



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH TEMPERATUR *COMPRESSION MOLDING*  
TERHADAP KARAKTERISTIK PELAT BIPOLAR PEMFC  
KOMPOSIT GRAFIT EAF/EPOKSI DAN 5% *CARBON BLACK***

**SKRIPSI**

**DINDA PUTRI AMALIA  
0706268404**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK  
JANUARI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH TEMPERATUR *COMPRESSION MOLDING*  
TERHADAP KARAKTERISTIK PELAT BIPOLAR PEMFC  
KOMPOSIT GRAFIT EAF/EPOKSI DAN 5% *CARBON BLACK***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Sarjana Teknik (ST)**

**DINDA PUTRI AMALIA  
0706268404**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK  
JANUARI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Dinda Putri Amalia**

**NPM : 0706268404**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 07 Januari 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Dinda Putri Amalia  
NPM : 0706268404  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengaruh Temperatur *Compression Molding* Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar PEMFC Komposit Grafit EAF/Epoksi dan 5% *Carbon Black*

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Ir. Yunita Sadeli, M.Sc ( )

Pembimbing II : Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T ( )

Penguji : Nofrijon Sofyan Ph.D ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 07 Januari 2011

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul ***“Pengaruh Temperatur Compression Molding Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar PEMFC Komposit Grafit EAF/Epoksi dan 5% Carbon Black”*** yang merupakan salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Dalam rangka menyelesaikan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa bantuan, bimbingan, dorongan, dan petunjuk dari berbagai pihak sangat diperlukan dalam menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan dan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua serta sanak saudara penulis yang selalu memberikan dukungan, doa, serta kasih sayang yang tak ternilai sehingga memacu semangat penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Ing. Bambang Suharno selaku Kepala Departemen Metalurgi dan Material FTUI atas motivasi yang telah diberikan kepada penulis.
3. Ir. Yunita Sadeli, M.Sc, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, stamina, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
4. Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T sebagai pembimbing dari Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang di tengah kesibukannya yang padat masih dapat meluangkan waktu membantu dan mengarahkan penelitian ini.
5. Saudari Christine Samosir dan Henny Indrawati, serta Saudara Fajar Angga Nugraha, Muttakin, Sukiman, dan Sutan Dhany P.L.Tobing selaku rekan penulis dalam penelitian ini, terima kasih atas kerja samanya.
6. Karyawan Departemen Metalurgi dan Material yang telah membantu penulis selama penelitian.

7. Bapak Subhan dan Hendra yang telah membantu penulis dalam melakukan pengujian pada penelitiannya di Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI).
8. Teman-teman metalurgi 2007 yang selalu memberikan semangat yang luar biasa kepada penulis.
9. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis berharap dengan skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membacanya. Namun, penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan kerja prakrek ini masih terdapat banyak kekurangan dan kesalahan dikarenakan keterbatasan ilmu yang dimiliki penulis. Oleh karena itu, saran dan kritik yang positif dan membangun dari pembaca sangat penulis harapkan demi perbaikan laporan ini. Sekali lagi penulis berterima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu penulis, semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas dengan rahmat-Nya.

Depok, 07 Januari 2011

Penulis

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

---

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

Nama : Dinda Putri Amalia  
NPM : 0706268404  
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**PENGARUH TEMPERATUR *COMPRESSION MOLDING*  
TERHADAP KARAKTERISTIK PELAT BIPOLAR PEMFC  
KOMPOSIT GRAFIT EAF/EPOKSI DAN 5% *CARBON BLACK***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif 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 : Depok  
Pada tanggal : 07 Januari 2011

Yang menyatakan

(Dinda Putri Amalia)

## ABSTRAK

Nama : Dinda Putri Amalia  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Pengaruh Temperatur *Compression Molding* Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar PEMFC Komposit Grafit EAF/Epoksi dan 5% *Carbon Black*

PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) merupakan salah satu energi alternatif yang menjanjikan untuk dikembangkan, karena teknologi ini memiliki beberapa keunggulan yaitu dalam hal efisiensi proses yang tinggi, ramah lingkungan, dan waktu pakai yang lama. Namun penggunaannya belum optimal, dikarenakan berat dan biaya produksinya yang tinggi, 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 dalam penelitian ini terbuat dari komposit berbasis karbon dengan resin epoksi dan *hardener* (1:1) sebagai *binder*, serta limbah grafit *Electric Arc Furnace* (grafit EAF) sebagai matriks dan *carbon black* (95%:5%) sebagai *filler*. Pelat bipolar difabrikasi melalui metode *compression molding*. Fokus penelitian ini adalah mengetahui pengaruh peningkatan temperatur *compression molding* terhadap sifat fisik berupa densitas dan porositas, serta sifat mekanis berupa kekuatan fleksural dan konduktivitas listrik dari pelat bipolar. Aplikasi temperatur pada 70, 80, 90, dan 100°C, dengan tekanan 450 kg/cm<sup>2</sup> selama 4 jam.

Peningkatan temperatur *compression molding* berpengaruh pada sifat fisik, mekanis dan listrik dari pelat bipolar. Temperatur *compression molding* yang diaplikasikan pada temperatur 100°C dapat menghasilkan karakteristik pelat bipolar yang optimum dengan nilai konduktivitas listrik sebesar 0,24 S/cm, kekuatan fleksural 48,24 MPa, porositas 0,36%, dan densitas 1,78 g/cm<sup>3</sup>.

Kata kunci: PEMFC, *compression molding*, temperatur, pelat bipolar, komposit berbasis karbon, konduktivitas listrik, kekuatan fleksural

## ABSTRACT

Name : Dinda Putri Amalia  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : The Effect of Compression Molding Temperature on  
Characteristic of PEMFC Bipolar Plate EAF Graphite /Epoxy  
and Carbon Black 5% Composite

PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) is one of promising alternative energies 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 weight and 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 in this experiment made of carbon-based composite materials with electric arc furnace waste (EAF graphite) as matrix and carbon black particles (95%:5%) as fillers and resin epoxy and hardener (1:1) as binder. Bipolar plate fabricated by compression molding method. The focus of this experiment was to find out the effect of increasing compression molding temperature on the physical properties (density and porosity), mechanical properties (flexural strength) and electrical properties (electrical conductivity) of the bipolar plates. Temperature applied on 70, 80, 90, and 100°C, under pressure 450 kg/cm<sup>2</sup> for 4 hours.

The increasing of temperature effected on physical, mechanical, and electrical properties of the bipolar plates. Temperature compression molding applied on 100°C can produce optimum characteristics of bipolar plates with electrical conductivity value of 0.24 S/cm, the flexural strength 48.24 MPa, 0.36% porosity, and density of 1.78 g/cm<sup>3</sup>.

Keywords: PEMFC, compression molding, temperature, bipolar plate, carbon-based composite, electrical conductivity, flexural strength

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PUBLIKASI .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian .....	7
1.4 Ruang Lingkup dan Penelitian.....	7
1.5 Sistematika Penulisan.....	8
<b>BAB 2 TEORI PENUNJANG .....</b>	<b>10</b>
2.1 <i>Fuel Cell</i> .....	10
2.1.1 <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)</i> .....	10
2.1.2 Pelat Bipolar .....	12
2.1.3 Material Penyusun Pelat Bipolar .....	13
2.2 Material Komposit.....	15
2.2.1 Grafit EAF.....	19
2.2.2 Epoksi .....	23
2.2.3 <i>Carbon Black</i> .....	25
2.2.4 Metanol .....	28
2.3 Metode Fabrikasi Pelat Bipolar.....	29
2.4 Sifat Mekanis Pelat Bipolar .....	32
2.5 Sifat Listrik Pelat Bipolar .....	32
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>39</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	39
3.2 Alat dan Bahan.....	40

3.2.1 Alat .....	40
3.2.2 Bahan .....	41
3.2.2.1 Epoksi Resin .....	41
3.2.2.2 Epoksi <i>Hardener</i> .....	41
3.2.2.3 Metanol.....	42
3.2.2.4 <i>Carbon Black</i> .....	42
3.2.2.5 Grafit EAF .....	43
3.3 Prosedur Penelitian.....	43
3.3.1 Preparasi dan Pembuatan Sampel.....	43
3.3.1.1 <i>Crushing</i> dan <i>Milling</i> Grafit .....	43
3.3.1.2 Penimbangan.....	44
3.3.1.3 Pencampuran.....	44
3.3.1.4 Pencetakan .....	45
3.3.1.5 Pembuatan Spesimen Uji.....	45
3.3.2 Karakterisasi Pelat Bipolar .....	46
3.3.2.1 Pengujian Densitas .....	46
3.3.2.2 Pengujian Porositas .....	47
3.3.2.3 Pengujian Konduktivitas Listrik .....	48
3.3.2.4 Pengujian Kekuatan Fleksural .....	50
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>52</b>
4.1 Pengamatan Visual Pelat Bipolar Hasil Pencetakan.....	52
4.2 Karakterisasi Pelat Bipolar Komposit .....	53
4.2.1 Pengujian Porositas.....	55
4.2.2 Pengujian Densitas.....	57
4.2.3 Pengujian Kekuatan Fleksural.....	60
4.2.4 Pengujian Konduktivitas Listrik.....	63
4.3 Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar dengan Peningkatan Temperatur <i>Compression Molding</i> .....	67
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>69</b>
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>70</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>74</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Populasi Dunia Aktual dan Estimasi, Permintaan Energi, Permintaan Listrik.....	1
Gambar 1.2	Estimasi Produksi Bahan Bakar Fosil (Minyak Bumi dan Gas Alam) Dunia .....	2
Gambar 1.4	Skema <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i> .....	3
Gambar 1.5	Kontribusi Biaya Fabrikasi dari Komponen <i>Fuel Cell Stack</i> .....	4
Gambar 1.6	Distribusi Massa dari Sebuah 33 kW PEM <i>Fuel Cell Stack</i> .....	4
Gambar 2.1	Skema <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i> .....	12
Gambar 2.2	Pilihan Material Pelat Bipolar pada PEM <i>Fuel Cell Stack</i> .....	13
Gambar 2.3	Pengaruh jumlah grafit terhadap: (a) densitas, (b) kekuatan fleksural dan (c) porositas .....	15
Gambar 2.4	Parameter dari Bahan Pengisi pada Komposit: (a) Distribusi; (b) Konsentrasi, (c) Orientasi, (d) Bentuk, dan (e) Ukuran.....	17
Gambar 2.5	Fenomena <i>Interface</i> dan <i>Interphase</i> pada Komposit .....	18
Gambar 2.6	Struktur Kristal Grafit .....	20
Gambar 2.7	Tungku Busur Listrik .....	21
Gambar 2.8	Pengaruh Jumlah Grafit terhadap Resistansi Listrik .....	21
Gambar 2.9	Reaksi pembentukan Epoksi.....	23
Gambar 2.10	Reaksi antara epoksi resin dan <i>hardener</i> .....	25
Gambar 2.11	Pengaruh Penambahan <i>Carbon Black</i> terhadap Densitas, Konduktivitas Listrik, dan Kekuatan Fleksural .....	27
Gambar 2.12	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 Re .....	28
Gambar 2.13	Pilihan Metode Fabrikasi Material Pelat Bipolar.....	30
Gambar 2.14	Grafik Pengaruh Variabel Proses terhadap Resistivitas: (a)Tekanan, (b) Temperatur, dan (c) Rasio Pencampuran .....	31
Gambar 2.15	Skema Pengujian <i>Through-Plane</i> Konduktivitas Listrik .....	33
Gambar 2.16	Fenomena perkolasi penyebaran partikel dalam matriks .....	34
Gambar 2.17	Skema Ilustrasi Konsentrasi Batas Perkolasi dari Konduktif Komposit Polimer. Vc Konsentrasi Batas Perkolasi.....	35
Gambar 2.18	Skema Ilustrasi Pengaruh NTC pada Resistivitas Listrik .....	35
Gambar 2.19	Skema Ilustrasi Pengaruh PTC pada Resistivitas Listrik .....	36
Gambar 2.20	Fungsi <i>In-Plane</i> Konduktivitas Listrik dan Temperatur Komposit Epoksi.....	37
Gambar 2.21	Pengaruh temperatur terhadap konduktivitas listrik .....	39

Universitas Indonesia

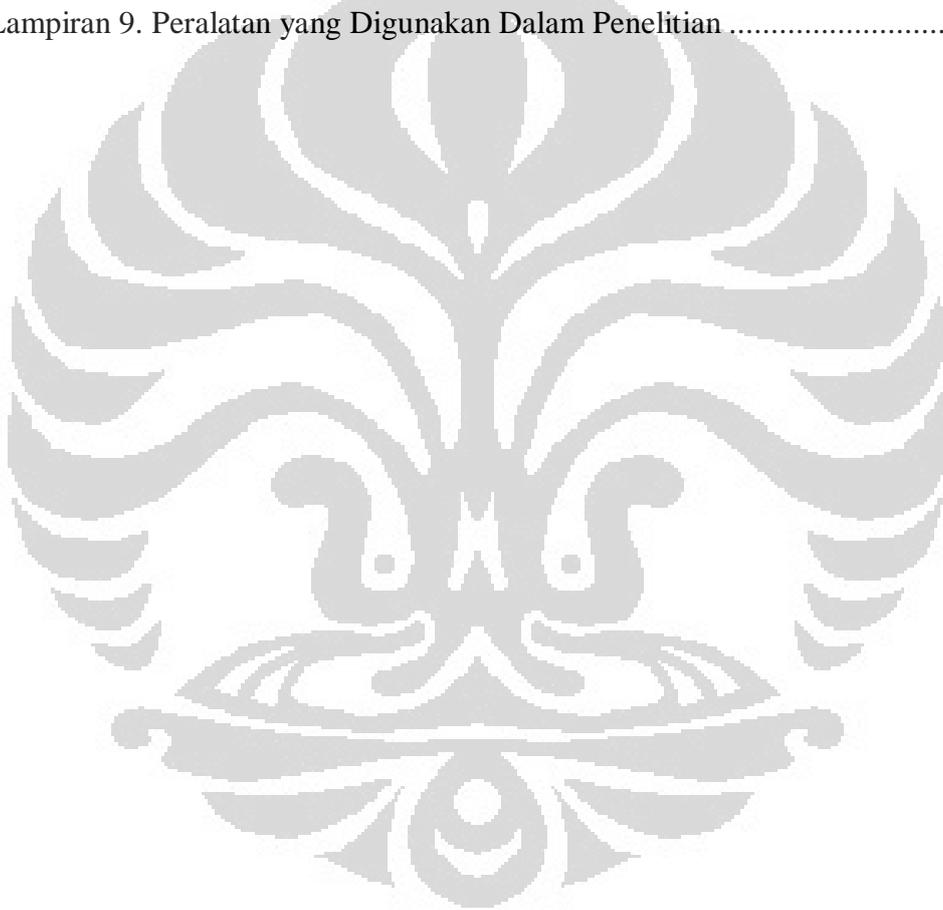
Gambar 3.1.	Epoksi Resin dan <i>Hardener</i> .....	42
Gambar 3.2	(a) Serabut kelapa sebelum pirolisis; (b) <i>Carbon Black</i> setelah di- <i>milling</i> dan ayak.....	43
Gambar 3.3	(a) Elektroda grafit EAF; (b) Grafit EAF setelah di- <i>milling</i> dan ayak .....	44
Gambar 3.4	Hasil <i>Mixing</i> .....	45
Gambar 3.5	Mesin <i>Hot Press</i> dan Cetakan.....	45
Gambar 3.6	Sampel Uji Konduktivitas, Densitas, dan Porositas.....	46
Gambar 3.7	Sampel Uji Fleksural.....	46
Gambar 3.8	Proses Pangukuran Massa dalam Air .....	47
Gambar 3.9	Proses Perebusan Spesimen.....	48
Gambar 3.10	Skema Pengujian Konduktivitas Listrik.....	49
Gambar 3.11	Alat <i>Four Point Probe</i> .....	49
Gambar 3.12	Skema Pengujian Kekuatan Fleksural.....	50
Gambar 3.13	Mesin Pengujian Kekuatan Fleksural.....	50
Gambar 4.1	Pelat Bipolar yang Dihasilkan pada Temperatur: 1.) 70°C, 2.) 80°C, 3.) 90°C, dan 4.) 100°C .....	52
Gambar 4.2	Pengaruh Peningkatan Temperatur terhadap Porositas.....	55
Gambar 4.3	Pengaruh Peningkatan Temperatur terhadap Densitas.....	58
Gambar 4.4	Pengaruh Peningkatan Temperatur terhadap Kekuatan Fleksural .....	61
Gambar 4.5	Pengaruh Peningkatan Temperatur terhadap Konduktivitas Listrik .....	64

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik Teknis dari <i>Fuel Cell</i> yang Berbeda .....	11
Tabel 2.2	Pengaruh ukuran dan bentuk partikel dari grafit .....	22
Tabel 2.3	Sifat-sifat umum dari Grafit .....	23
Tabel 2.4	Sifat Umum Metanol .....	29
Tabel 3.1	Alat preparasi .....	38
Tabel 3.2	Alat Karakterisasi .....	39
Tabel 3.3	Spesifikasi Polimer Epoksi Resin Eposchon.....	39
Tabel 3.4	Spesifikasi Polimer Epoksi <i>Hardener</i> Eposchon .....	40
Tabel 3.5	Spesifikasi Metanol MERCK.....	40
Tabel 3.6	Spesifikasi Grafit EAF.....	41
Tabel 3.7	Komposisi Sampel Pelat Bipolar.....	42
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Porositas.....	53
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Densitas .....	56
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Fleksural .....	58
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Konduktivitas.....	62
Tabel 4.5	Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar dengan Peningkatan Temperatur pada <i>Compression Molding</i> .....	65

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Pengujian Densitas .....	74
Lampiran 2. Hasil Pengujian Porositas .....	75
Lampiran 3. Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik .....	76
Lampiran 4. Hasil Pengujian Fleksural.....	77
Lampiran 5. Spesifikasi Resin Epoksi .....	78
Lampiran 6. Spesifikasi Epoksi <i>Hardener</i> .....	79
Lampiran 7. Spesifikasi Grafit EAF PT. Krakatau Steel .....	80
Lampiran 8. Tabel Densitas Air (simetric.co.uk) .....	82
Lampiran 9. Peralatan yang Digunakan Dalam Penelitian .....	84

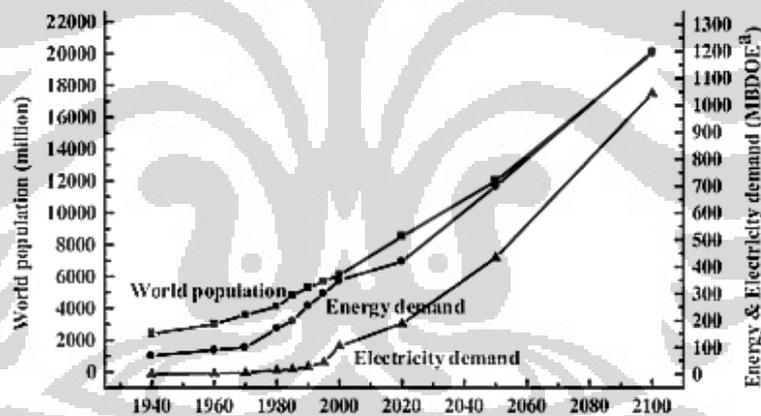


# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1.Latar Belakang

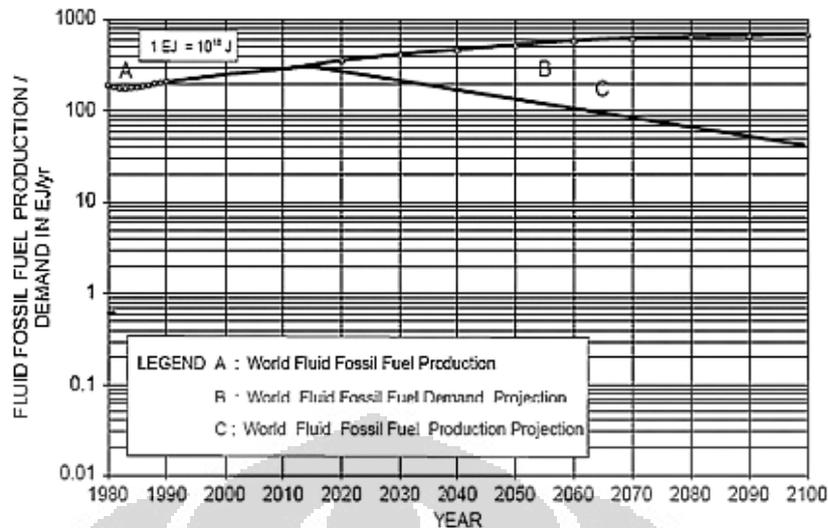
Semakin meningkatnya populasi manusia di dunia, dengan peningkatan sebesar 1.2-2% per tahun dan dapat diperkirakan akan mencapai angka 12 miliar pada tahun 2050<sup>[1]</sup>, memungkinkan akan meningkatnya kebutuhan energi dan listrik untuk menunjang kehidupan manusia. Selain itu juga dapat dikatakan bahwa perkembangan ekonomi yang terus tumbuh dari suatu negara juga sebagai konsekuensi dari permintaan energi global yang semakin meningkat dengan permintaan energi primer yang meningkat hingga 1.5-3 kali lipat seperti ditunjukkan pada Gambar 1.1<sup>[2]</sup>.



