journal of New Materials for Electrochemical Systems 11, page 21-29, 2008.



42. ASTM 790 – 03. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.* ASTM International.
43. Akovali, Güneri. *Handbook of Composite Fabrication.* RAPRA Technology Ltd., 2001.



## Lampiran 1. Hasil Pengujian Porositas

Sampel	Berat Jenuh (S <sub>w</sub> ) [gr]	Berat Kering (D) [gr]	Suspended Weight (S) [gr]	Porositas [%]	Porositas Rata-rata [%]
<b>Pelat Bipolar 1 (5% CB; 300 kg/cm<sup>2</sup>)</b>					
1	2,76	2,74	1,2	1,30	<b>0,87</b>
2	2,83	2,82	1,22	0,63	
3	2,59	2,58	1,13	0,69	
<b>Pelat Bipolar 2 (5% CB; 350 kg/cm<sup>2</sup>)</b>					
1	2,22	2,21	0,99	0,82	<b>0,82</b>
2	2,17	2,16	0,92	0,81	
3	2,16	2,15	0,94	0,83	
<b>Pelat Bipolar 3 (5% CB; 400 kg/cm<sup>2</sup>)</b>					
1	3,03	3,01	1,28	1,16	<b>0,79</b>
2	2,72	2,71	1,18	0,65	
3	3,13	3,12	1,37	0,57	
<b>Pelat Bipolar 4 (5% CB; 450 kg/cm<sup>2</sup>)</b>					
1	2,57	2,56	1,12	0,69	<b>0,72</b>
2	2,33	2,32	0,99	0,75	
3	2,53	2,52	1,11	0,71	

Contoh perhitungan data pada pelat bipolar 1:

$$\% \text{ Porositas}_1 = \frac{S_w - D}{D - S} \times 100\% = \frac{2,76 - 2,74}{2,74 - 1,2} \times 100\% = 1,30\%$$

$$\% \text{ Porositas}_2 = \frac{S_w - D}{D - S} \times 100\% = \frac{2,83 - 2,82}{2,82 - 1,22} \times 100\% = 0,63\%$$

$$\% \text{ Porositas}_3 = \frac{S_w - D}{D - S} \times 100\% = \frac{2,59 - 2,58}{2,58 - 1,13} \times 100\% = 0,69\%$$

$$\% \text{ Porositas}_{\text{rata-rata}} = 0,87\%$$

## Lampiran 2. Hasil Pengujian Densitas

Sampel	Massa A (Udara) [gr]	Massa B (Air) [gr]	A-B [gr]	$\rho_{\text{air}}$ [gr/cm <sup>3</sup> ] (T = 28 °C)	$\rho_{\text{sampel}}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{sampel}}$ Rata-rata [gr/cm <sup>3</sup> ]
<b>Pelat Bipolar 1 (5% CB; 300 kg/cm<sup>2</sup>)</b>						
1	2,59	1,15	1,44	0,996232	1,792	<b>1,770</b>
2	2,88	1,25	1,63	0,996232	1,760	
3	2,79	1,21	1,58	0,996232	1,759	
<b>Pelat Bipolar 2 (5% CB; 350 kg/cm<sup>2</sup>)</b>						
1	3,11	1,35	1,76	0,996232	1,760	<b>1,772</b>
2	2,4	1,05	1,35	0,996232	1,771	
3	2,42	1,07	1,35	0,996232	1,786	
<b>Pelat Bipolar 3 (5% CB; 400 kg/cm<sup>2</sup>)</b>						
1	2,66	1,17	1,49	0,996232	1,779	<b>1,778</b>
2	2,73	1,2	1,53	0,996232	1,778	
3	3,05	1,34	1,71	0,996232	1,777	
<b>Pelat Bipolar 4 (5% CB; 450 kg/cm<sup>2</sup>)</b>						
1	2,55	1,13	1,42	0,996232	1,789	<b>1,784</b>
2	2,32	1,02	1,3	0,996232	1,778	
3	2,51	1,11	1,4	0,996232	1,786	

Contoh perhitungan data pada pelat bipolar 1:

$$\rho_1 = \frac{A}{A-B} \times \rho_{\text{air}} = \frac{2,59}{1,44} \times 0,996232 = 1,792 \text{ gr/cm}^3$$

$$\rho_2 = \frac{A}{A-B} \times \rho_{\text{air}} = \frac{2,88}{1,63} \times 0,996232 = 1,760 \text{ gr/cm}^3$$

$$\rho_3 = \frac{A}{A-B} \times \rho_{\text{air}} = \frac{2,79}{1,58} \times 0,996232 = 1,759 \text{ gr/cm}^3$$