Sumber: *Survey of energy resources. 1998*

**Gambar 1.1** Populasi dunia aktual dan estimasi, permintaan energi dan listrik<sup>[2]</sup>

Namun, peningkatan kebutuhan akan energi dan listrik tersebut tidak selamanya akan seiring dengan kemampuan untuk memproduksi energi dan listrik itu sendiri seperti ditunjukkan pada Gambar 1.2<sup>[3]</sup>. Pada gambar tersebut terlihat bahwa peningkatan kebutuhan energi tidak diiringi dengan peningkatan produksi energi bahan bakar fosil. Perbedaan kebutuhan konsumsi energi dan kapasitas produksi tersebut diprediksi akan menimbulkan dampak krisis energi jangka pendek mulai tahun 2015.



Sumber: *Challenges and Future Developments in Proton Exchange Membrane Fuel Cells*.  
2005

**Gambar 1.2** Estimasi Produksi Energi Fosil (Minyak Bumi dan Gas Alam) Dunia<sup>[3]</sup>

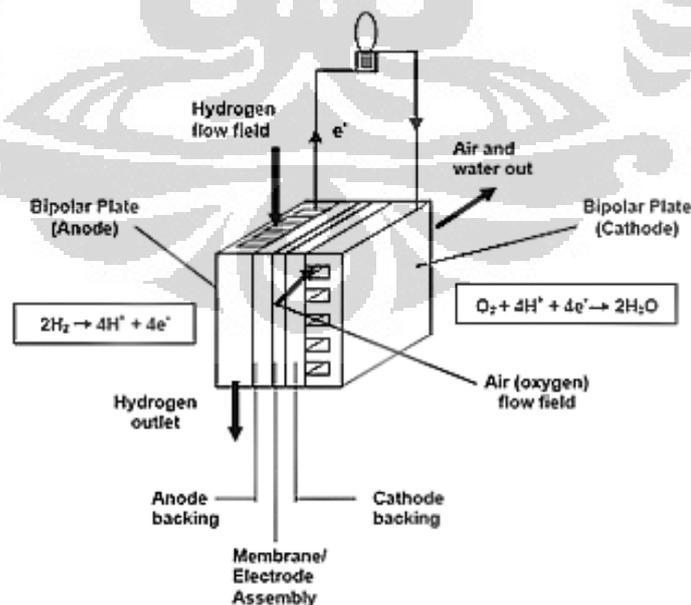
Peningkatan kebutuhan akan bahan bakar fosil tersebut dengan setiap satu galon dari produksi dan konsumsi minyak bumi pada pembakaran internal mesin dapat menghasilkan 12 kg gas CO<sub>2</sub> yang merupakan salah satu gas rumah kaca yang berkontribusi utama dalam pemanasan global<sup>[1]</sup>. Oleh karena itu, semakin meningkatnya penggunaan bahan bakar fosil juga akan meningkatkan emisi gas-gas rumah kaca (GRK) seperti CO<sub>2</sub>. Peningkatan emisi GRK tersebut dapat dikurangi dengan perbaikan dalam efisiensi pemakaian bahan bakar fosil dan atau substitusi dengan energi alternatif berbahan bakar yang terbarukan dan lebih ramah lingkungan<sup>[4]</sup>. Namun, dalam penentuan energi alternatif sebaiknya memperhatikan bahwa energi tersebut bersumber dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui serta dapat didistribusikan dan digunakan dengan efisiensi tinggi<sup>[5]</sup>, salah satunya adalah *fuel cell*.

*Fuel cell* merupakan suatu sistem perangkat yang dapat mengkonversi energi secara elektrokimia dengan mengubah energi kimia secara langsung dari bahan bakar berupa gas hidrogen dan oksigen menjadi energi listrik dengan panas dan air sebagai hasil sampingan dari proses yang terjadi pada susunan sistem elektroda dan elektrolit<sup>[6]</sup>. Pada *fuel cell* tidak terjadi proses pembakaran mesin internal atau *combustion engine* yang dapat menghasilkan emisi GRK sehingga

lebih ramah lingkungan apabila dibandingkan dengan energi fosil lainnya dan juga dapat menghasilkan listrik secara simultan sesuai dengan suplai hidrogen dan oksigen yang diberikan. Pada saat operasi, *fuel cell* juga hanya menghasilkan sedikit kebisingan apabila dibandingkan dengan *gas-electric*, *microturbine* dan *diesel electric*<sup>[1]</sup>.

Jenis-jenis *fuel cell* dapat dibedakan berdasarkan jenis elektrolit yang digunakan. *Fuel cell* yang sedang populer dikembangkan salah satunya adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) yang merupakan jenis *fuel cell* yang dapat beroperasi pada temperatur rendah (50-80°C) dan hanya membutuhkan hidrogen dengan kemurnian rendah dari hidrokarbon atau metanol<sup>[2]</sup>.

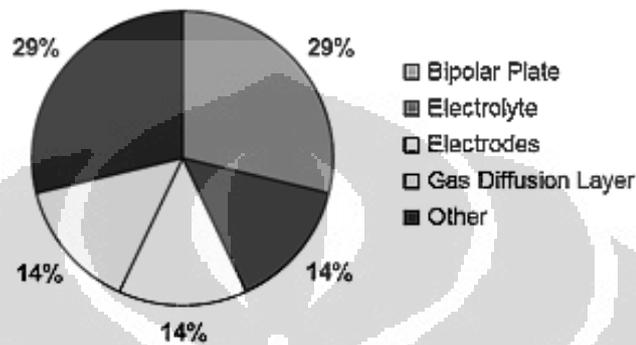
Dalam pengembangannya sebagai perangkat sistem energi alternatif dan terbarukan untuk menggantikan sumber energi fosil, komersialisasi PEMFC terdapat beberapa kendala seperti biaya tinggi dalam fabrikasinya, serta volum dan berat yang tinggi<sup>[8,9]</sup>. Dalam satu perangkat PEMFC terdiri dari susunan pelat-pelat atau *fuel cell stack*<sup>[10]</sup>. Dalam satu *fuel cell stack* tersebut terdiri dari gabungan antara dua pelat penutup monopolar (katoda dan anoda) dan pelat-pelat bipolar yang mengalirkan *fuel* berupa hidrogen dan oksigen untuk dialirkan ke sisi lain pelat seperti ditunjukkan pada Gambar 1.4<sup>[11]</sup>.



Sumber: *Bipolar plates for PEM Fuel Cells: A Review*. 2005

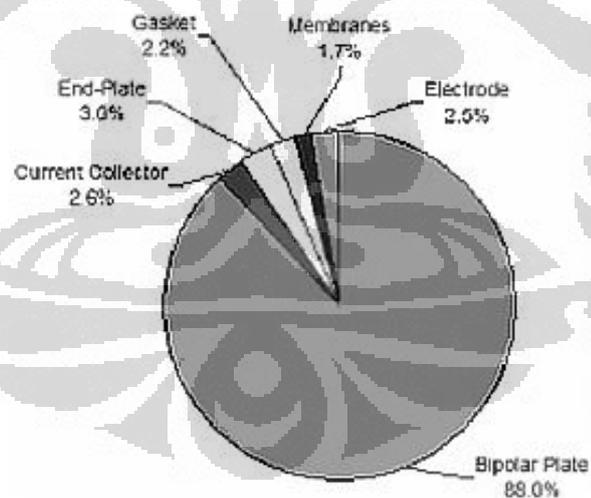
**Gambar 1.4** Skema *polymer electrolyte membrane fuel cell*<sup>[11]</sup>

Dari komponen-komponen yang ada pada PEMFC, pelat bipolar paling sering dilakukan pengembangan karena pelat bipolar berkontribusi paling besar dalam hal berat dan biaya fabrikasinya, sesuai dengan estimasi biaya yang dikeluarkan oleh US *Department of Energy* (DOE) yaitu sebesar 29% dan berat sebesar 88%, sesuai dengan yang ditunjukkan Gambar 1.5 dan 1.6<sup>[10]</sup>.



Sumber: *The Development of Compression Moldable Polymer Composite Bipolar Plates for Fuel Cells*. 2007

**Gambar 1.5** Kontribusi biaya fabrikasi dari komponen *fuel cell stack*<sup>[10]</sup>



Sumber: *The Development of Compression Moldable Polymer Composite Bipolar Plates for Fuel Cells*. 2007

**Gambar 1.6** Distribusi massa dari sebuah 33 kw PEM *fuel cell stack*<sup>[10]</sup>

Oleh karena itu, diharapkan dengan pengembangan pelat bipolar tersebut didapat biaya fabrikasi, serta berat dan volum dari perangkat PEMFC yang lebih

**Universitas Indonesia**

rendah sehingga memudahkan komersialisasi *fuel cell* untuk aplikasi yang lebih luas, khususnya pada bidang transportasi, dengan target biaya dikeluarkan DOE untuk pembuatan pelat bipolar untuk *fuel cell for vehicle* sebesar US \$10/kW<sup>[12]</sup>.

Selain memiliki kontribusi yang besar dalam biaya fabrikasi PEMFC, alasan lain perlu dilakukannya pengembangan material pada pelat bipolar yaitu karena pelat bipolar memiliki peranan yang sangat penting dalam perangkat PEMFC, yaitu: menghubungkan dan memisahkan individual sel untuk membentuk *fuel cell stack*, mendistribusikan *fuel gas* hidrogen dan oksigen melewati permukaan dari MEA (*Membrane Electrode Assembly*) secara menyeluruh atau homogen, mengkonduksi arus listrik dari anoda sel yang satu ke katoda sel berikutnya dan juga mengalirkan arus ke luar sel, memfasilitasi manajemen air dalam sel, mentransfer panas, serta menjepit membran dan elektroda pada rangkaian tumpukan pelat<sup>[10]</sup>.

## 1.2. Perumusan Masalah

Dalam mengembangkan pelat bipolar pada PEMFC para peneliti harus mencapai target yang dikeluarkan oleh DOE agar bisa diaplikasikan, yaitu dengan konduktivitas listrik yang tinggi ( $>100$  S/cm), kekuatan fleksural ( $>25$  MPa), dan densitas ( $<5$  g/cm<sup>3</sup>)<sup>[12]</sup>. Oleh karena itu, untuk mencapai target tersebut diperlukan penelitian yang lebih lanjut dalam material yang digunakan sebagai pelat bipolar tersebut. Dalam pengembangannya material untuk pelat bipolar bervariasi mulai dari yang berbahan dasar grafit, *metal foam*, pelapisan dengan logam hingga material komposit.

Salah satu material komposit yang sedang dikembangkan yaitu material komposit yang berbasis karbon. Karbon itu sendiri yang berupa grafit yang berporos dan memiliki konduktivitas listrik yang tinggi sebesar 110-680 S/cm, tetapi kelemahannya bersifat *brittle* atau kekuatan fleksural  $<25$  MPa sehingga sulit untuk dibuat tipis dengan target *Plug Power* ( $<3$  mm) tetapi hanya bisa hingga ketebalan 5-6 mm maka diperlukan material yang memiliki keuletan yang tinggi yaitu salah satunya polimer<sup>[10]</sup>. Namun, pada umumnya polimer memiliki konduktivitas listrik yang rendah sehingga perlu disiasati dengan penambahan *filler* yang memiliki konduktivitas listrik yang cukup tinggi yaitu *carbon black*

Universitas Indonesia

dengan konduktivitas bulk listrik (200-300 S/cm)<sup>[6]</sup> dalam konsentrasi yang rendah dan ukuran partikel yang lebih kecil juga akan mengurangi porositas.

Target lainnya dalam pembuatan pelat bipolar selain sifat dari materialnya itu sendiri juga pemilihan material berdasarkan pada biaya dan kecepatan dalam fabrikasinya. Untuk menunjang biaya fabrikasi yang lebih rendah, dalam hal pemilihan material dapat menggunakan *carbon black* yang berasal dari serabut kelapa hasil proses pirolisis<sup>[14]</sup> dan juga menggunakan grafit yang berasal dari grafit limbah hasil peleburan baja dengan menggunakan *Electric Arc Furnace* (grafit EAF) yang sekaligus dapat mengurangi dampak limbah tersebut pada lingkungan.

Pemilihan proses fabrikasi pelat bipolar tersebut juga dapat mempersingkat waktu fabrikasi. Dua metode proses fabrikasi yang sering digunakan pada material grafit-polimer komposit yaitu *injection molding* dan *compression molding*. Berdasarkan kecepatannya *compression molding* lebih baik, apalagi jika yang digunakan polimer termoset yang memiliki monomer yang membentuk *cross linking* apabila diberi panas hingga temperatur *curing* resin akan cenderung menjadi lebih rigid atau *short cycle time*<sup>[14]</sup> sehingga dapat diangkat dari cetakan dalam keadaan panas tanpa proses pendinginan terlebih dahulu, sedangkan polimer termoplastik memerlukan pendinginan untuk rekristalisasi. Kedua proses tersebut dapat memperendah biaya fabrikasi karena material grafit-polimer komposit dengan fabrikasi menggunakan proses tersebut tidak perlu machining yang rumit dalam pembuatan *gas channel*<sup>[10]</sup>.

Pada pelaksanaan proses fabrikasi menggunakan metode *compression moulding*, diperlukan pengaturan terhadap parameter-parameter proses seperti temperatur, tekanan, dan lamanya proses<sup>[6]</sup>. Oleh karena itu, dengan adanya kombinasi komposisi dan morfologi dari material penyusun pelat bipolar, serta parameter proses dari metode fabrikasi yang digunakan dengan tepat maka akan lebih mudah didapat material pelat bipolar yang ringan, konduktivitas listrik tinggi, sifat mekanis yang baik, sesuai target *Department of Energy United State* (DOE) dan *Plug Power*, serta biaya dan waktu yang diperlukan untuk fabrikasi rendah sehingga mudah untuk dikomersialisasikan dan dibuat dalam jumlah besar.

Salah satu parameter proses penting pada fabrikasi dengan metode *compression molding* tersebut adalah temperatur pada saat dilakukannya penekanan pada *compression molding* dengan temperatur proses maksimum dari resin polimer yaitu antara 20-40°C di atas temperatur leleh<sup>[10]</sup>. Oleh karena itu, pada penelitian ini perlu dilakukan perbandingan antara karakteristik pelat bipolar dengan material komposit berupa grafit dan *carbon black* sebagai *filler* serta resin epoksi dan *hardener* sebagai *binder* pada variasi temperatur *compression molding*, dengan karakterisasi berupa pengujian konduktivitas listrik, porositas, densitas dan kekuatan fleksural. Peningkatan temperatur dapat meningkatkan sifat fisik, mekanis dan listrik dari pelat bipolar.

### 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini yaitu untuk:

- a. memastikan kesesuaian komersialisasi pelat bipolar dengan menggunakan material grafit limbah EAF dan *carbon black* dengan perbandingan 19:1 (95%:5%) sebagai *filler* serta resin epoksi dan *hardener* dengan perbandingan 1:1 sebagai *binder* dibuat dengan variasi parameter proses fabrikasi berupa temperatur *compression molding*, serta
- b. mengetahui pengaruh peningkatan temperatur *compression molding* yaitu sebesar 70°C, 80°C, 90°C dan 100°C terhadap karakteristik masing-masing pelat bipolar yang dihasilkan, setelah dilakukan beberapa pengujian, seperti konduktivitas listrik, densitas, porositas, dan kekuatan fleksural.

### 1.4. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dari penelitian yang akan dilakukan dibatasi pada:

- a. Material yang digunakan dalam pembuatan komposit pelat bipolar adalah polimer termoset (epoksi) yang digunakan sebesar 20% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit yaitu resin epoksi dan *hardener* dengan perbandingan 1:1 sebagai *binder*, serta grafit hasil limbah peleburan baja menggunakan EAF dan *carbon black* yang digunakan sebesar 80% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit,

**Universitas Indonesia**

dengan perbandingan 19:1 (95%:5%) sebagai *filler*. Dengan total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit tersebut adalah 180 gram.

- b. Metode fabrikasi yang digunakan untuk membuat komposit grafit EAF/resin epoksi tersebut adalah metode *compression molding* dengan tekanan konstan sebesar  $450 \text{ kg/cm}^2$  selama 4 jam. Dengan sebelumnya dibuat bakalan dengan metode *hot blending* pada temperatur  $100^\circ\text{C}$  selama  $\pm 20$  menit, pada proses ini dibutuhkan metanol sejumlah masing-masing 35 ml sebagai pelarut resin epoksi dan *hardener*. Hasil pencampuran bahan diratakan ke dalam cetakan berbahan Duplex berukuran  $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  yang siap dilakukan *compression molding*.
- c. Variabel bebas yang digunakan sebagai pembanding pada penelitian ini adalah parameter proses fabrikasi yaitu temperatur *compression molding* yang divariasikan pada  $70^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$ ,  $90^\circ\text{C}$  dan  $100^\circ\text{C}$ .
- d. Pengujian dilakukan pada sampel dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan untuk mengetahui karakteristiknya, yaitu melalui pengujian konduktivitas listrik (*four point probe testing*), porositas (ASTM C20), densitas (ASTM D792), dan fleksural (ASTM D790).

### 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 : TINJAUAN PUSTAKA**

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

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

Pada bab ini berisi prosedur penelitian, daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

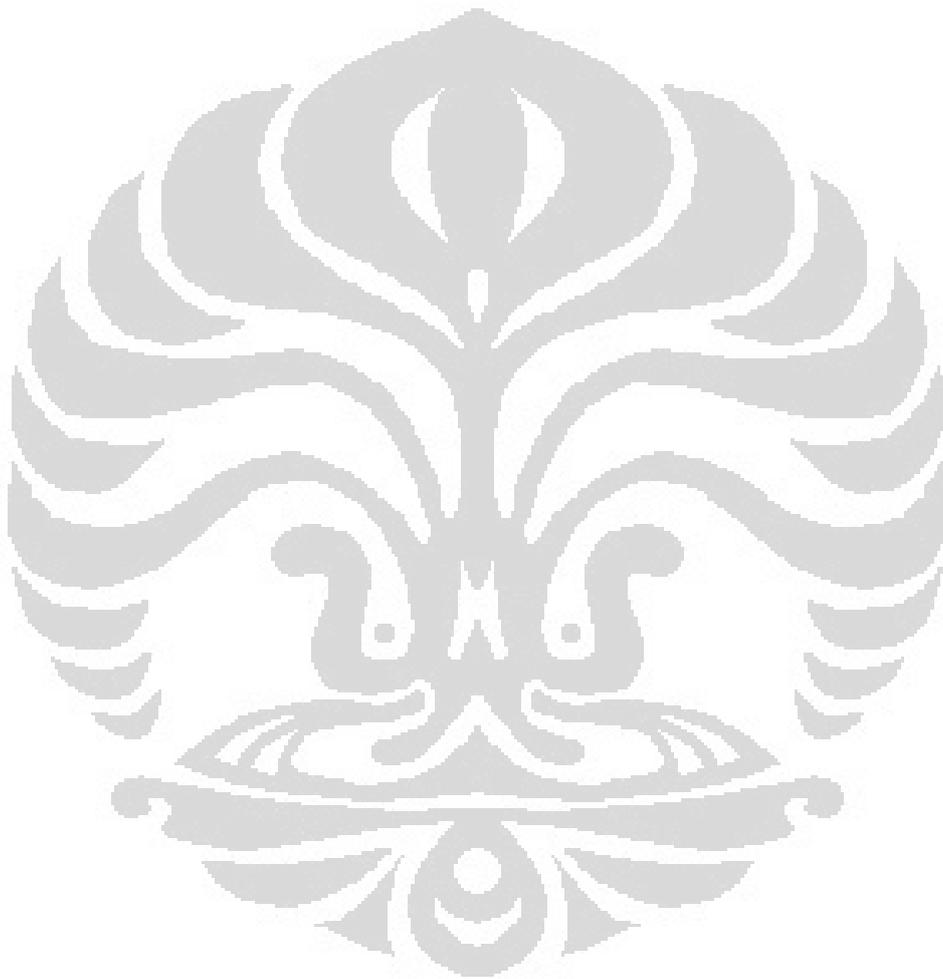
#### **BAB 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN**

Universitas Indonesia

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

#### **BAB 5 : PENUTUP**

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



## BAB 2

### TEORI PENUNJANG

#### 2.1. *Fuel Cell*

*Fuel cell* merupakan suatu perangkat berprinsip elektrokimia yang dapat mengkonversikan energi kimia menjadi energi listrik secara langsung yang memiliki efisiensi proses tinggi serta ramah terhadap lingkungan<sup>[1,12]</sup>. Bahan bakar yang digunakan pada perangkat tersebut adalah hidrogen ( $H_2$ ) dan oksigen ( $O_2$ ) yang akan dikonversikan menjadi energi listrik dan hasil sampingan dari *fuel cell* ini hanya berupa air sebagai zat buang serta panas dari hasil reaksi. Pada prinsipnya, *fuel cell* hampir sama dengan baterai, dimana di dalam sistemnya terdapat dua buah elektroda yang dipisahkan oleh elektrolit. Namun, dalam *fuel cell* tidak memerlukan sistem pengisian ulang, seperti yang dilakukan pada teknologi baterai dimana energi akan dihasilkan apabila bahan bakar terus diberikan<sup>[6,10]</sup>.

*Fuel cell* mempunyai beberapa kelebihan, yaitu memiliki efisiensi energi yang jauh lebih tinggi daripada sistem konversi energi konvensional dan performa yang dihasilkan juga lebih baik<sup>[1,11]</sup>. Hasil sampingan dari sel ini hanya berupa bahan bakar yang teroksidasi, yaitu air dikarenakan sumber energi yang digunakan adalah hidrogen. Selain itu, sistem ini juga menggunakan sedikit komponen dan desain yang modular sehingga memudahkan dalam proses pemeliharaannya. Kapasitas energi yang tinggi dengan ukuran sel yang lebih kecil dan tidak menimbulkan suara ketika beroperasi sehingga banyak digunakan pada berbagai aplikasi, seperti alat – alat elektronik dan kendaraan<sup>[11]</sup>.

##### 2.1.1. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*

Jenis-jenis *fuel cell* dapat dibedakan berdasarkan jenis elektrolit yang digunakan, dapat dilihat pada Tabel 1.1<sup>[11]</sup>. Berdasarkan tabel tersebut, *fuel cell* jenis *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)* merupakan jenis *fuel cell* yang dapat beroperasi pada temperatur rendah ( $50-80^{\circ}C$ ) dan hanya membutuhkan hidrogen dengan kemurnian rendah. Selain itu kelebihan dari

PEMFC yaitu juga memiliki densitas daya tinggi (*high power density*), relatif cepat dalam permulaan menghasilkan energi (*quick start-up*) serta respon yang cepat terhadap perubahan masukan<sup>[7]</sup>.

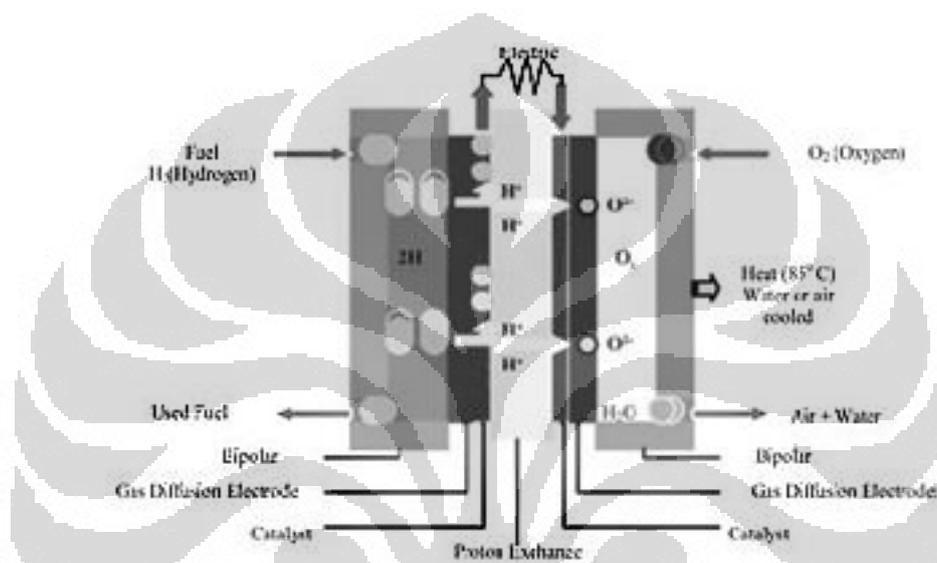
**Tabel 2.1** Karakteristik Teknis dari Fuel Cell yang Berbeda<sup>[11]</sup>

Types	Electrolyte	Operating T (C)	Fuel
Alkaline (AFC)	Potassium hydroxide (KOH)	50–200	Pure hydrogen, or hydrazine
Direct methanol (DMFC)	Polymer	60–200	Liquid methanol
Phosphoric acid (PAFC)	Phosphoric acid	160–210	Hydrogen from hydrocarbons and alcohol
Sulphuric acid (SAFC)	Sulphuric acid	80–90	Alcohol or impure hydrogen
Proton-exchange membrane (PEMFC)	Polymer, proton exchange membrane	50–80	Less pure hydrogen from hydrocarbons or methanol
Molten carbonate (MCFC)	Molten salt such as nitrate, sulphate, carbonates...	630–650	Hydrogen, carbon monoxide, natural gas, propane, marine diesel
Solid oxide (SOFC)	Stabilised zirconia and doped perovskite	600–1000	Natural gas or propane
Solid polymer (SPFC)	Solid sulphonated polystyrene	90	Hydrogen

Sumber: *Bipolar plates for PEM Fuel Cells : A Review. 2005*

Pengembangannya sebagai perangkat sistem energi alternatif dan terbarukan untuk menggantikan sumber energi fosil, fabrikasi PEMFC terdapat beberapa kendala seperti biaya tinggi dalam fabrikasinya, serta ukuran volum dan berat yang besar<sup>[8,9]</sup>. Satu perangkat PEMFC terdiri dari susunan pelat-pelat atau *fuel cell stack*<sup>[10]</sup>. Satu *fuel cell stack* tersebut terdiri dari gabungan antara dua pelat penutup monopolar (katoda dan anoda) dan pelat-pelat bipolar yang mengalirkan *fuel* berupa hidrogen dan oksigen untuk dialirkan ke sisi lain pelat seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1<sup>[11]</sup>. Pada satu sisi pelat bipolar berperan sebagai tempat terjadinya reaksi anoda dan di sisi lain berperan sebagai tempat terjadinya reaksi katoda untuk sel berikutnya. Di antara pelat bipolar tersebut juga terdapat *Polymer Electrolyte Membrane* (PEM) yang dihubungkan oleh masing-masing pelat bipolar. Pada PEM tersebut terdapat *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang terdiri dari susunan antara *proton exchange membrane*, lapisan

katalis anoda dan katoda, *Gas Diffusion Layer* (GDL), *sealing gasket*, serta katalis yang berbahan logam mulia atau platina yang dapat mempercepat reaksi reduksi dan oksidasi, dan sebagai pengalir proton yang dihasilkan dari reaksi oksidasi hidrogen untuk melewati katoda sehingga dapat bereaksi dengan molekul hasil reduksi oksigen membentuk  $H_2O$  atau air. Dalam satu individual sel dapat menghasilkan 0.7 V, sehingga gabungan-gabungan pelat bipolar tersebut diperlukan untuk menghasilkan daya yang lebih besar<sup>[10]</sup>.



Sumber: *Fuel Cell and Hydrogen Economy*. 2006

Gambar 2.1 Skema *polymer electrolyte membrane fuel cell*<sup>[44]</sup>

### 2.1.2. Pelat Bipolar

Dari komponen-komponen yang ada pada *fuel cell* PEM, pelat bipolar paling sering dilakukan pengembangan karena pelat bipolar berkontribusi paling besar dalam hal berat dan biaya fabrikasinya, sesuai dengan estimasi biaya yang dikeluarkan oleh US *Department of Energy* (DOE) yaitu sebesar 29% dan berat sebesar 88%<sup>[10]</sup>.

Oleh karena itu, diharapkan dengan pengembangan pelat bipolar tersebut didapat biaya fabrikasi, serta berat dan volum dari perangkat PEMFC yang lebih rendah sehingga memudahkan komersialisasi *fuel cell* untuk aplikasi yang lebih luas, khususnya pada bidang transportasi. Target biaya dikeluarkan DOE untuk

pembuatan pelat bipolar untuk *fuel cell for vehicle* tersebut sebesar US \$10/kW<sup>[12]</sup>.

Selain memiliki kontribusi yang besar dalam biaya fabrikasi PEMFC, alasan lain perlu dilakukannya pengembangan material pada pelat bipolar yaitu karena pelat bipolar memiliki peranan yang sangat penting dalam perangkat PEMFC, yaitu: menghubungkan dan memisahkan individual sel untuk membentuk *fuel cell stack*, mendistribusikan fuel gas hidrogen dan oksigen melewati permukaan dari MEA secara menyeluruh atau homogen, mengkonduksi arus listrik dari anoda sel yang satu ke katoda sel berikutnya dan juga mengalirkan arus ke luar sel, memfasilitasi manajemen air dalam sel, mentransfer panas, serta menjepit membran dan elektroda pada rangkaian tumpukan pelat<sup>[10]</sup>. Gambar 2.2 merupakan pelat bipolar yang sudah dilakukan permesinan untuk membentuk *gas channel*.



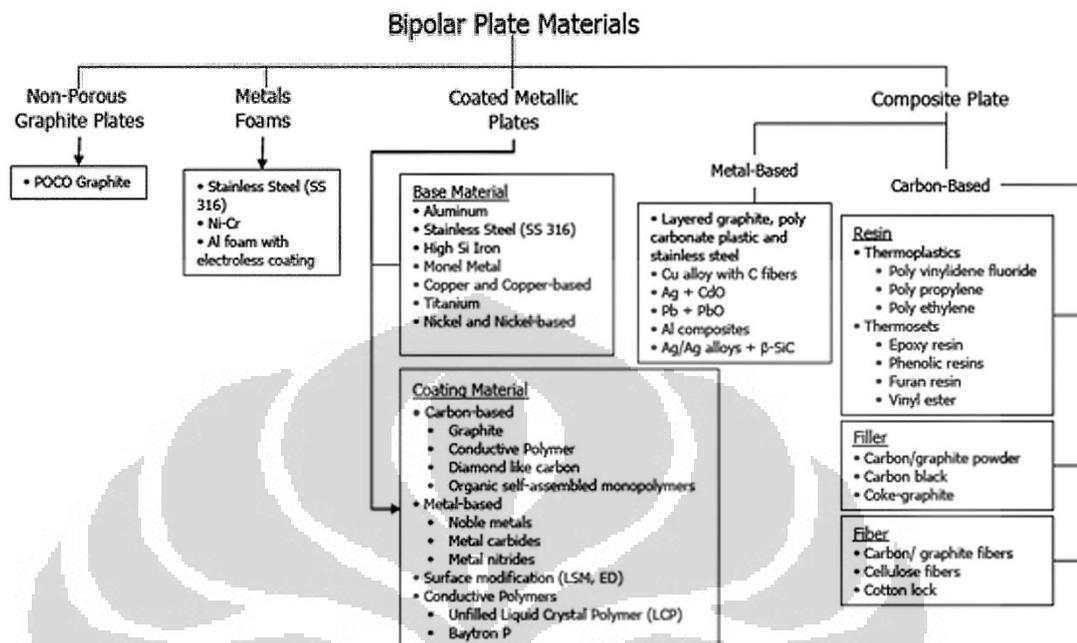
Sumber: *Presentation: Developments in Conducting Polymer Composites and Coating for Bipolar Plates. 2009*

**Gambar 2.2** Pelat Bipolar<sup>[17]</sup>

### 2.1.3. Material Penyusun Pelat Bipolar

Dalam mengembangkan pelat bipolar pada PEMFC para peneliti harus mencapai target lainnya yang dikeluarkan oleh DOE agar bisa diaplikasikan, yaitu dengan konduktifitas listrik yang tinggi ( $>100$  S/cm), kekuatan fleksural ( $>25$  MPa), dan densitas ( $<5$  g/cm<sup>3</sup>)<sup>[12]</sup>. Oleh karena itu perlu dilakukannya pemilihan material yang tepat agar dapat memenuhi target tersebut. Dalam pengembangannya material untuk pelat bipolar bervariasi mulai dari yang

berbahan dasar grafit, *metal foam*, pelapisan dengan logam hingga material komposit, sesuai dengan Gambar 2.2<sup>[11]</sup>.



Sumber: *Bipolar plates for PEM Fuel Cells: A Review. 2005*

**Gambar 2.2** Pilihan material pelat bipolar pada PEM *fuel cell stack*<sup>[11]</sup>

Sebaiknya material yang digunakan sebagai pelat bipolar juga harus memiliki ketahanan korosi yang baik karena kondisi operasi dari pelat bipolar pada pH 2-3 sehingga cenderung akan membentuk suatu lapisan oksida dan lapisan ini akan mengganggu katalis serta dapat meningkatkan ketahanan listrik dari pelat.

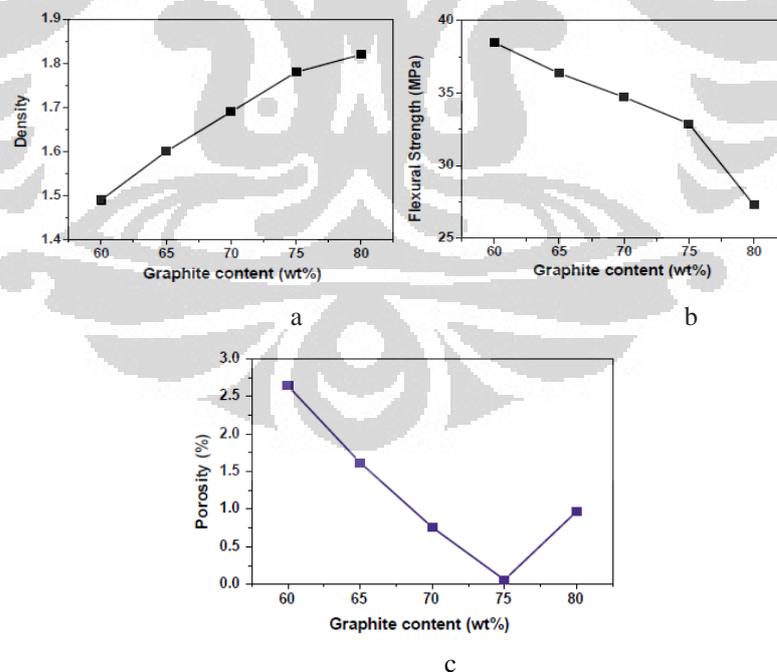
Kebanyakan pelat bipolar PEMFC dibuat dengan menggunakan grafit dan *stainless steel*<sup>[11]</sup>. Material grafit memiliki konduktivitas yang tinggi, lebih inert dan tahan terhadap korosi, tetapi harganya cukup mahal, baik dari material maupun biaya produksi dan begitu juga dengan *stainless steel* sehingga perlu dilakukan pengembangan material baru.

Material untuk pelat bipolar yang sekarang sedang populer dikembangkan yaitu material komposit yang berbasis karbon. Karbon itu sendiri khususnya grafit cenderung membentuk poros dan memiliki konduktivitas listrik yang tinggi sebesar 110-680 S/cm, tetapi kelemahannya bersifat *brittle* atau kekuatan fleksural <25 MPa sehingga sulit untuk dibuat tipis dengan target *Plug Power* (<3 mm)

**Universitas Indonesia**

tetapi hanya bisa hingga ketebalan 5-6 mm maka diperlukan material yang memiliki keuletan yang tinggi yaitu salah satunya polimer<sup>[10]</sup>. Namun, pada umumnya polimer memiliki konduktivitas listrik yang rendah sehingga perlu ditingkatkan dengan penambahan *filler* seperti *carbon black* berukuran partikel lebih kecil untuk mengurangi porositas<sup>[11]</sup>.

Namun, penambahan dari karbon ini harus dibatasi, sekitar 50-80% karena apabila kandungannya terlalu banyak akan menurunkan sifat mekanis dari pelat bipolar, baik kekuatan fleksural, densitas maupun porositas ditunjukkan pada Gambar 2.3<sup>[14]</sup>, dan juga akan mempersulit ketika dilakukan proses pencetakan<sup>[15,16]</sup>. Pada Gambar 2.3 juga terlihat bahwa, apabila penambahan yang dilakukan melebihi 80% dari keseluruhan fraksi volum, 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<sup>[25]</sup>, serta nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar akan bertambah sampai penambahan 70% grafit<sup>[14]</sup>.



Sumber: *Low-Cost Composite Materials for Polymer Electrolyte Fuel Cells Bipolar Plates*.1998

**Gambar 2.3** Pengaruh jumlah grafit terhadap densitas(a), kekuatan fleksural (b) dan porositas(c)<sup>[14]</sup>

## 2.2. Material Komposit

Material komposit adalah gabungan makroskopis dari dua atau lebih material yang berbeda, dimana diantaranya terbentuk suatu ikatan<sup>[17]</sup>. Hal ini yang membedakan komposit dengan paduan, dimana paduan dilakukan penambahan pada skala mikroskopis. Kombinasi antara beberapa material di dalam komposit yang baik, memberikan sifat-sifat yang lebih baik diantara material penyusunnya. Oleh karena itu, komposit diproduksi untuk mengoptimalkan sifat-sifat dari suatu material, seperti sifat mekanik (terutama kekuatan), sifat kimia atau fisik, optimalisasi sifat thermal (ekspansi termal, konduksi termal, pelunakan dan titik leleh) sebaik sifat elektriknya (konduktivitas listrik) dan sifat optiknya. Komposit digunakan tidak hanya pada aplikasi struktural, melainkan untuk aplikasi elektronik, thermal, dan dengan kondisi lingkungan lainnya.

Suatu komposit terdiri dari dua komponen penyusun, yaitu matriks dan penguat (*reinforcement*). Antara matriks dan penguat harus memiliki ikatan yang baik untuk menciptakan sifat yang baik pula. Selain itu, pada matriks harus terbentuk fasa terdispersi untuk meningkatkan kekuatan dan sifat-sifat lainnya. Fungsi dari matriks yang digunakan adalah sebagai berikut<sup>[17]</sup>:

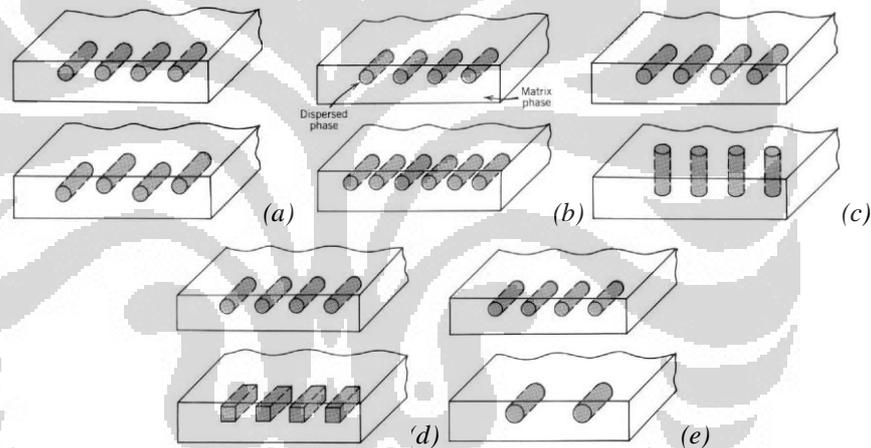
- a. Mengikat komponen didalam material komposit dan menentukan stabilitas terhadap temperatur operasi pada komposit
- b. Melindungi penguat dari keausan dan kontak dengan lingkungan
- c. Sebagai media transfer tegangan untuk membantu mendistribusikan tegangan
- d. Menyediakan ketangguhan dan kekuatan geser terhadap material komposit yang baik
- e. Mengatur orientasi dari penguat dan jarak pada struktur komposit

Sedangkan, penguat digunakan dalam suatu komposit untuk meningkatkan sifat dari material komposit yang dihasilkan dan memiliki kemampuan untuk ditempatkan pada arah pembebanan untuk meningkatkan sifat mekanisnya

Sifat dari sebuah material komposit dipengaruhi oleh beberapa faktor. Oleh karena itu, faktor-faktor tersebut harus diperhatikan dengan baik untuk membentuk sifat dari komposit yang memiliki sifat – sifat yang baik. Faktor-faktor yang mempengaruhinya adalah:

**Universitas Indonesia**

- a. Setiap komponen penyusun dari material komposit, yaitu matriks dan penguat berpengaruh secara langsung terhadap sifat akhir komposit yang dihasilkan. Ukuran, bentuk, orientasi, konsentrasi dan distribusi dari bahan penguat juga berpengaruh. Sebagai salah satu contohnya, bahan penguat yang berbentuk silinder atau tidak bersudut memiliki sifat mekanis yang lebih baik dibandingkan dengan penguat yang memiliki sudut pada sisinya. Hal ini dikarenakan, pada bagian sudut tegangan konsentrasinya lebih besar, sehingga sifat mekaniknya pun lebih buruk. Selain itu, kekuatan dari komposit juga dipengaruhi dari parameter bahan pengisinya, seperti distribusi, konsentrasi, orientasi, bentuk dan ukuran seperti pada Gambar 2.4<sup>[18]</sup>.