$$\rho_{\text{rata-rata}} = 1,770 \text{ gr/cm}^3$$

## Lampiran 3. Hasil Pengujian Fleksural

Sampel	Tebal [mm]	Lebar [mm]	Panjang [mm]	Load [N]	Kekuatan Fleksural [MPa]	Kekuatan Fleksural Rata-rata [MPa]
<b>Pelat Bipolar 1 (5% CB; 300 kg/cm<sup>2</sup>)</b>						
1	3,95	13,55	64	36,8	16,71	<b>15,29</b>
2	3,85	13,45	64	28,8	13,87	
3	3,60	13,95	64	28,8	15,29	
<b>Pelat Bipolar 2 (5% CB; 350 kg/cm<sup>2</sup>)</b>						
1	3,60	11,65	64	24	15,26	<b>15,57</b>
2	3,85	12,95	64	32	16,00	
3	3,95	12,75	64	32	15,44	
<b>Pelat Bipolar 3 (5% CB; 400 kg/cm<sup>2</sup>)</b>						
1	3,85	13,2	64	35,2	17,27	<b>18,01</b>
2	3,65	12,85	64	32	17,95	
3	3,80	13	64	36,8	18,82	
<b>Pelat Bipolar 4 (5% CB; 450 kg/cm<sup>2</sup>)</b>						
1	3,75	12,25	64	40	22,29	<b>23,25</b>
2	4,30	12,8	64	49,6	20,12	
3	3,80	12,45	64	51,2	27,34	

\*kecepatan pembebanan 1,5 mm/menit

Contoh perhitungan data pada pelat bipolar 1:

$$\sigma_{f1} = \frac{3PL}{2bd^2} = \frac{3 \cdot 36,8 \cdot 64}{2 \cdot 13,55 \cdot 3,95^2} = 16,71 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f2} = \frac{3PL}{2bd^2} = \frac{3 \cdot 28,8 \cdot 64}{2 \cdot 13,45 \cdot 3,85^2} = 13,87 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f3} = \frac{3PL}{2bd^2} = \frac{3 \cdot 28,8 \cdot 64}{2 \cdot 13,95 \cdot 3,60^2} = 15,29 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f \text{ rata-rata}} = 15,29 \text{ MPa}$$

## Lampiran 4. Hasil Pengujian Konduktivitas

Sampel	Pengujian Resistansi ke- ( $\Omega.cm$ )			Resistansi Rata-rata [ $\Omega.cm$ ]	Konduktivitas [S/cm]	Konduktivitas Rata-rata [S/cm]
	1	2	3			
<b>Pelat Bipolar 1 (5% CB; 300 kg/cm<sup>2</sup>)</b>						
1	0,376	1,252	0,377	0,668	1,50	<b>0,74</b>
2	3,23	4,07	4,93	4,08	0,25	
3	5,68	0,396	0,372	2,15	0,47	
<b>Pelat Bipolar 2 (5% CB; 350 kg/cm<sup>2</sup>)</b>						
1	3,51	4,34	3,81	3,89	0,26	<b>0,78</b>
2	1,02	0,305	0,376	0,567	1,76	
3	3,3	2,75	3,17	3,07	0,33	
<b>Pelat Bipolar 3 (5% CB; 400 kg/cm<sup>2</sup>)</b>						
1	0,349	0,854	0,351	0,518	1,93	<b>0,86</b>
2	2,02	3,67	2,63	2,77	0,36	
3	3,51	3,25	3,81	3,52	0,28	
<b>Pelat Bipolar 4 (5% CB; 450 kg/cm<sup>2</sup>)</b>						
1	3	2,61	2,81	2,81	0,36	<b>1,09</b>
2	0,39	0,384	0,383	0,386	2,59	
3	3,16	3,28	3,22	3,22	0,31	

Contoh perhitungan data pada pelat bipolar 1:

$$\sigma_1 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0,668} = 1,50 \text{ S/cm}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{4,08} = 0,25 \text{ S/cm}$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{2,15} = 0,47 \text{ S/cm}$$



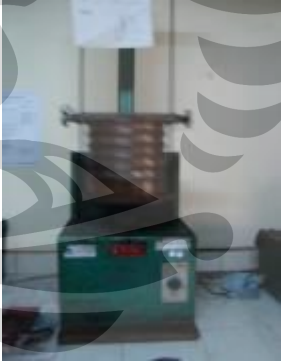

$$\sigma_{\text{rata-rata}} = 0,74 \text{ S/cm}$$

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


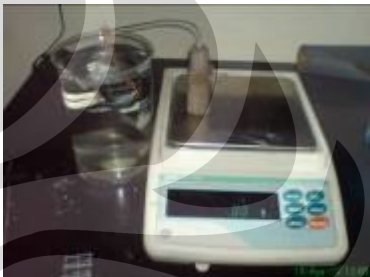



Densitas air ( $\text{g/cm}^3$ ) berbagai temperatur mulai dari  $0^\circ\text{C}$  (*liquid state*) sampai  $30.9^\circ\text{C}$  dengan peningkatan  $0.1^\circ\text{C}$

	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 yang Digunakan pada Penelitian