Sumber: ASM Handbook Vol 21, 2003

**Gambar 2.4** Parameter dari bahan pengisi pada komposit : Distribusi (a) ; Konsentrasi (b), Orientasi (c), Bentuk (d), dan Ukuran (e)<sup>[18]</sup>

Selain itu, komposisi penguat dan matriks komposit mempengaruhi karakteristik komposit . Semakin banyak komposisi material di dalam komposit, maka akan semakin besar material tersebut mendominasi sifat komposit. Pengaruh komposisi terhadap sifat komposit ini diturunkan dengan menggunakan *rule of mixture* memprediksi sifat akhir komposit<sup>[19]</sup>.

$$E_{cl} = E_f V_f + E_m V_m \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\rho = \frac{m_c}{v_c} = \frac{m_f+m_m}{V_f+V_m+V_v} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{\rho_f V_f + \rho_m V_m} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{1} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

$E_c$  = modulus elastisitas komposit [Pa]

$E_f$  = modulus elastisitas penguat [Pa]

$E_m$  = modulus elastisitas matriks [Pa]

$V_c$  = fraksi volum komposit

$V_f$  = fraksi volum penguat

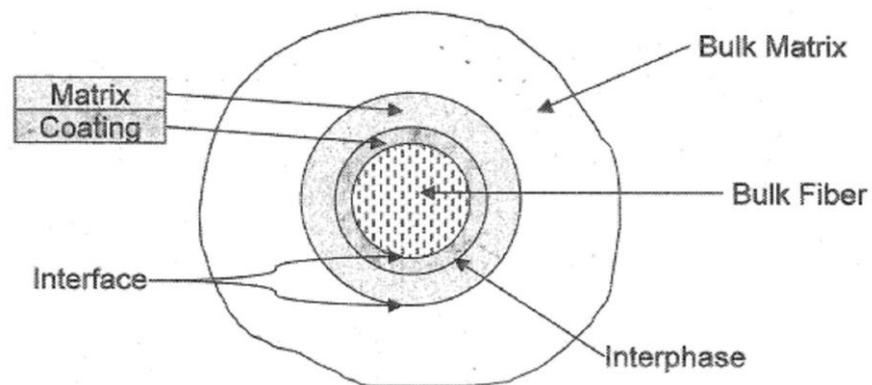
$V_m$  = fraksi volum matriks

$\rho_c$  = densitas komposit [ $\text{g/cm}^3$ ]

$\rho_f$  = densitas penguat [ $\text{g/cm}^3$ ]

$\rho_m$  = densitas matriks [ $\text{g/cm}^3$ ]

- b. Dalam material komposit, penguat dan matriks menghasilkan kombinasi sifat mekanik yang berbeda dengan sifat dasar dari masing-masing matriks maupun penguat karena adanya *interface* antara kedua komponen tersebut. *Interface* merupakan permukaan yang terbentuk diantara matriks dan penguat didalamnya yang berfungsi sebagai media transfer beban dari matriks dan penguat. Ikatan antara penguat dan matriks ini memiliki peran yang besar dalam penentuan sifat komposit. Semakin baik ikatan yang terbentuk (ditandai dengan semakin luasnya daerah permukaan kontak), maka semakin baik pula sifat akhir dari komposit yang terbentuk. Permukaan yang terbentuk tersebut akan mempengaruhi sifat-sifat dari komposit nantinya. Selain itu, diantara matriks dan penguat akan terbentuk fasa ketiga (*interphase*) yang memiliki sifat gabungan dari kedua fasa pembentuknya. Fasa ketiga dapat terbentuk apabila ikatan *interface* terbentuk dengan baik, sehingga setiap komponen mampu berdifusi seperti terlihat pada Gambar 2.5<sup>[18]</sup>.



Sumber: *ASM Handbook Vol 21, 2003*

**Gambar 2.5** Fenomena *interface* dan *interphase* pada komposit<sup>[18]</sup>

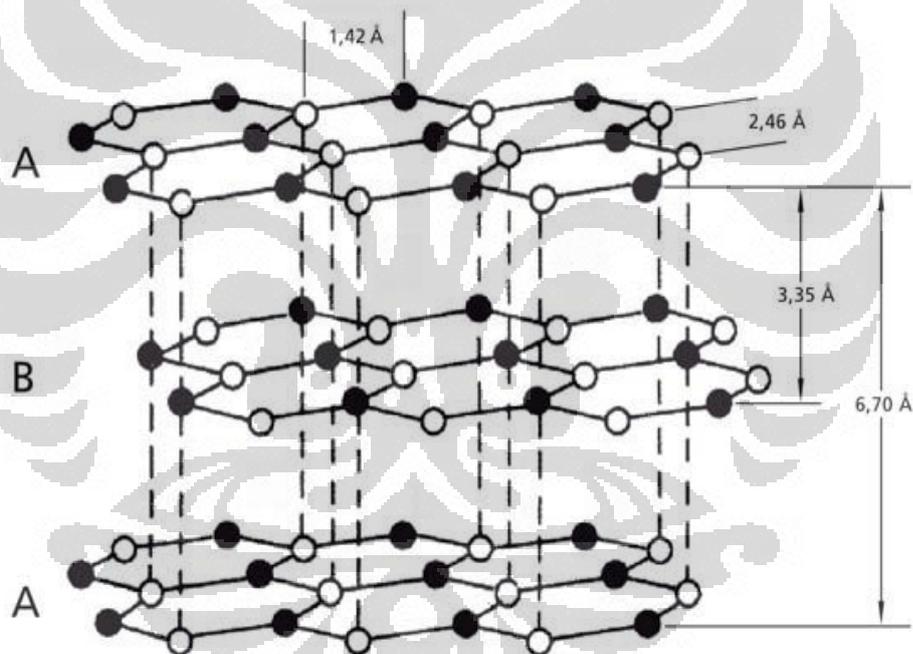
- c. *Wettability*, adalah kemampuan untuk membasahi permukaan penguat agar terjadinya suatu ikatan yang baik. *Wettability* dapat dilihat melalui sudut kontak (*contact angle*) dari pembasahan tersebut. Apabila sudut kontak di bawah  $90^{\circ}$ <sup>[17]</sup>, maka *wettability* dari ikatan antarmuka tersebut baik, sedangkan pembasahan tidak akan terjadi apabila sudut kontak lebih dari  $90^{\circ}$  (memerlukan suatu *wetting agent*). Pembasahan dipengaruhi oleh besar energi permukaan yang terbentuk. Agar dapat terjadi pembasahan yang baik, energi permukaan yang terjadi pada penguat harus lebih besar dari energi permukaan pada matriks.

### 2.2.1. Grafit EAF

Grafit merupakan salah satu jenis bentuk alotropi dari karbon yang terdiri dari susunan atom – atom karbon secara heksagonal yang membentuk kisi planar dengan ikatan kovalen dan antar lapisannya memiliki ikatan *Van der Waals* dengan ikatan antar lapisan yang lemah, ditunjukkan pada Gambar 2.6<sup>[11,19]</sup>. Perbedaan jenis ikatan ini menciptakan derajat anisotropik pada grafit. Perbedaan jenis ikatan ini berada dalam arah kristalografi yang berbeda. Sebagai contoh, grafit mampu berlaku sebagai pelumas padat sebagai akibat dari sifat anisotropik tersebut. Ikatan *Van der Waals* yang lemah memungkinkan tiap lapisan bergerak secara individual dan memberikan sifat lubrikasi yang baik.

Kisi yang terbentuk biasanya memiliki kekakuan yang tinggi, tetapi mudah mengalami pergeseran antar lapisan. Dengan struktur yang seperti ini, grafit akan menghasilkan sifat yang unik sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi, baik sebagai material utama maupun material pengisi (*filler*). Adapun sifat kimia dan fisika dari grafit adalah<sup>[11]</sup> :

- 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 diantara lapisan grafit
- Ramah terhadap lingkungan



Sumber: *Composite Material: Engineering and Science*. 2005

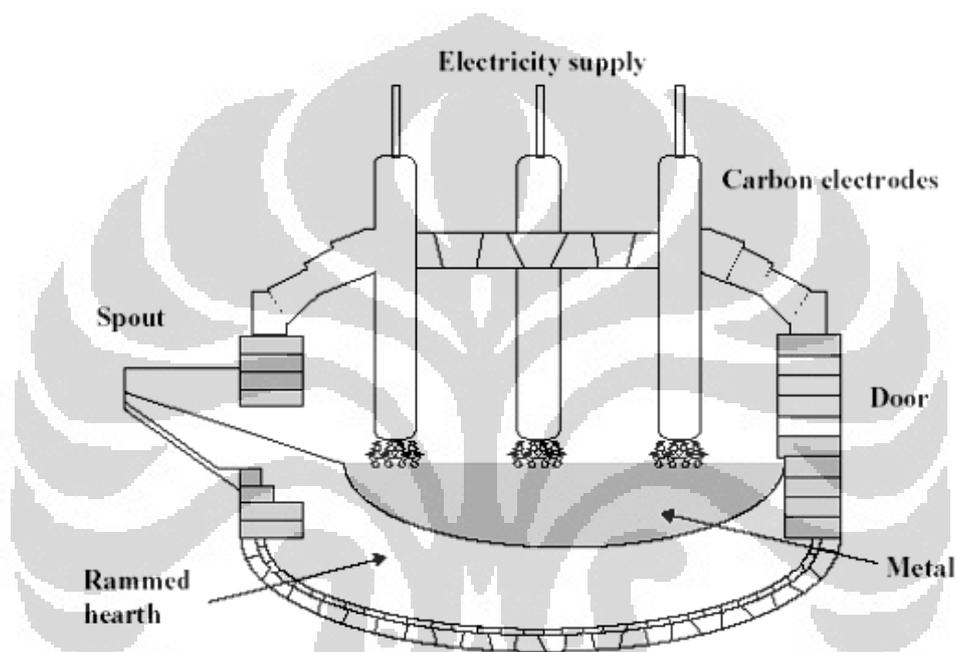
**Gambar 2.6** Struktur kristal grafit<sup>[19]</sup>

Biasanya, 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 aplikasi peleburan besi dan baja, khususnya dengan menggunakan tungku busur listrik, dibutuhkan suatu elektroda yang berfungsi untuk

**Universitas Indonesia**

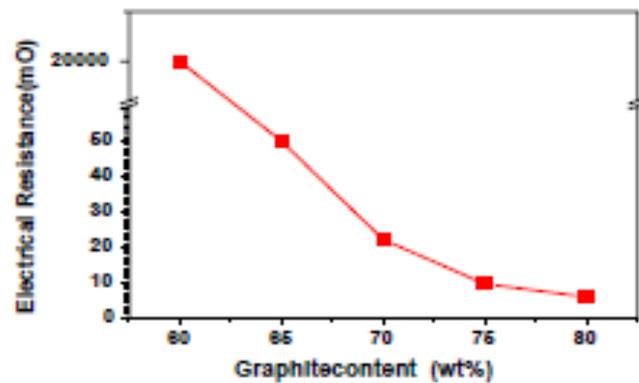
menghantarkan arus yang besar sehingga dapat melebur besi spons (*sponge iron*) dan besi tua (*scrap*) sebagai bahan baku utama pembuatan besi dan baja dibutuhkan material yang memiliki konduktivitas yang tinggi sehingga dapat menghasilkan busur listrik. Oleh karena itu, grafit dipilih sebagai material untuk aplikasi elektroda karena memiliki resistivitas 0,25 dari karbon. Grafit yang digunakan adalah grafit sintesis yang diperoleh dengan memanaskan karbon pada temperatur tinggi.



Sumber: <http://www.industrialmetalcasting.com/electric-arc-furnaces.html>. 2011

**Gambar 2.7** Tungku busur listrik<sup>[21]</sup>

Limbah grafit sisa proses peleburan besi baja tersebut dapat digunakan sebagai matriks komposit berbasis karbon karena harganya yang murah dibandingkan grafit sintesis lainnya dan juga mengurangi pencemaran lingkungan. Polimer dalam matriks grafit dapat berfungsi sebagai *binder* yang dapat mengurangi resistansi listrik dari komposit pelat bipolar, seperti yang terlihat pada Gambar 2.8<sup>[10]</sup>.



Sumber: *Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. 2006

**Gambar 2.8** Pengaruh jumlah grafit terhadap resistansi listrik<sup>[16]</sup>

Ukuran, arah dan bentuk dari partikel grafit juga akan mempengaruhi sifat 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 *flake* karena tegangan yang diterima oleh grafit akan tersebar merata di seluruh permukaannya sehingga regangan yang terjadi akan semakin kecil. Pada tabel dibawah ini terlihat bahwa semakin kecil ukuran dari partikel, akan menurunkan nilai konduktivitasnya, tetapi secara tidak langsung akan meningkatkan kekuatan fleksuralnya.

**Tabel 2.2** Pengaruh ukuran dan bentuk partikel dari grafit<sup>[22]</sup>

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		

Sumber: *Influence of Graphite Particle Size and Its Shape on Performance of Carbon Composite Bipolar Plate*. 2005

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

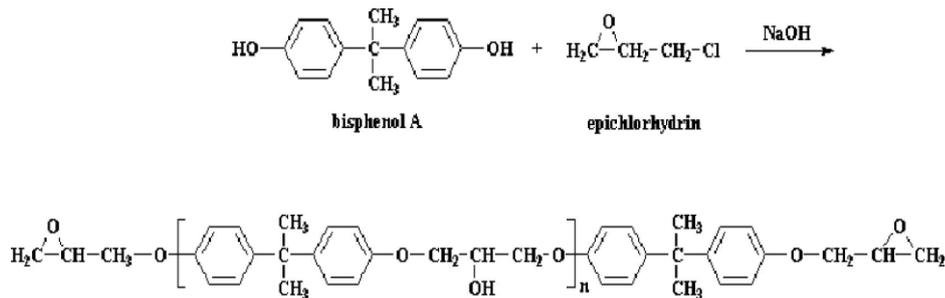
**Tabel 2.3** Sifat-sifat umum dari grafit <sup>[24]</sup>

<i>Hardness (Vickers) :</i>	VHN10 = 7 - 11 kg/mm <sup>2</sup>
<i>Modulus of Elasticity :</i>	4.8 Gpa
<i>Density (calculated) :</i>	2.26 g/cm <sup>3</sup>
<i>Molecular Weight :</i>	12.011 g/mol
<i>Specific Surface Area :</i>	1.00 m <sup>2</sup> /g
Kemurnian	>99.5% C
Ukuran bubuk	50 μm

Sumber: *Preparation, electrical, mechanical and thermal properties of composite bipolar plate for a fuel cell. 2004*

### 2.2.2. Epoksi

Epoksi merupakan salah satu jenis termoset yang tidak dapat menerima siklus pemanasan dan pendinginan secara kontinu, seperti jenis termoplastik. Ketika dipanaskan pada tahap awal, polimer ini akan melunak dan mampu mengalir di dalam cetakan. Namun, pada temperatur yang tinggi, epoksi akan mengalami reaksi kimia sehingga menjadi keras dan tidak mampu kembali ke bentuk semula dan jika dipanaskan ulang, epoksi tidak mampu melunak kembali melainkan akan terdegradasi<sup>[23]</sup>. Epoksi juga merupakan salah satu jenis polimer yang mengalami proses *curing*, baik secara polimerisasi maupun *crosslink* ketika dicampur dengan unsur katalis atau *hardener*. Biasanya epoksi resin dihasilkan dari reaksi antara *epichlorohydrin* dan *bisphenol-A*, seperti yang terlihat pada Gambar 2.9<sup>[10]</sup>.



Sumber: *Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*.2006

**Gambar 2.9** Reaksi pembentukan epoksi<sup>[16]</sup>

Struktur kimia dan berbagai macam proses reaksi *curing* akan mempengaruhi sifat dari epoksi. Pada umumnya, epoksi memiliki sifat, sebagai berikut<sup>[24]</sup> :

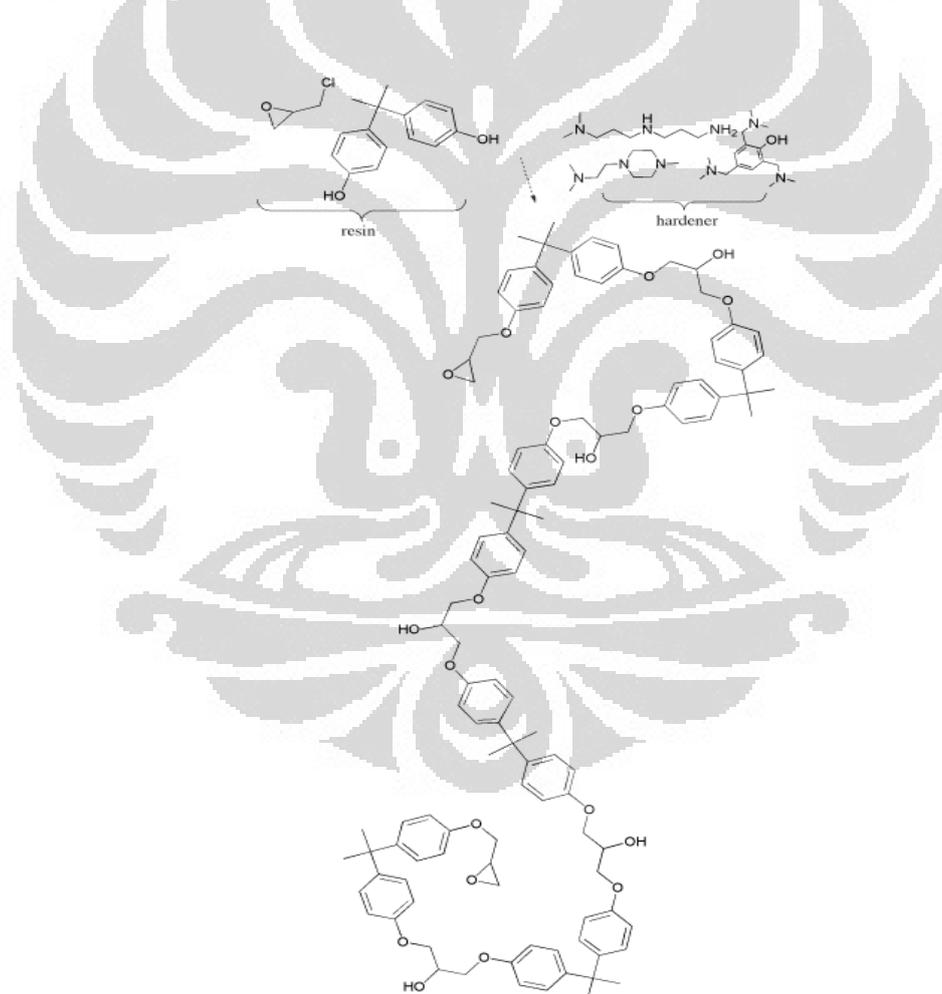
- a. Kekuatan adesi yang sangat baik
- b. Ketahanan yang baik terhadap panas dan zat kimia lain
- c. *Moisture Resistance*
- d. Sifat mekanis yang cukup baik (tergantung jenis Epoksi tersebut)
- e. Sifat *electrical insulating* (isolator listrik) yang sangat baik
- f. Dengan mudah dapat memperbaiki sifatnya, misalnya konduktivitas listrik dapat mudah ditingkatkan dengan penambahan aditif/filler yang mampu menghantarkan listrik dengan baik.

Pada material komposit, epoksi sering digunakan sebagai material utama atau matriks dibandingkan dengan polimer lainnya. Hal ini dikarenakan epoksi memiliki daya isi dan menjadi penguat yang baik pada sistem komposit. Selain itu reaksi yang terjadi antara epoksi resin dengan unsur lain tidak memerlukan daya pembasahaan yang banyak sehingga proses pencampuran pun lebih sederhana. Namun, epoksi bersifat isolator sehingga diperlukan penambahan material lain untuk meningkatkan konduktivitasnya, bila digunakan pada aplikasi PEMFC. Kelebihan lain dari epoksi yaitu kemampuan pemrosesannya (*processability*), harganya yang murah, ketahanan korosi tinggi, sifat mekanis dan termal yang baik, serta penyusutan (*shrinkage*) yang rendah pada saat *curing*<sup>[6]</sup>.

Resin epoksi mengandung *strained three-membered epoxide rings* dan berbagai reaktan reaktif dan *cross-linking agents*. Sifat akhir dari termoset tidak

hanya tergantung pada struktur dari resin epoksi tetapi juga jenis dan jumlah dari *curing agents*. Kecepatan *curing* dari sistem epoksi dikontrol dari proses *curing*, jenis dan konsentrasi dari katalis, serta polimerisasi kimia. Posisi dari *epoxide rings* merupakan faktor penambahan penting dalam menentukan reaktivitas epoksi<sup>[6]</sup>.

Pada komponen pelat bipolar, epoksi resin dicampurkan dengan *hardener* dengan tujuan untuk menghasilkan reaksi *curing* sehingga diperoleh matriks polimer yang kuat dan mempunyai sifat mekanis yang baik. Biasanya, proses *curing* yang dilakukan dengan pemberian panas akan menghasilkan polimer yang tahan terhadap kimia dan panas yang baik daripada proses *curing* pada temperatur ruang<sup>[24]</sup>. Adapun reaksi antara epoksi resin dan *hardener* adalah sebagai berikut.



Sumber: *Review of Bipolar Plate in PEM Fuel Cell: Flow-field designs*. 2004

**Gambar 2.10** Reaksi antara epoksi resin dan *hardener*<sup>[24]</sup>

### 2.2.3. Carbon Black

*Carbon black* merupakan suatu partikel yang terbentuk dari karbon sebagai unsur penyusun utama, yang memiliki mikrostruktur hampir sama dengan grafit. Kebanyakan *carbon black* dihasilkan dari proses pembakaran tidak sempurna dari hidrokarbon seperti *coal tar*, *ethylene cracking tar*, dan sejumlah kecil dari minyak sayur. Biasanya, *carbon black* digunakan sebagai aditif yang dapat meningkatkan konduktivitas dari polimer<sup>[25]</sup>.

*Carbon black* adalah suatu bentuk karbon amorf yang memiliki rasio luas permukaan yang tinggi terhadap volum, namun lebih rendah dibandingkan dengan karbon aktif<sup>[26]</sup>. Semua *carbon black* biasanya memiliki oksigen *chemisorbed* kompleks (*karboksilat*, *quinonic*, *lactonic*, kelompok *fenolik* dan lain-lain) pada permukaannya, tergantung proses manufaktur.

Fungsi dari *carbon black* ditentukan dari campuran antara kimia karbon, energi permukaan, dan partikel. Umumnya, sifat *carbon black* berhubungan dengan proses pelarutan yang bergantung pada ukuran dan struktur partikel<sup>[27]</sup>.

a. Ukuran Partikel / Luas permukaan

Ukuran dari partikel dan luas permukaan akan menentukan sifat yang dihasilkan dari *carbon black*. Ukuran partikel yang kecil akan memiliki luas permukaan yang tinggi sehingga akan lebih mudah untuk dibasahi dan dapat dengan mudah larut ketika dicampur dengan material lain daripada *carbon black* yang memiliki ukuran yang besar. Selain itu, ukuran partikel yang kecil akan menghasilkan konduktivitas listrik yang tinggi.

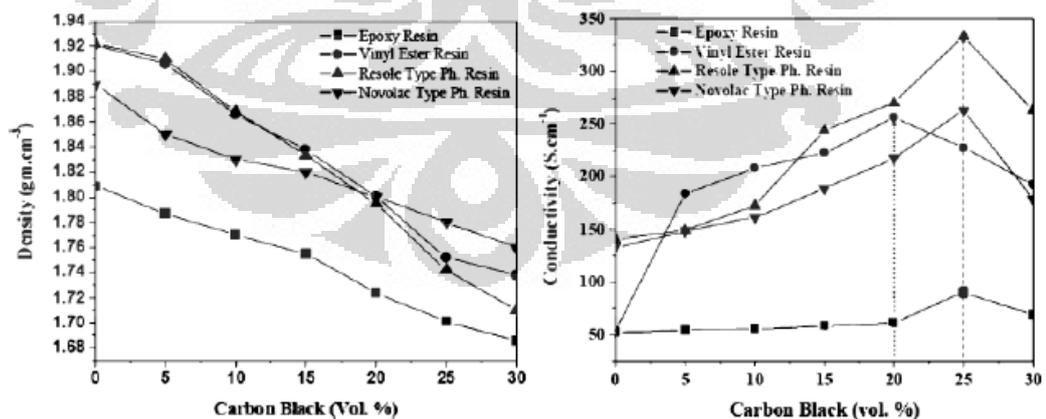
b. Struktur

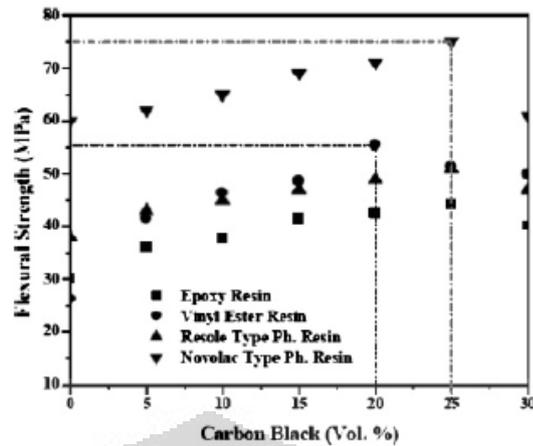
Struktur *carbon black* yang besar akan lebih mudah terdispersi daripada struktur yang kecil. Struktur yang lebih besar menunjukkan bidang terpadat yang rendah, sehingga akan menyediakan ruang yang lebih besar bagi resin polimer ketika dicampurkan untuk mengisi bidang kosong dari karbon dan membentuk ikatan kimia yang baik. Struktur partikel yang lebih besar juga penting dalam pencapaian konduktivitas listrik yang tinggi. *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*. 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<sup>[48]</sup>.

Pada pelat bipolar karbon komposit, perlu dilakukan penambahan suatu material konduktif dengan tujuan untuk meningkatkan konduktivitas dari pelat sehingga dapat menghantarkan listrik dalam *fuel cell*. Biasanya material tersebut adalah *carbon black* karena memiliki konduktivitas yang baik dan harga yang cukup rendah, dibandingkan dengan *carbon active*. Pada sistem komposit, *carbon black* akan mengikat polimer dan membentuk jaringan antar karbon sehingga dengan mudah dapat mengalirkan arus listrik dan mengurangi efek isolator dari polimer<sup>[50]</sup>.

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 dan densitas yang dihasilkan juga akan meningkat. Gambar 2.11<sup>[11]</sup> menunjukkan pengaruh penambahan *carbon black* terhadap sifat pelat bipolar yang dibuat dengan metode *compression molding* pada tekanan  $\sim 100 \text{ kg/cm}^2$ .

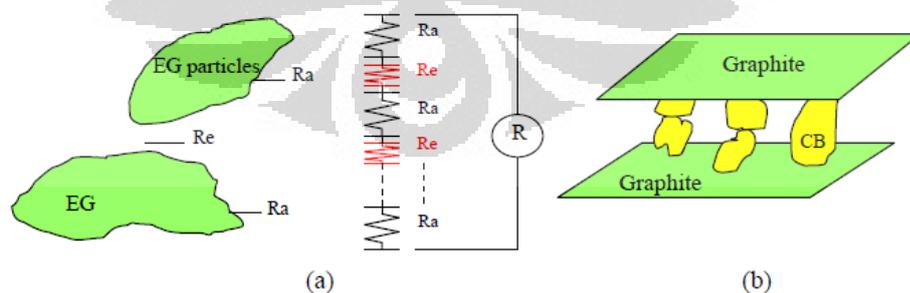




Sumber: *Effect of Resin Matrix Precursor on the Properties of Graphite Composite Bipolar Plate for PEM Fuel Cell*. 2007

**Gambar 2.11.** Pengaruh Penambahan *Carbon Black* terhadap Densitas, Konduktivitas Listrik, dan Kekuatan Fleksural<sup>[11]</sup>

Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.12<sup>[6]</sup>, 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  $R_e$ <sup>[6]</sup>. 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.



Sumber: *Thesis : Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. 2008

**Gambar 2.12.** 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  $R_e$ <sup>[6]</sup>

### 2.2.4. Metanol

Metanol yang digunakan berfungsi sebagai pelarut dan pengencer untuk epoksi resin serta epoksi *hardener* (yang awalnya sangat kental), sehingga epoksi dapat bercampur dengan grafit. Dengan adanya metanol, daya pembasahan epoksi terhadap grafit meningkat dan dapat membasahi seluruh permukaan grafit sehingga ikatan yang terbentuk antara epoksi dan grafit menjadi lebih kuat.

Tabel 2.4 Sifat umum metanol<sup>[28]</sup>

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

Sumber: *Development and Modeling of Thermally Conductive Polymer/Carbon Composites*. 1999

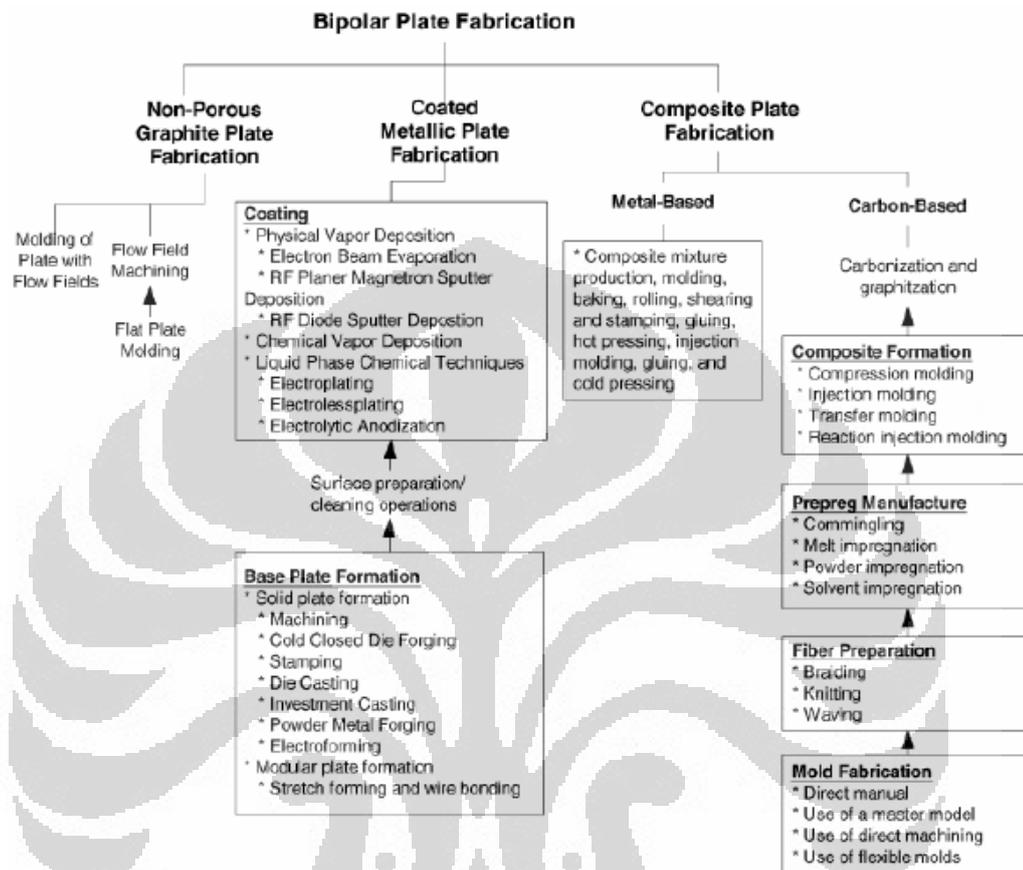
### 2.3. Metode Fabrikasi Pelat Bipolar

Pelat bipolar dapat difabrikasi dalam dua tahapan proses. Tahap pertama yaitu penyetakan sebuah pelat datar grafit/resin komposit. Tahap kedua yaitu pembuatan *gas flow field* pada pelat bipolar melalui proses permesinan. Tahapan proses tersebut memiliki beberapa kelemahan yaitu biaya permesinan *gas flow field* yang mahal, kecepatan produksi yang rendah, kehilangan material (*material loss*) yang tinggi, dan biaya mesin perkakas yang mahal<sup>[47]</sup>.

Oleh karena itu, target lainnya dalam pembuatan pelat bipolar selain sifat dari materialnya itu sendiri juga pemilihan material berdasarkan pada biaya dan kecepatan dalam fabrikasinya. Terdapat berbagai jenis metode fabrikasi yang dapat digunakan dalam pembuatan pelat bipolar, khususnya material komposit grafit-polimer, seperti terlihat pada Gambar 2.13.<sup>[11]</sup> Berdasarkan gambar tersebut salah satu metode fabrikasi yang dapat digunakan untuk material grafit-polimer komposit yaitu *compression molding* yaitu dengan bakalan berupa campuran

Universitas Indonesia

partikel grafit atau karbon dalam bentuk serbuk yang tidak diharuskan memiliki fluiditas yang baik sehingga memudahkan dalam fabrikasi<sup>[6]</sup>.



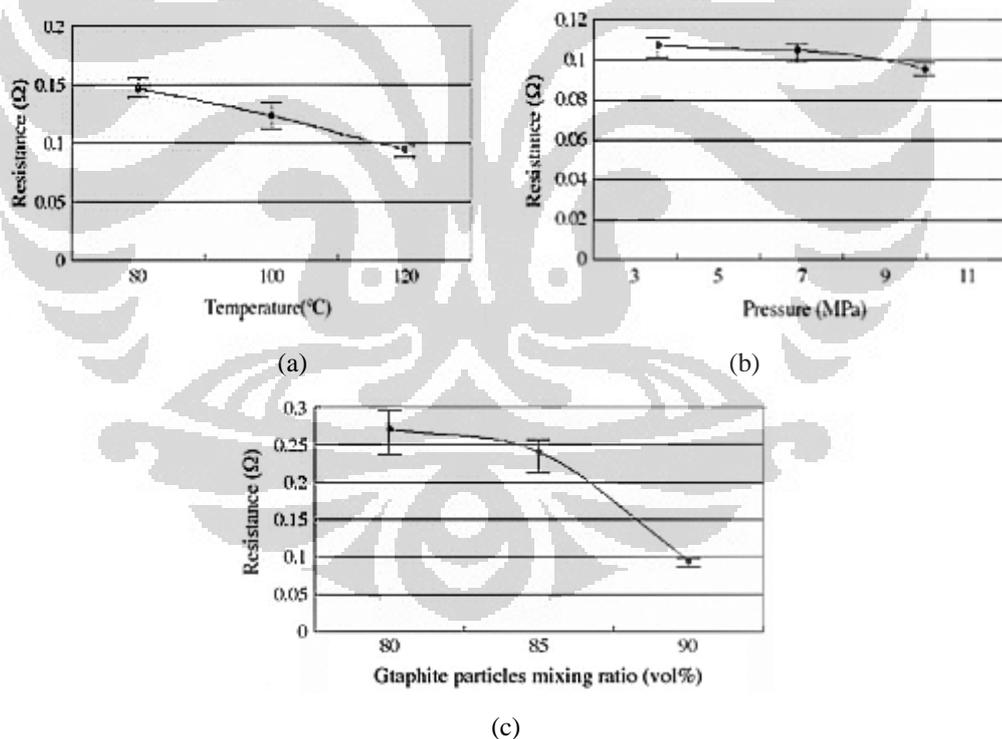
Sumber: *Bipolar plates for PEM Fuel Cells : A Review*. 2005

**Gambar 2.13** Pilihan metode fabrikasi material pelat bipolar<sup>[11]</sup>

Berdasarkan kecepatannya *compression molding* lebih baik, apalagi jika yang digunakan polimer termoset yang memiliki monomer yang membentuk *cross linking* apabila diberi panas hingga temperatur *curing* akan cenderung menjadi lebih *rigid* atau *short cycle time* serta *cost-effective mass production* sehingga dapat diangkat dari *mold* dalam keadaan panas tanpa proses pendinginan terlebih dahulu, sedangkan polimer termoplastik memerlukan pendinginan untuk rekristalisasi<sup>[6,9]</sup>. Kedua proses tersebut dapat memperendah biaya fabrikasi karena material grafit-polimer komposit dengan fabrikasi menggunakan proses tersebut tidak perlu machining yang rumit dalam pembuatan gas channel. Kelebihan dari *compression molding* yaitu bakalan tidak perlu memiliki fluiditas yang baik<sup>[6]</sup>.

Universitas Indonesia

Konduktivitas listrik yang baik merupakan faktor paling penting yang harus dimiliki oleh suatu pelat bipolar. Nilai dari konduktivitas dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti komponen penyusun yang digunakan pada material komposit, proses pencampuran bakalan dan parameter proses pada saat proses pencetakan pelat<sup>[7]</sup>. Proses pembuatan pelat bipolar grafit-polimer komposit dapat dilakukan dengan proses pencetakan melalui *compression molding* atau *injection molding*. Pemilihan parameter proses, yaitu tekanan dan temperatur juga memiliki peranan penting terhadap sifat yang dihasilkan, terutama sifat pelat bipolar dalam mengalirkan arus listrik<sup>[6]</sup>. Diperlukan adanya pemilihan besar temperatur dan tekanan proses yang optimal untuk menghasilkan sifat konduktivitas listrik yang baik. Pada Gambar 2.14, menunjukkan pengaruh besar temperatur, tekanan proses dan perbandingan pencampuran grafit terhadap nilai resistivitas dari suatu pelat bipolar yang terbuat dari komposit epoksi dengan partikel grafit konduktif<sup>[7]</sup>.



Sumber: *Evaluation of Graphite Composite Bipolar Plate for PEM (Proton Exchange Membrane) Fuel Cell: Electrical, Mechanical, and Molding Properties*. 2006

**Gambar 2.14** Grafik pengaruh variabel proses terhadap resistivitas: Tekanan (a), Temperatur (b), dan Rasio Pencampuran (c)<sup>[7]</sup>

Pada Gambar 2.12 (a) menunjukkan nilai resistansi dari peningkatan rasio pengadukan partikel grafit. Pada percobaan tersebut diestimasi bahwa penurunan resistansi diakibatkan karena penurunan jarak antar partikel dan peningkatan dari kerapatan massa grafit. Sedangkan pada Gambar 2.12 (b) menunjukkan nilai resistansi dari peningkatan tekanan proses fabrikasi. Pada percobaan tersebut juga diestimasi penurunan sedikit dari resistansi diakibatkan karena penurunan jarak antar partikel dan peningkatan dari tekanan. Sedangkan pada Gambar 2.12 (c) menunjukkan nilai resistansi dari peningkatan temperatur proses fabrikasi. Pada percobaan tersebut juga diestimasi penurunan resistansi dapat diakibatkan karena peningkatan aktivitas molekular dan penurunan viskositas dari resin epoksi pada temperatur yang lebih tinggi<sup>[7]</sup>.