<b>Nama Alat</b>	<b>Foto Alat</b>
<i>Planetary ball mill</i>	
<i>Disc mill</i>	
Mesin pengguncang (ayakan)	
Oven (kapasitas temperatur $\pm 600$ °C)	

**Lampiran 6. Peralatan yang Digunakan pada Penelitian (lanjutan)**

Oven (kapasitas temperatur $\pm 1500$ °C)	
Timbangan digital dan alat pengujian densitas dan porositas	
<i>Beaker glass</i> ukuran 100 dan 1000 mL dan gelas ukur ukuran 35 mL	
<i>Mixer</i>	
<i>Hot plate</i>	




**Lampiran 6. Peralatan yang Digunakan pada Penelitian (lanjutan)**

<p>Cetakan super dupleks ukuran 15x15 cm<sup>2</sup></p>	
<p>Mesin Hydraulic</p>	
<p>Conductivity four point probe test machine</p>	
<p>Universal Testing Machine</p>	

## Lampiran 7. Spesifikasi Resin Epoksi

EP


Technical Information

---

## Bakelite® EPR 174

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


<u>Characteristics</u>	<u>Unit</u>	<u>Value</u>
<b>Properties</b>		
Viscosity at 25 °C	mPa.s	17000 ± 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".



## Lampiran 8. Spesifikasi Hardener Epoksi

TECHNICAL DATA SHEET	
EPOXY HARDENER V-140	
Epoxy Hardener V-140 is a reactive polyamide resin based on dimerized fatty acid and polyamines and designed for use with solid or liquid epoxy resin. Epoxy Hardener V-140 offers ambient cure, excellent adhesion and resistance properties which may be used in high solid coating, adhesive, sealant, primer, and enamel paint formulations, putties and small casting.	
<b>SPECIFICATION :</b>	
Appearance	: Brown clear liquid
Colour (gardner)	: <10
Viscosity (poise/25°C)	: 100-200
Amine Value (mg KOH/g)	: 335-550
<b>TYPICAL PROPERTIES :</b>	
Theoretical Amino Hydrogen Equi. Wt.	: 105
Solid %	: 100
Mix ratio with 190 EEW Epoxy Liquid	: 55 (phr)
<b>TYPICAL PROPERTIES IN A CURED COATING :</b>	
Tack Free Time, hours	: 5
Pot Life, minutes	: 120
Geltime, minutes	: 108
Through Cure Time, hours	: 23
<b>TYPICAL CURED RESIN PROPERTIES :</b>	
Hardness (shore D)	: 84
Tensile Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 410
Flexural Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 810
Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 740
Shear Adhesive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 160
<b>CHEMICAL RESISTANCE PROPERTIES :</b>	
(weight change after 10 days immersion, %)	
Water 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

## Lampiran 9. Spesifikasi Grafit EAF

WED, 29-JUL-09 12:28      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 Group	Unit	BOH	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.

## Lampiran 9. Spesifikasi Grafit EAF (lanjutan)

WED, 29-JUL-09 12:21 DIV SSP 11 PTKS CLG 62 0254 371184 P. 0

CILEGON

INVENTORY CONTROL SYSTEM Item No : 00908011

DATE : 04.12.2007

GROUP/CLASS : 443019132

Nato-name : ELECTRODE,

Material Code	Material Unit	BOH	Min	Max
00908011	KG	9.000	50,000.000	150,000.000

Name & Specification Group

00908011 KG 9.000 50,000.000 150,000.000

GRAPHITE,ELECTRODE-D406X1800MM-20-46KA

GRAPHITE ELECTRODE

GRADE: ULTRA HIGH POWER (UHP)

DIA: 406 MM

LENGTH: 1800 MM

POROSITY: 15 - 26%

BULK DENSITY: 1.66-1.72 GR/CM3

RESISTANCE: 5.0-6.0 OHM/M

THERMAL CONDUCTIVITY: 120-300 W/MK

COMPRESIVE STRENGTH: 260-262 KG/CM2

CURRENT CARRYING CAPACITY: 20-46 KA

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

ASH CONTENT'S: 0.5% MAX

AVERAGE LINEAR COEFFICIENT OF THERMAL EXPANS:  
(0.5-2.5)X0.000001/K

COMPLETE WITH ACCESSORIES :

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

MANUFACTURE :

GENSUFF ELECTRODE-ARC-D406MMX1800MM-20-46KA

**Lampiran 10. Spesifikasi Metanol**

<b>Formula</b>	CH <sub>3</sub> OH
<b>Massa</b>	32,05 gr/mol
<b>Penampakan</b>	Cairan tidak berwarna
<b>Densitas</b>	0,7918 gr/cm <sup>3</sup>
<b>Titik Leleh</b>	-97 °C / -142,9 °F / 176 K
<b>Titik Didih</b>	64,7 °C / 148,4 °F / 337,8 K
<b>Kelarutan dalam Air</b>	Larut