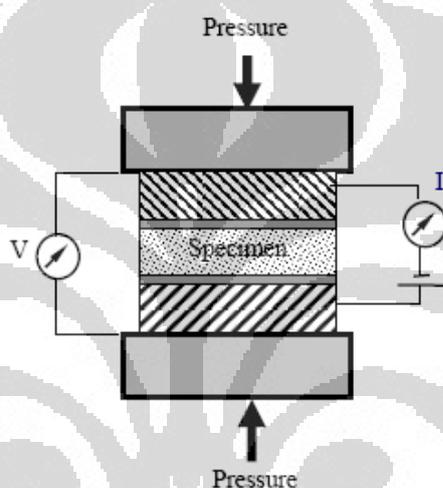
#### **2.4.Sifat Mekanis Pelat Bipolar**

Pelat bipolar harus memiliki sifat mekanis yang baik untuk dapat menyusun membran dan elektroda, serta menahan *clamping force* pada saat perakitan. Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya sulit untuk mendapat material pelat bipolar yang memiliki konduktivitas yang tinggi dan sifat mekanis yang cukup sekaligus. Hal ini disebabkan karena material konduktif biasa digunakan seperti *carbon black* yang sangat rapuh. Material yang sangat berperan dalam meningkatkan sifat mekanis dari pelat bipolar yaitu polimer dalam penelitian ini yang digunakan epoksi.

Material grafit memiliki gugus yang reaktif seperti karboksil dan epoksid pada permukaannya yang apabila bereaksi dengan epoksi akan membentuk daya adesi yang kuat pada interfasa, sehingga dapat meningkatkan sifat mekanis. Sedangkan pada *carbon black* tidak terdapat gugus yang reaktif pada permukaannya dan juga luas permukaannya yang kecil (karena biasanya *carbon black* yang digunakan ukurannya lebih kecil dari grafit). Sehingga *carbon black* tersebut akan bergabung antara partikel grafit sehingga akan menurunkan daya adesi interafsa antara grafit dan epoksi<sup>[6]</sup>.

## 2.5.Sifat Listrik Pelat Bipolar

Konduktivitas listrik yang tinggi pada pelat bipolar sangat dibutuhkan untuk meningkatkan efisiensi dari *fuel cell stack*. Konduktivitas listrik yang tinggi dapat mencegah terjadinya penurunan tegangan yang sangat besar pada tiap pelat pada *fuel cell stack*. Ada tiga jenis konduktivitas yang diukur melalui metode four point probe yaitu *in-plane*, *through plane* dan *area specific resistance*. Dengan konduktivitas listrik *through-plane* yang sangat penting untuk aplikasi material pelat bipolar, yang ditunjukkan pada Gambar 2.15<sup>[6]</sup>.



Sumber: *Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. 2008

**Gambar 2.15** Skema pengujian through-plane konduktivitas listrik<sup>[6]</sup>

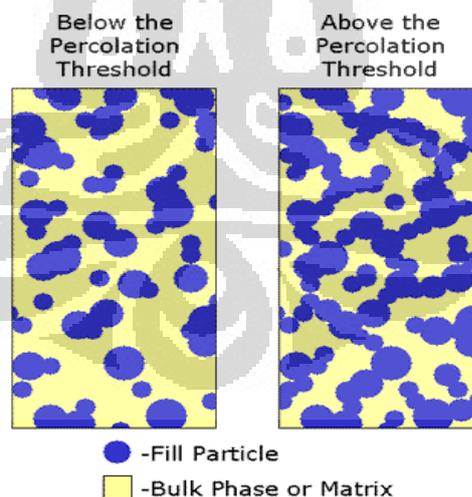
Terdapat beberapa kemungkinan variasi mekanisme yang digunakan untuk menggambarkan perilaku konduktivitas (elektron atau transpor muatan) dari komposit grafit-polimer yaitu teori perkolasi, *quantum mechanical tunneling* dan ekspansi termal. Teori perkolasi menjelaskan pembentukan dan struktur tiga dimensi *conducting network* ketika pengisi konduktif dicampurkan dengan polimer. Dengan peningkatan jumlah pengisi konduktif maka resistivitas menurun dan terjadi transisi dari isolator menjadi konduktor. Penurunan resistivitas tersebut menunjukkan bahwa terjadi agregasi membentuk jaringan. Fenomena tersebut merupakan perkolasi transisi dengan volum fraksi pengisi tertentu yang membatasi antara isolator dan konduktor. Hal tersebut tergantung pada sifat fisik-

**Universitas Indonesia**

kimia dari polimer dan pengisi, seperti ukuran partikel, porositas, luas permukaan, serta kondisi pada saat pemrosesan komposit seperti temperatur, jenis pelarut<sup>[41]</sup>.

Pada material komposit yang menggunakan polimer konduktif listrik, terdapat fenomena non-linear yaitu efek *positive temperature coefficient* (PTC) yang menunjukkan peningkatan resistivitas yang tajam dengan adanya pemanasan, sehingga mengkomversi material konduktor listrik menjadi isolator dengan jangkauan temperatur yang sempit. Peningkatan resistivitas tersebut tergantung pada kristalinitas polimer, morfologi partikel pengisi, optimasi proses fabrikasi komposit dan sejarah termal dari sampel. Deskripsi kualitatif dari perilaku PTCR memperlihatkan bahwa, konduksi listrik terjadi melalui *tunneling* antara agregat *carbon black*. Pada temperatur leleh kristalin pada polimer terjadi ekspansi sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan jarak *tunneling* antara agregat dan meningkatkan resistansi listrik<sup>[6]</sup>.

Beberapa peneliti yaitu Bangwen Zhang et al.<sup>[37]</sup>, M.L Homer et al.<sup>[41]</sup>, G. Droval et al.<sup>[40]</sup> menyebutkan bahwa *positive temperature coefficient* (PTC) dan *negative temperature coefficient* (NTC) pada berpengaruh resistansi komposit polimer, yang biasanya terjadi pada jumlah pengisi konduktif yang sedikit di atas konsentrasi batas perkolasi.

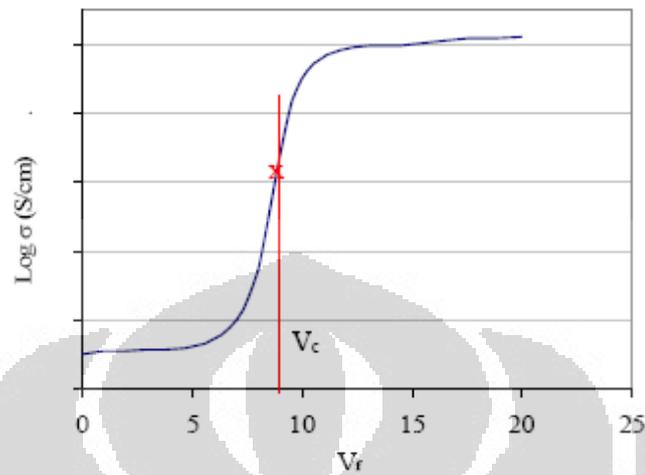


Sumber: <http://www.tda.com/eMatls/composites.htm>.2011

**Gambar 2.16** Fenomena perkolasi penyebaran partikel dalam matriks<sup>[45]</sup>

Fenomena dari batas perkolasi tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 2.16<sup>[45]</sup> dan 2.17<sup>[6]</sup>. Setelah melewati batas perkolasi partikel-partikel grafit

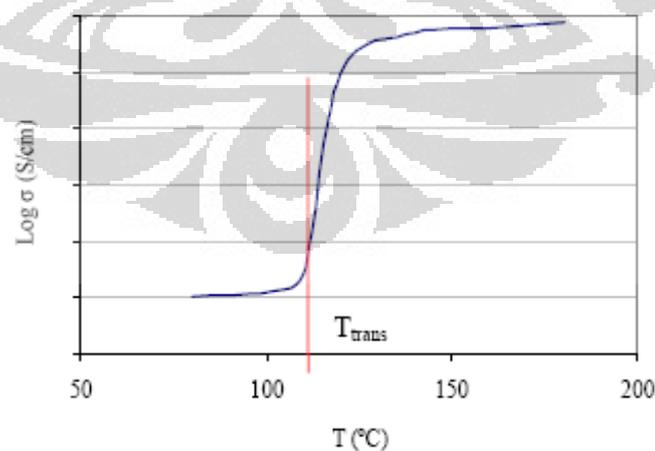
maupun carbon black akan membentuk jalur konduktif atau *tunelling electron*, sehingga konduktivitas listrik material komposit tersebut meningkat.



Sumber: *Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. 2008

**Gambar 2.17** Skema ilustrasi konsentrasi batas perkolasi dari konduktif komposit polimer.  $v_c$  konsentrasi batas perkolasi<sup>[6]</sup>

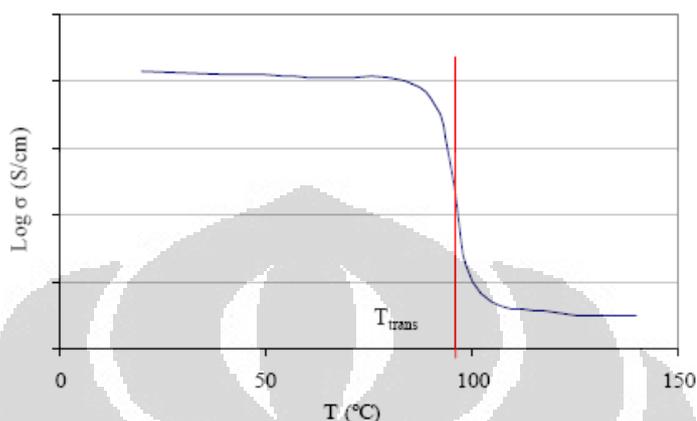
Dengan konduktivitas listrik meningkat setelah melewati temperatur transisi matriks polimer atau NTC, bukan termasuk temperatur transisi gelas ataupun temperatur leleh. Fenomena tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 2.18<sup>[6]</sup>.



Sumber: *Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. 2008

**Gambar 2.18** Skema ilustrasi pengaruh NTC pada resistivitas listrik<sup>[6]</sup>

Dengan konduktifitas listrik menurun setelah melewati temperatur transisi matriks polimer atau PTC, bukan termasuk temperatur transisi gelas ataupun temperatur leleh. Fenomena tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 2.19<sup>[6]</sup>.



Sumber: *Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. 2008

**Gambar 2.19** Skema ilustrasi pengaruh PTC pada resistivitas listrik<sup>[6]</sup>

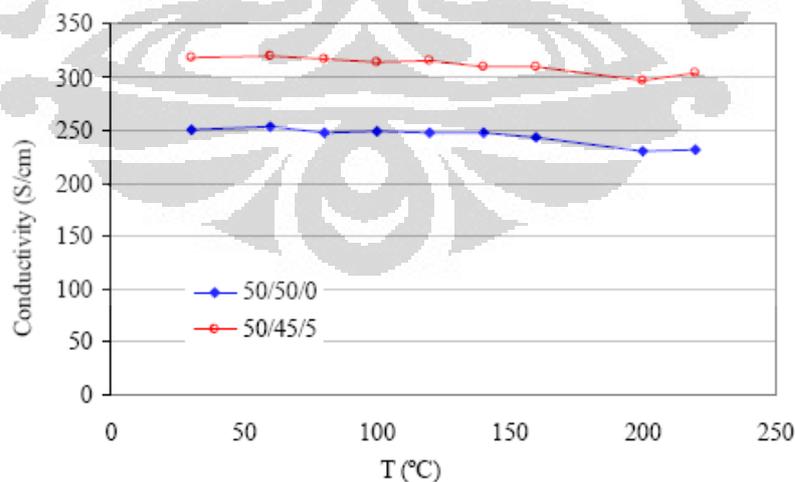
Pengaruh PTC pada resistivitas listrik apabila temperatur mendekati temperatur transisi. Koefisien ekspansi termal pada hampir semua polimer meningkat signifikan dengan temperatur mendekati temperatur transisi. Ketika jumlah pengisi sedikit di atas batas konsentrasi perkolasi, arah konduktif elektron mulai terbentuk karena adanya kontak fisik antara partikel konduktif. Jaringan konduktif antara partikel akan hancur akibat ekspansi termal yang tinggi pada temperatur yang mendekati temperatur transisi. Oleh karena itu, resistivitas listrik meningkat tajam dengan peningkatan temperatur<sup>[6]</sup>.

Pengaruh NTC pada konduktivitas listrik komposit polimer konduktif jarang terjadi. Dalam beberapa kasus, komposit polimer konduktif menunjukkan pengaruh PTC pada resistivitas listrik ketika temperatur meningkat mendekati temperatur transisi gelas. Hal tersebut diikuti oleh pengaruh NTC dengan terus berlangsungnya peningkatan temperatur pada LDPE yang diisi dengan CB dan CF. Sehingga, fenomena PTC/NTC terjadi pada material yang sama yaitu pertama resistivitas listrik meningkat dengan meningkatnya temperatur mendekati temperatur transisi gelas dari polimer dan kemudian menurun drastis pada

**Universitas Indonesia**

temperatur yang lebih tinggi dari temperatur transisi gelas. Partikel konduktif tidak terhubung dengan arah konduktif elektron karena adanya ekspansi termal pada temperatur sekitar temperatur transisi gelas, tetapi partikel konduktif tersebut akan mengalami reagregat membentuk arah konduktif elektron pada temperatur yang lebih tinggi, sehingga menghasilkan pengaruh NTC<sup>[6]</sup>.

Pada PEMFC yang beroperasi pada 60-140°C<sup>[6]</sup>, sangat perlu dilakukan karakterisasi konduktivitas listrik dari komposit pada keseluruhan temperatur operasi untuk meyakinkan material pelat tersebut dapat digunakan untuk menjaga tingginya konduktivitas listriknya. Pada penelitian, dengan komposisi epoksi (EP): *expanded graphite* (EG): *carbon black* (CB) = 50:50:0 dan 50:45:5 menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan konduktivitas listrik yang signifikan, tetapi hanya sedikit menurun pada temperatur di atas 200°C, tidak terdapat pengaruh NTC dan PTC pada resistivitas listrik. Pada kasus ini, diketahui bahwa jumlah pengisi yang digunakan ternyata lebih tinggi dibandingkan batas konsentrasi perkolasi kedua komposit. Dan juga EG memiliki struktur jaringan layer sehingga tidak mudah rusak dengan adanya termal ekspansi. Selain itu, juga diketahui bahwa ekspansi termal dengan pengisi yang banyak sangat rendah, walaupun temperatur yang digunakan lebih tinggi dari T<sub>g</sub>, yang ditunjukkan pada Gambar 2.20<sup>[6]</sup>.



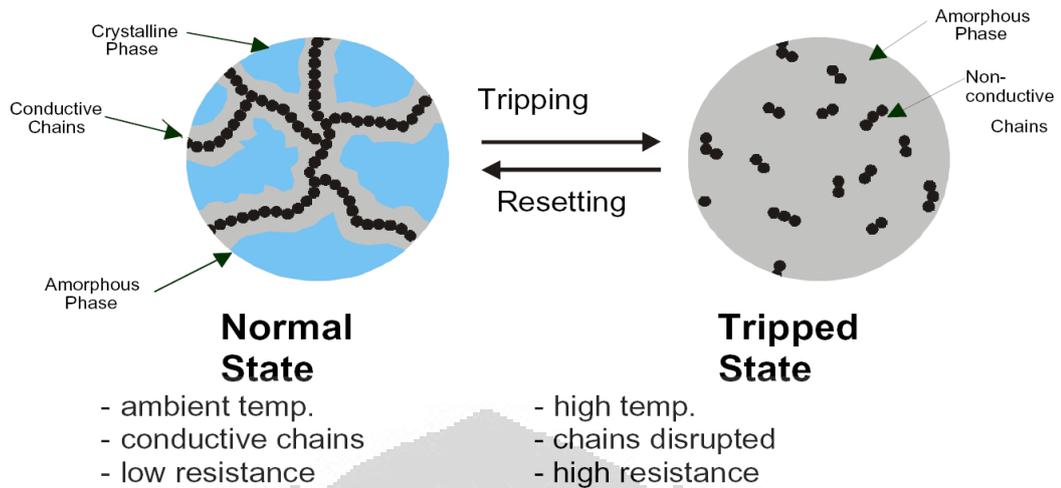
Sumber: *Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells. 2008*

**Gambar. 2.20** Fungsi in-plane konduktivitas listrik dan temperatur komposit epoksi<sup>[6]</sup>

Pada beberapa penelitian salah satunya Hedva Bar et al. yang melakukan penelitian tentang perilaku listrik dan sistem termoset dengan menggunakan epoksi dan *metal plated filler* yaitu ekstrim efek PTC pada komposit epoksi-tembaga yang dilapisi mika meningkatkan resistivitas lebih dari sembilan kali lipat. Efek PTC tersebut tidak diikuti oleh efek NTC pada temperatur di atas PTC. Hal tersebut dapat disebabkan karena terjadi *crosslink* pada matriks epoksi yang sangat tinggi sehingga menghalangi partikel *filler* bergerak selama tahap pemanasan. Pada penelitian tersebut juga didapat bahwa kandungan logam yang lebih rendah dapat memperbaiki adesif konduktif atau komposit<sup>[6]</sup>.

Dengan menggunakan analisis TMA, didapat hubungan kebalikan antara koefisien termal ekspansi dan temperatur PTC. Dan juga tidak terdapat hubungan antara temperatur transisi gelas dan temperatur PTC. Perbedaan termal ekspansi yang besar antara polimer dan logam pada penelitian Hedva Bar et al. menyebabkan terjadi dekstruksi dari jaringan konduktif (*conducting network*) pada saat pemanasan dan menghasilkan temperatur PTC.

Selain itu, konduktivitas listrik dipengaruhi oleh temperatur karena terjadinya perubahan kristalinitas dari polimer yang digunakan. Pada temperatur ruang polimer tertentu masih dalam fasa kristalin yang dapat membentuk rantai konduktif melewati struktur amorf dalam polimer. Pada temperatur mendekati temperatur leleh dari polimer, fasa kristalin akan meleleh menjadi amorf, dengan adanya peningkatan volum dari struktur amorf tersebut maka akan menyebabkan rantai konduktif yang tadinya terbentuk akan terpisah. Oleh karena itu, dengan memisahkannya rantai konduktif tersebut akan menyebabkan jarak antar partikel meningkat sehingga dapat menurunkan konduktivitas listrik. Fenomena tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 2.21<sup>[46]</sup>. Namun, apabila material komposit tersebut didinginkan kembali dan polimer mengalami rekristalisasi maka partikel amorf akan membentuk kembali rantai konduktifnya dengan adanya penyusutan fasa amorf<sup>[46]</sup>.



Sumber: *Positive temperature coefficient (PTC) resettable device technology and application guide. 2010*

**Gambar 2.21** Pengaruh temperatur terhadap konduktivitas listrik<sup>[46]</sup>

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini adalah diagram alir yang menggambarkan secara umum kegiatan penelitian yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh temperatur *compression molding* terhadap pelat bipolar komposit grafit dan *carbon black* dengan *binder* epoksi.

Diagram Alir Pembuatan Sampel Pelat Bipolar

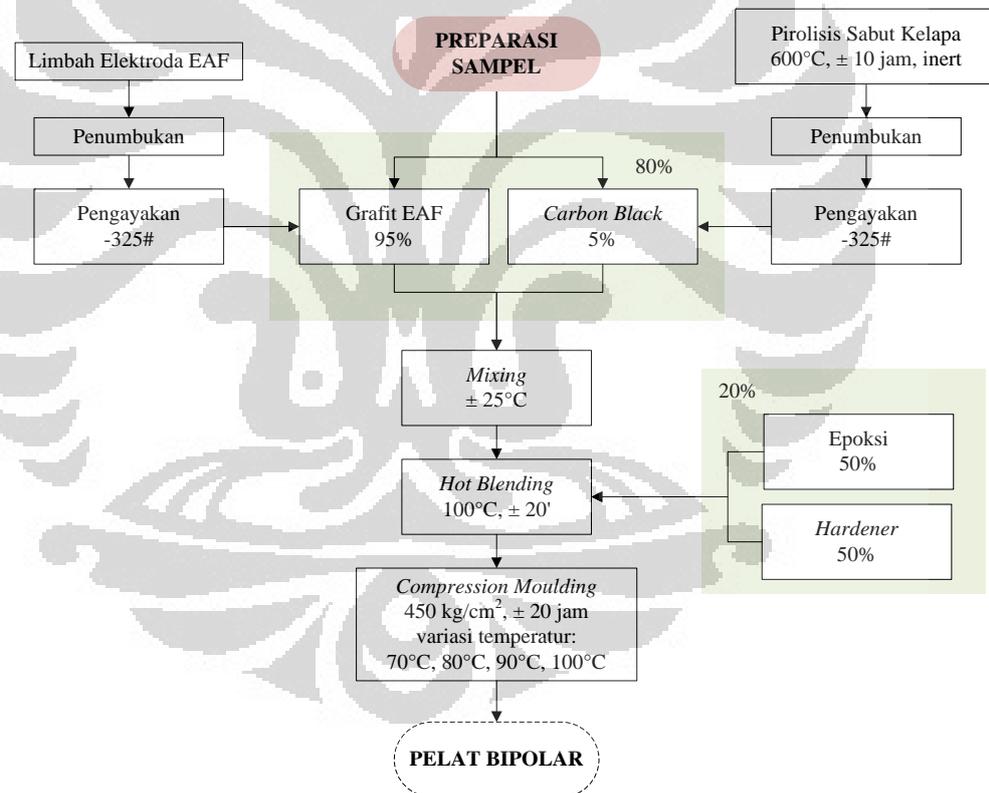
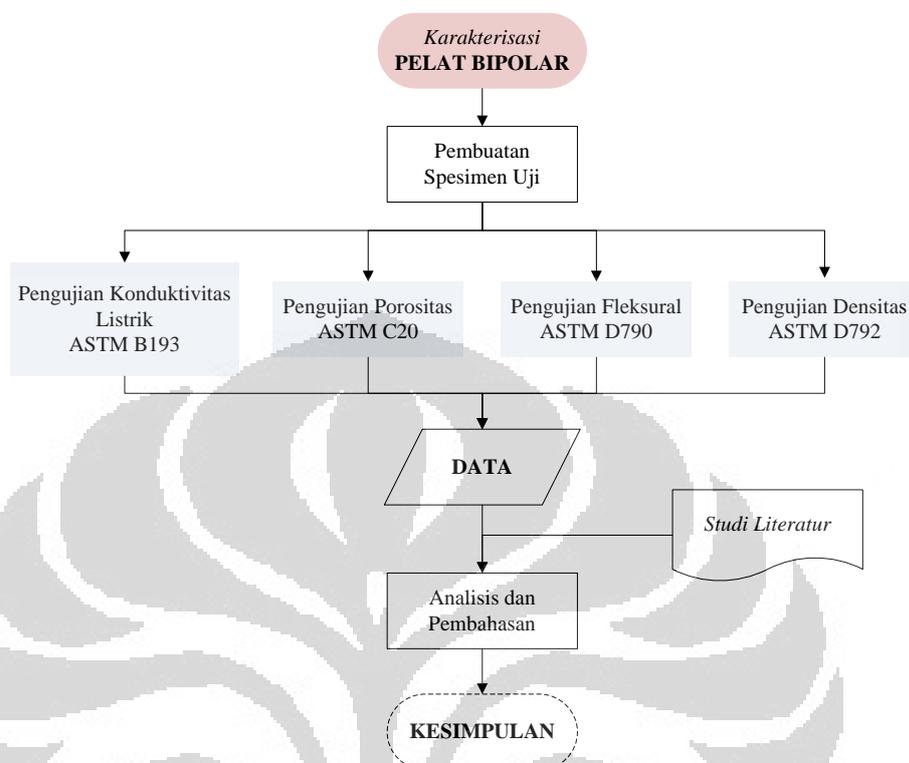


Diagram Alir Karakterisasi Sampel Pelat Bipolar



### 3.2 Alat dan Bahan

#### 3.2.1 Alat

Berikut ini adalah peralatan yang digunakan pada preparasi dan karakterisasi pelat bipolar.

**Tabel 3.1** Alat preparasi

Spatula	<i>Planetary ball mill</i>
Oven	<i>Mixer</i>
<i>Hot plate</i>	<i>Hot press pressure machine</i>
<i>Beaker glass 1L</i>	Timbangan Digital
<i>Die stainless steel 150x150 x±4.7mm</i>	Mesin pengguncang

**Tabel 3.2** Alat Karakterisasi

Alat Uji Konduktivitas Listrik ( <i>four point probe detector</i> )	Alat Uji Kekuatan Fleksural ( <i>three point bending – ASTM D 790</i> )
Alat Uji Porositas (ASTM C 20)	Alat Uji Densitas (ASTM D 792)

### 3.2.2 Bahan

Pada penelitian ini, digunakan epoksi sebagai *binder*, grafit EAF sebagai penguat, dan *carbon black* sebagai *conducting filler*. Adapun jumlah dari massa bahan baku yang digunakan sesuai dengan persentase tiap bahan pada masing-masing komposisi dan jumlah spesimen yang dibutuhkan untuk pengujian. Untuk setiap komposisi dibutuhkan 180 gram sampel.

#### 3.2.2.1 Epoksi Resin

Dalam penelitian ini, polimer termoset berupa epoksi digunakan sebagai *binder* pada sistem pelat bipolar dengan merek dagang Eposchon (Bhispenol A-epichlorohydrin) yang memiliki spesifikasi pada Tabel 3.3. Pemilihan epoksi sebagai *binder* mengacu kepada penelitian terdahulu.

**Tabel 3.3** Spesifikasi Polimer Epoksi Resin Eposchon

Sifat	Nilai
Viskositas pada 25 <sup>0</sup> C	16000-20000
Epoksi <i>equivalent</i> (g/equiv)	184-204
<i>Hydrolyzable chlorine content</i> (%)	< 0.05
<i>Colour according to the Gardner scale</i>	< 1

#### 3.2.2.2 Epoksi Hardener

Polimer epoksi memerlukan sebuah *coupling agent* sebagai stimulant terjadinya proses polimerisasi dengan baik pada suhu ruang. Oleh karena itu digunakan epoksi *hardener* dengan merek dagang Eposchon (Polyaminoamide). Tabel 3.4. berikut ini adalah spesifikasi dari *hardener* yang digunakan dalam penelitian.

**Tabel 3.4** Spesifikasi Polimer Epoksi Hardener Eposchon

Sifat	Nilai
Kekuatan tarik (kgf/cm <sup>2</sup> )	410
Kekuatan fleksural (kgf/cm <sup>2</sup> )	810
Kekuatan tekan (kgf/cm <sup>2</sup> )	740
Kekuatan geser adesif (kgf/cm <sup>2</sup> )	160

**Gambar 3.1.** Epoksi Resin dan Hardener

### 3.2.2.3 Metanol

Dalam penelitian ini menggunakan pengencer polimer epoksi untuk mempermudah pencampuran antara *binder* dengan penguat berupa metanol dengan merek dagang MERCK dengan spesifikasi yang terdapat pada Tabel 3.5.

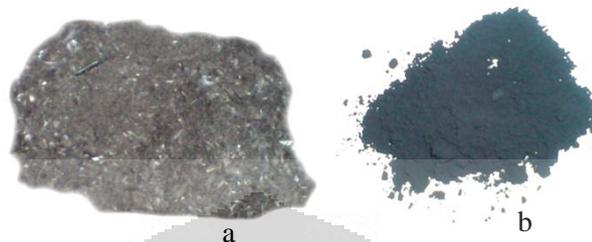
**Tabel 3.5** Spesifikasi Metanol MERCK

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

### 3.2.2.4 Carbon Black

Pada penelitian ini, *carbon black* (CB) digunakan sebagai material semi konduktif. *Carbon black* dengan permukaan yang luas akan mampu menghantarkan arus listrik dan membentuk jaringan karbon yang konduktif.

Namun, struktur *carbon black* yang berporos akan mengurangi sifat mekanis dari komposit. *Carbon black* yang dipakai pada penelitian ini dihasilkan dari karbon arang buatan tangan sendiri dengan struktur amorf yang berfungsi sebagai *conducting filler* dengan ukuran partikel sebesar 325 mesh atau  $<44 \mu\text{m}$ .



**Gambar 3.2** (a) Serabut kelapa sebelum pirolisis; (b) *Carbon Black* setelah di-milling dan ayak

### 3.2.2.5 Grafit EAF

Grafit limbah *Elektroda Arc Furnace* (grafit EAF) yang digunakan pada penelitian ini memiliki ukuran partikel 325 mesh atau  $<44 \mu\text{m}$  dengan spesifikasi grafit seperti pada Tabel 3.6.

**Tabel 3.6** Spesifikasi Grafit EAF

Sifat	Nilai
Diameter (mm)	610
Panjang (mm)	2700
Porositas (%)	15 – 26
Resistivitas ( $\Omega\text{m}$ )	5.6 – 6
Konduktivitas termal (W/MK)	120 – 300
Kekuatan tekan ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	260 – 262
Kadar abu (%)	Max 0.5

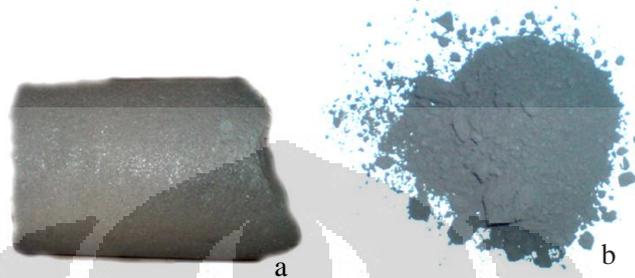
## 3.3 Prosedur Penelitian

### 3.3.1 Preparasi dan Pembuatan Sampel

#### 3.3.1.1 *Crushing* dan *Milling* Grafit

Grafit limbah elektroda dapur listrik peleburan besi baja yang berbentuk bongkahan dihancurkan, kemudian untuk mendapatkan ukuran yang lebih homogen maka dilakukan *milling* dengan menggunakan *planetary ball mill* yang

kan menghasilkan ukuran partikel lebih kecil hingga mencapai ukuran 325 mesh ( $<44 \mu\text{m}$ ). Setelah itu dilakukan pengayakan dengan mesin rot tap untuk mendapatkan ukuran yang homogen yaitu  $<44 \mu\text{m}$ . Variabel *ball mill* yang digunakan adalah: Waktu *milling*: 2 x 25 jam dan Perbandingan antara jumlah total berat serbuk (*carbon black*) : berat bola alumina = (1 : 10).



**Gambar 3.3** (a) Elektroda grafit EAF; (b) Grafit EAF setelah di-milling dan ayak

### 3.3.1.2 Penimbangan

Pelat Bipolar dibuat dengan cara mencampurkan epoksi, *carbon black*, dan grafit EAF dengan menggunakan mixer kemudian di press dengan menggunakan *hot press*. Komposisi dari masing-masing pelat bipolar disesuaikan dengan formulasi yang telah disusun terlebih dahulu (Tabel 3.7), agar didapatkan hasil yang sesuai dengan formula maka dilakukan proses penimbangan. Hasil penimbangan dimasukkan di dalam *beaker glass* untuk proses selanjutnya.

**Tabel 3.7** Komposisi Sampel Pelat Bipolar

Kode Sampel	Pelat Bipolar Komposit Grafit/Epoksi (100%wt = 180 g)				Variasi Temperatur
	Filler (80%wt = 144 g)		Binder (20%wt = 36 g)		
	Grafit EAF (95%wt)	Carbon Black (5%wt)	Epoksi (50%wt)	Hardener (50%wt)	
	g	g	g	g	
A	136.8	7.2	18	18	70
B					80
C					90
D					100

### 3.3.1.3 Pencampuran

Proses pencampuran ini dilakukan untuk mencampurkan semua bahan yang digunakan sesuai formula agar didapatkan campuran yang homogen. Langkah-langkah yang dilakukan pada proses ini adalah sebagai berikut :

1. Masukkan grafit EAF dan *carbon black* ke dalam beaker glass 1 L, kemudian aduk dengan menggunakan sendok hingga rata
2. *Epoksi resin* dan *epoksi hardener* diencerkan dengan methanol masing-masing sebanyak 35 ml di dalam beaker glass yang berbeda
3. Masukkan *epoksi resin* yang telah tercampur rata dengan methanol ke dalam beaker glass 1 L yang telah berisi grafit EAF dan *carbon black*, kemudian mixing selama  $\pm 5$  menit
4. Masukkan *epoksi hardener* ke dalam bakalan, kemudian mixing selama  $\pm 5$  menit
5. Mixing diatas hot plate ( $T=100^{\circ}\text{C}$ ) selama  $\pm 15$  menit



**Gambar 3.4** Hasil *Mixing*

### 3.3.1.4 Pencetakan

Pencetakan dilakukan dengan menggunakan cetakan yang terbuat dari stainless steel dengan ukuran cetakan  $150 \times 150 \times \pm 4.7\text{mm}$ . Proses ini dilakukan dengan memasukkan hasil *mixing* ke dalam cetakan kemudian dimasukkan ke dalam mesin *Hot Press* dengan pengaturan variasi temperatur sebesar  $70^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$ ,  $90^{\circ}\text{C}$  dan  $100^{\circ}\text{C}$ , dengan tekanan  $450 \text{ kg/cm}^2$ , dan waktu selama 4 jam.

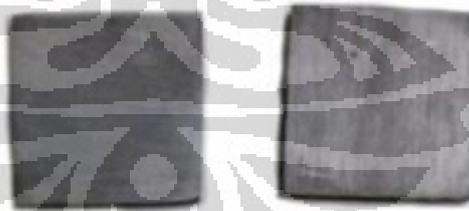


**Gambar 3.5** Mesin *Hot Press* dan Cetakan

### 3.3.1.5 Pembuatan Spesimen Uji

Pembuatan spesimen uji disesuaikan dengan standar ASTM yang digunakan pada pengujian karakterisasi. Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.4 dan 3.5, 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 sebanyak 5 buah. Masing-masing sampel diampelas 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 sebanyak 6 buah untuk masing-masing variabel.



**Gambar 3.6** Sampel Uji Konduktivitas, Densitas, dan Porositas

- c. Sampel untuk pengujian kekuatan fleksural, dibuat dengan ukuran 12x1,3x 0,3 cm sebanyak 2-3 buah. Masing-masing sampel diampelas 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.

**Universitas Indonesia**



Gambar 3.7 Sampel Uji Fleksural

### 3.3.2 Karakterisasi Pelat Bipolar

#### 3.3.2.1 Pengujian Densitas

Pengujian ini mengacu pada ASTM D 792<sup>[30]</sup> dengan prinsip pengujian yaitu membandingkan massa specimen di udara dengan massa spesimen di dalam air, karena massa specimen di dalam air akan berbeda jauh dengan massa specimen di udara akibat adanya gaya archimedes. Langkah-langkah pengujian densitas berdasarkan ASTM D 792 adalah sebagai berikut :

1. Timbang spesimen di udara
2. Timbang spesimen di dalam air (diusahakan tepat berada di tengah dari volume air dan tidak menyentuh bejana).
3. Catat suhu air dengan menggunakan termometer

Nilai densitas didapat dengan menggunakan rumus berikut :

$$\rho_{s\text{ampel}} = \frac{A}{A-B} \times \rho_{\text{air}} \dots\dots\dots(3.1)$$

Keterangan:

A = massa spesimen di udara (g);

B = massa spesimen di dalam air (g).

$\rho_{\text{sampel}}$  = densitas spesimen ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\rho_{\text{air}}$  = massa jenis air ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

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



Gambar 3.8 Proses Pangukuran Massa dalam Air

### 3.3.2.2 Pengujian Porositas

Pengujian ini mengacu pada prosedur ASTM C20<sup>[31]</sup> dengan langkah pengujian sebagai berikut :

1. Keringkan spesimen di dalam oven dengan temperatur 100<sup>0</sup>C selama 1 jam untuk menghilangkan uap air yang ada di dalam spesimen
2. Timbang spesimen di udara
3. Rebus spesimen menggantung di dalam air dengan temperatur 100<sup>0</sup>C selama 2 jam
4. Setelah selesai, diamkan di dalam wadah yang sama selama 12 jam
5. Timbang spesimen di dalam air
6. Keringkan dengan menggunakan kain, kemudian timbang di udara.

Nilai porositas spesimen akan di dapatkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Porositas (\%) = \frac{S_w - D}{D - S} \times 100 \dots \dots \dots (3.2)$$

Keterangan:

D = massa di udara (g);

S = massa di dalam air setelah direbus 2 jam dan direndam 12 jam (g);

S<sub>w</sub> = massa akhir sampel setelah dikeringkan (g).

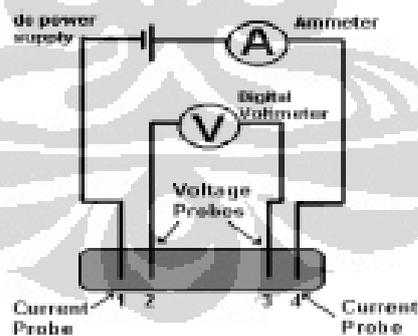


Gambar 3.9 Proses Perebusan Spesimen

### 3.3.2.3 Pengujian Konduktivitas Listrik

Sifat konduktivitas listrik yang tinggi merupakan syarat utama dari material komposit pelat bipolar. Oleh karena itu, dilakukan pengujian konduktivitas terhadap sampel untuk melihat besar arus listrik yang dapat dihantarkan oleh material komposit tersebut.

Pengujian ini menggunakan alat *four point probe detector*, sesuai ASTM B193<sup>[32]</sup>. Prinsip pengujian ini yaitu dengan memasukkan nilai ketebalan dari spesimen yang akan diuji kemudian didapatkan nilai resistivitas dari spesimen tersebut. Skema dari alat ini dapat dilihat pada Gambar 3.10 dibawah ini:



Gambar 3.10 Skema Pengujian Konduktivitas Listrik

Data yang didapatkan berupa besar nilai resistivitas yang kemudian akan didapatkan nilai konduktivitas material dengan menggunakan rumus di bawah ini:

$$C = \frac{1}{\rho} \dots \dots \dots (3.3)$$

Keterangan:

C = konduktivitas (S/cm);

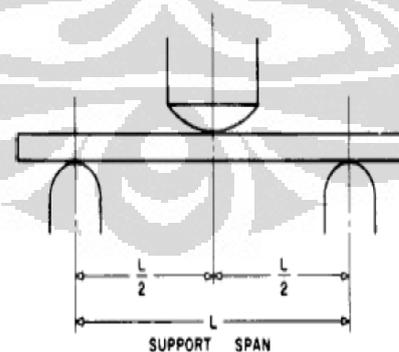
$\rho$  = resistivitas ( $\Omega\text{cm}$ )



Gambar 3.11. Alat *Four Point Probe*

### 3.2.2.3 Pengujian Fleksural

Pengujian fleksural dilakukan untuk mengetahui ketahanan material komposit terhadap beban tekan, karena pada aplikasinya sebagai pelat bipolar, material ini akan terkena beban tekan dari gas ke segala arah.



Gambar 3.12 Skema Pengujian Kekuatan Fleksural

Pengujian ini menggunakan mesin *universal testing machine* dan mengacu pada prosedur ASTM D790<sup>[33]</sup> yang dilakukan dengan metode *three-point bending* yang memiliki tiga titik utama, yaitu dua titik tumpuan pada pinggir

**Universitas Indonesia**

spesimen uji dan satu titik pembebanan pada bagian tengah spesimen. Selanjutnya, beban lentur dengan kecepatan konstan diberikan kepada spesimen hingga spesimen mengalami perpatahan.



**Gambar 3.13** Mesin Pengujian Kekuatan Fleksural

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

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

Keterangan:

$\sigma_f$  = tegangan/kekuatan lentur (MPa);

P = beban maksimum (MPa);

L = jarak antar *span* (mm);

b = lebar spesimen (mm);

d = tebal spesimen (mm)

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Pengamatan Visual Pelat Bipolar Hasil Pencetakan

Pada penelitian ini, dibuat pelat bipolar dengan menggunakan material grafit EAF dan *carbon black* dengan perbandingan 19:1 (95%:5%) sebagai *filler* sebesar 80% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar serta resin epoksi dan *hardener* dengan perbandingan 1:1 sebagai *binder* sebesar 20% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar dibuat dengan variasi temperatur *compression* sebesar 70, 80, 90, dan 100°C, dan dengan variabel proses lain yang sama untuk masing-masing pelat, seperti tekanan dan waktu penekanan, yakni 450 kg/cm<sup>2</sup> dan 4 jam. Masing-masing pelat bipolar yang dihasilkan berukuran 15x15 cm, dengan ketebalan pelat yang hampir sama dalam kisaran 0,3-0,5 cm.



**Gambar 4.1** Pelat Bipolar yang Dihasilkan pada Temperatur: 1.) 70°C, 2.) 80°C, 3.) 90°C, dan 4.) 100°C

Seperti terlihat pada Gambar 4.1, sampel pelat bipolar hasil pencetakan secara keseluruhan cenderung memiliki tekstur permukaan yang baik serta layak untuk dipreparasi yang kemudian digunakan sebagai sampel pengujian karakterisasi. Hal ini dikarenakan adanya proses pencampuran yang baik antara

resin epoksi dan *hardener*, grafit EAF dan *carbon black*. Setiap proses yang dilakukan, yaitu mulai dari penimbangan, pencampuran, hingga pencetakan, berpengaruh secara langsung terhadap karakteristik akhir dari pelat bipolar yang dihasilkan. Proses pencetakan seperti temperatur, tekanan, dan waktu pemrosesan pada mesin *hot press*, serta lamanya waktu diam dari cetakan setelah proses *hot press* dilakukan berdasarkan metodologi yang telah ditentukan sebelumnya.

Pada permukaan pelat bipolar terbentuk garis-garis vertikal yang dapat dilihat pada Gambar 4.1. Hal ini ditimbulkan oleh permukaan yang terbentuk dari cetakan yang digunakan. Garis-garis yang tidak rata tersebut harus dihilangkan dan dihaluskan ketika dilakukan pengujian karakteristik. Sebagai salah satunya adalah pada pengujian fleksural, garis-garis yang tidak rata tersebut dapat menjadi konsentrasi tegangan dan mempengaruhi nilai kekuatannya sehingga nilai yang didapatkan pada penelitian tidak valid. Apabila setiap proses pembuatan pelat bipolar tersebut dijalankan dengan sangat baik dan teliti, akan didapatkan pelat yang mempunyai permukaan visual yang rata, tidak rapuh, serta minim cacat.

Hal lain yang perlu diperhatikan adalah ketebalan pelat yang dihasilkan. Ketebalan yang dihasilkan pada masing-masing pelat bervariasi, yaitu antara 0,3-0,5 cm. Hal tersebut terjadi karena kurang ratanya penempatan bakalan komposit hasil pencampuran (*mixing*) pada cetakan, sehingga pada saat pencetakan banyak bakalan yang keluar dari cetakan dan mengurangi ketebalan dari pelat bipolar. 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 tekanan 450 kg/cm<sup>2</sup> di bawah temperatur yang berbeda untuk masing-masing pelat yang dihasilkan dengan menggunakan mesin *hot press*. Seperti telah 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<sup>[6]</sup>. Khususnya pada penelitian ini dilakukan variasi temperatur pada saat *compression molding* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap pelat bipolar yang dihasilkan.

Secara umum, temperatur dapat mempengaruhi sifat mekanik dan nilai konduktivitas listrik dari komposit dalam kaitannya dengan porositas. Semakin tinggi temperatur yang digunakan, semakin tinggi mobilitas molekular dan menurunnya viskositas<sup>[7]</sup> dari polimer epoksi yang terjadi sehingga akan berpengaruh terhadap berkurangnya porositas dari komposit akibat pengisian void atau jarak antar partikel dengan polimer, serta meningkatkan pembasahan resin epoksi pada permukaan partikel grafit EAF dan *carbon black*, sehingga akan menghasilkan sifat mekanik yang semakin kuat dan nilai konduktivitas listrik yang semakin tinggi.

#### 4.2.1. Pengujian Porositas

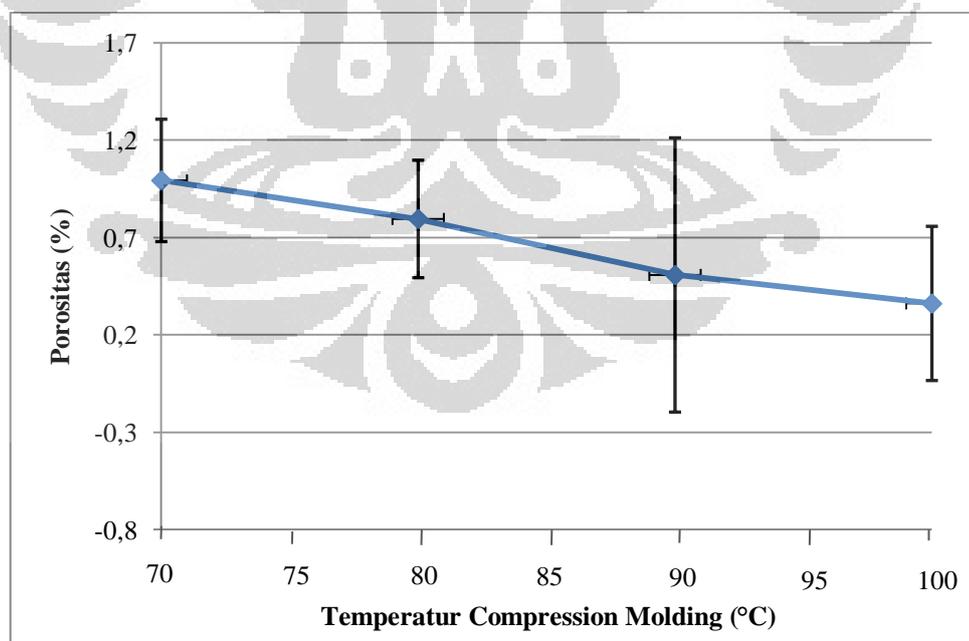
Porositas merupakan rongga yang terbentuk dalam suatu material akibat pengaruh gas yang terperangkap. Gas ini umumnya berasal dari luar sistem (uap air dan gas) ataupun dari dalam sistem (bagian komposisi bahan yang dapat menguap) yang terbentuk selama pembentukan material tersebut. Selain itu porositas juga dapat terjadi karena terbentuknya void-void antara agregat akibat tidak terisinya ruang antar agregat dengan partikel pengisi lainnya atau polimer yang dapat menurunkan konduktivitas listrik dan kekuatan fleksural

Dalam pembuatan pelat bipolar karbon-polimer komposit, kehadiran porositas tidak dapat dihindari. Namun, apabila jumlah porositas terlalu banyak maka dapat mempengaruhi efisiensi sistem *fuel cell* karena reaksi sel dapat terganggu oleh kehadiran gas yang terdistribusi melalui pori. Oleh karena itu diharapkan persentase porositas pada pelat bipolar, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan performa dari *fuel cell*<sup>[36]</sup>. Selain itu, porositas juga dapat mempengaruhi sifat lainnya dari pelat bipolar, seperti densitas, kekuatan fleksural dan konduktivitas listrik. 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

Temperatur Compression Molding (°C)	Porositas (%)
70	0,99
80	0,79
90	0,51
100	0,36

Pada Gambar 4.2, terlihat bahwa semakin tinggi temperatur yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar, akan menghasilkan penurunan pada porositas dari pelat bipolar yang dihasilkan. Dengan peningkatan temperatur tersebut berpengaruh terhadap pengurangan void antar partikel grafit ataupun *carbon black* akibat adanya penurunan viskositas dari polimer epoksi sehingga mobilitas molekular meningkat dan dengan penekanan yang secara bersamaan, sehingga dengan kata lain tingkat porositas dalam sistem komposit yang diakumulasikan dari porositas yang terbentuk baik dari void antar partikel bahan pengisi maupun porositas yang terkandung pada struktur bahan pengisi, akan menjadi semakin kecil. Penurunan tingkat porositas seiring dengan penambahan temperatur dari 70-100°C berurutan sebesar 19,93%, 36,16%, dan 28,79%.

**Gambar 4.2** Pengaruh Peningkatan Temperatur terhadap Porositas

Penurunan tingkat porositas tersebut dapat terjadi karena seiring dengan peningkatan temperatur maka terjadi penyerapan energi sehingga terjadi peningkatan energi kinetik atau pergerakan termal dari rantai polimer sehingga dapat mengurangi jarak antar agregat sehingga densitas meningkat, dan juga memudahkan terbentuknya *tunneling electron* atau agregat terhubung satu sama lain sehingga konduktivitas listrik meningkat<sup>[37,38]</sup>. Namun, karena terjadi pergerakan termal tersebut atau mobilitas molekular dari polimer tersebut selain dapat mengurangi jarak antar agregat tetapi juga dapat memisahkan agregat tersebut akibat adanya ekspansi termal dari polimer sehingga konduktivitas listrik tidak meningkat tajam karena agregat konduktif tersebut terselimuti oleh polimer, tetapi terjadi pembasahan yang baik atau *work of adhesion* antara agregat dan polimer sehingga dapat meningkatkan kekuatan fleksural, hal tersebut terjadi apabila temperatur di bawah temperatur transisi ( $T_t$ ) pada fenomena PTCR<sup>[38]</sup>.

Penurunan tingkat porositas secara langsung akan berpengaruh terhadap sifat mekanis dan nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan<sup>[6]</sup>. Sebagai contoh, ketika tingkat porositas berkurang seiring dengan peningkatan temperatur, maka hal tersebut berpengaruh terhadap berkurangnya void antar agregat bahan pengisi, karena terisinya void-void tersebut oleh epoksi yang mobilitas molekularnya semakin meningkat yang kemudian menghasilkan penurunan nilai resistivitas yang dihasilkan pada daerah antar agregat tersebut, sehingga kondisi tersebut berkontribusi dalam peningkatan nilai konduktivitasnya. Hal lain yang terjadi adalah ketersediaan daerah/jalur konduktivitas elektron (*electron conductivity path*) yang semakin banyak<sup>[6,7]</sup>, 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<sup>[18]</sup>, 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 molding*. Lebih lanjut, ketika partikel bahan pengisi karbon tidak terbasahi sepenuhnya oleh resin epoksi, maka resin memungkinkan untuk membentuk lubang pada pelat bipolar komposit<sup>[25]</sup>.

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 temperatur sebesar 70°C, dan yang terendah dimiliki oleh sampel yang dihasilkan dengan menggunakan temperatur sebesar 100°C, namun secara keseluruhan, tingkat porositas yang terkandung pada pelat bipolar komposit masih rendah, yakni kurang dari 1%.

#### 4.2.2. Pengujian Densitas

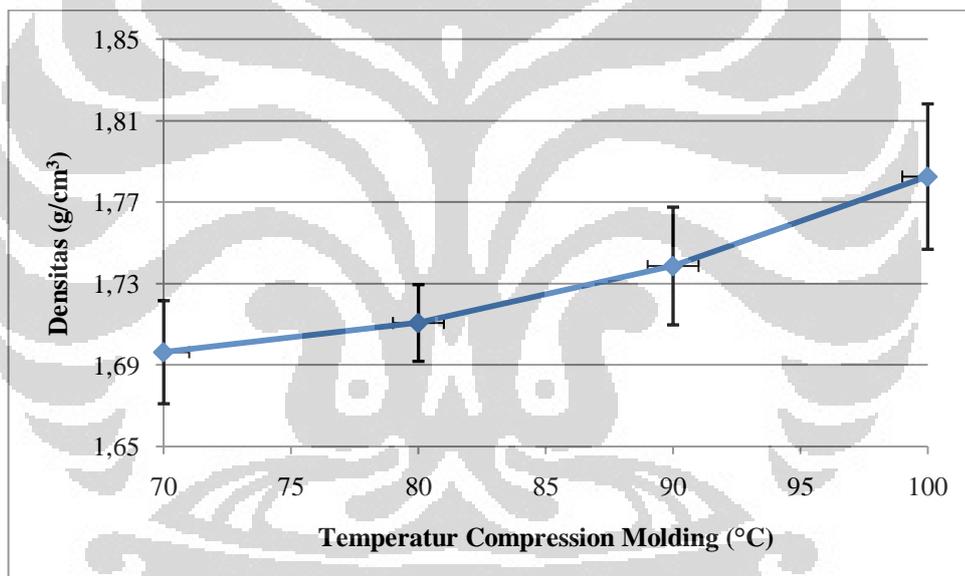
Seperti yang telah disebutkan pada bab 1, bahwa pelat bipolar berpengaruh terhadap 80% volum, 70% berat, dan 60% biaya dari *fuel cell*<sup>[16]</sup>. Hal ini berarti dengan mengurangi ukuran, berat, dan biaya pelat bipolar yang digunakan, maka kita dapat mengurangi biaya produksi dari PEMFC secara 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. Dengan mempertimbangkan material yang digunakan yaitu berbasis karbon dengan matriks grafit EAF yang rapuh sehingga tidak bisa dibuat terlalu tipis yang secara langsung akan meningkatkan kontribusi massa dari pelat bipolar tersebut dalam *fuel cell stack*<sup>[6]</sup>, maka diharuskan memiliki densitas yang rendah, sesuai dengan target US DOE yaitu  $< 5\text{g/cm}^3$ <sup>[10]</sup>.

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

Temperatur Compression Molding (°C)	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )
70	1,69
80	1,71
90	1,74
100	1,78

Pada Gambar 4.3, terlihat bahwa semakin tinggi temperatur yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar, akan menghasilkan peningkatan pada densitas pelat bipolar yang dihasilkan. Peningkatan densitas seiring dengan penambahan temperatur dari 70-100°C berurutan sebesar 0,84%, 1,61%, dan 2,46%.



Gambar 4.3 Pengaruh Peningkatan Temperatur terhadap Densitas

Pada penelitian ini menunjukkan bahwa dengan meningkatnya temperatur yang digunakan pada *compression molding* akan meningkatkan nilai densitas dari pelat bipolar, karena peningkatan tersebut berbanding terbalik dengan berkurangnya porositas<sup>[14,25]</sup>, meskipun peningkatan yang terjadi tidak terlalu signifikan. Peningkatan yang terjadi tidak terlalu signifikan, disebabkan oleh temperatur pada saat proses pencetakan pelat bipolar (70-100°C) masih lebih kecil dibandingkan dengan Tg dari resin epoksi (lebih besar dari 135 °C)<sup>[34,35]</sup>. 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. Ketika suatu proses berada pada temperatur di bawah temperatur  $T_g$ , maka polimer bersifat getas menyerupai perilaku gelas karena rantai-rantai molekulnya tidak mudah bergerak<sup>[29]</sup>. 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<sup>[29]</sup>.

Peningkatan densitas tersebut dapat terjadi karena dengan adanya peningkatan temperatur akan meningkatkan aktivitas atau mobilitas molekul dan penurunan viskositas<sup>[7]</sup> dari polimer epoksi sehingga memudahkan polimer tersebut mengisi ruang antar agregat atau void dan sekaligus dapat menurunkan tingkat porositas<sup>[41]</sup>.

Nilai densitas ini pun dapat diperkirakan melalui perhitungan pada persamaan 2.2 yang ditunjukkan pada Bab 2. Berdasarkan persamaan tersebut, dengan menggunakan densitas resin epoksi sebesar  $1,17 \text{ g/cm}^3$ <sup>[7]</sup> dan densitas bahan pengisi karbon sebesar  $1,88 \text{ g/cm}^3$ <sup>[25]</sup>, nilai densitas komposit dapat diperkirakan sebesar  $\pm 1,7 \text{ g/cm}^3$ , sedangkan nilai densitas yang diperoleh dari hasil pengujian pada sampel dari masing-masing pelat bipolar komposit pada penelitian ini pun berkisar antara  $1,7 - 1,8 \text{ g/cm}^3$ .

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 temperatur sebesar  $100^\circ\text{C}$ , dan yang terendah dimiliki oleh sampel yang dihasilkan dengan menggunakan temperatur sebesar  $70^\circ\text{C}$ , dan secara keseluruhan, nilai densitas yang dimiliki oleh masing-masing pelat yang dihasilkan memenuhi standar berat untuk pelat bipolar, yakni kurang dari  $5 \text{ g/cm}^3$ <sup>[11]</sup>.

### 4.2.3. Pengujian Kekuatan Fleksural

Persyaratan mengenai sifat mekanis yang baik mutlak diperlukan bagi setiap pelat bipolar yang dihasilkan. Sesuai dengan persyaratan yang dikeluarkan US DOE yaitu 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 dan menahan *clamping force* pada saat perakitan, atau dengan kata lain memperkuat struktur *fuel cell stack* setelah dilakukan proses perakitan<sup>[6,7]</sup>.

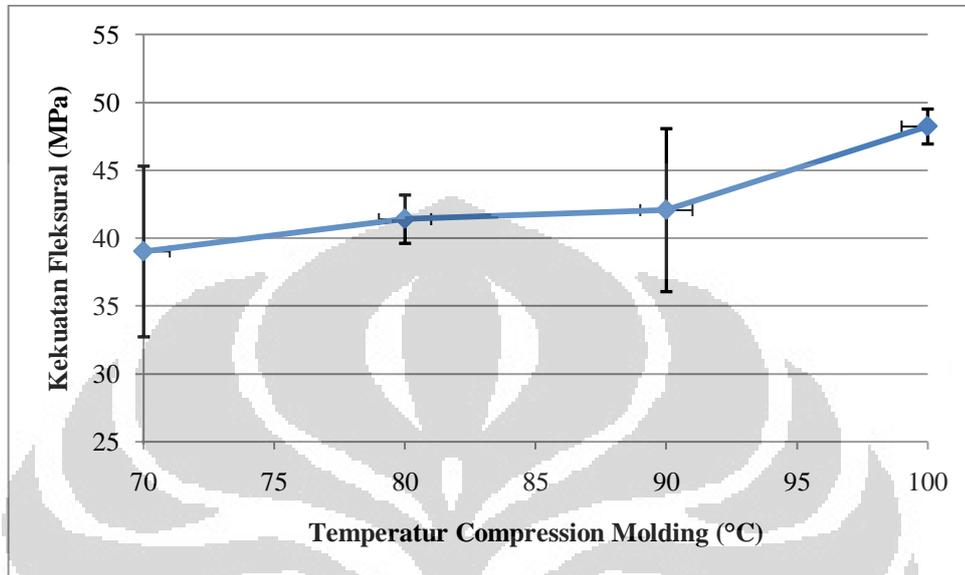
Salah satu faktor yang mempengaruhi kekuatan mekanis dari suatu komposit yaitu pembasahan yang terjadi antara masing-masing konstituen dalam komposit. Semakin baik pembasahan, semakin baik ikatan antarmuka, maka semakin besar gaya yang diperlukan untuk dapat memutuskan ikatan antara antarmuka<sup>[21]</sup>. Pada penelitian ini pembasahan terjadi antara polimer epoksi sebagai *binder* membasahi grafit EAF dan *carbon black* sehingga terjadi adesi antar partikel-partikel tersebut. Metanol digunakan sebagai pengencer sehingga memudahkan resin dan *hardener* epoksi membasahi partikel-partikel tersebut. Namun, apabila metanol tersebut terlalu cepat menguap maka kemampuan membasahi akan berkurang dan dapat membentuk void atau poros<sup>[25]</sup> yang dapat menjadi sumber konsentrasi tegangan. Tabel 4.3 menunjukkan hasil pengujian fleksural yang dilakukan pada sampel yang dibuat dari masing-masing pelat yang dihasilkan.

**Tabel 4.3** Hasil Pengujian Kekuatan Fleksural

Temperatur Compression Molding (°C)	Kekuatan Fleksural (MPa)
70	39,03
80	41,41
90	42,08
100	48,24

Pada Gambar 4.4, terlihat bahwa semakin tinggi temperatur yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar, akan menghasilkan peningkatan pada nilai kekuatan fleksural pelat bipolar yang dihasilkan. Hal tersebut sesuai dengan

literatur<sup>[6]</sup>, dimana peningkatan temperatur akan menghasilkan sifat mekanis yang semakin kuat. Peningkatan kekuatan fleksural seiring dengan penambahan temperatur dari 70-100°C berurutan sebesar 6,09%, 1,61%, dan 14,64%.



**Gambar 4.4** Pengaruh Peningkatan Temperatur terhadap Kekuatan Fleksural

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<sup>[18]</sup>.

Hal lain yang juga berhubungan adalah mengenai tingkat porositas yang terkandung dalam sistem komposit, yakni dengan meningkatnya temperatur, meningkat pula ekspansi termal dari epoksi sehingga mobilitas molekular meningkat<sup>[39]</sup>, 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. Kondisi tingkat porositas yang semakin kecil akan menyediakan lebih banyak ikatan yang terjadi antara antarmuka bahan pengisi karbon dengan matriks resin epoksi<sup>[6]</sup>.

Peningkatan kekuatan fleksural tersebut juga dapat disebabkan karena dengan semakin tingginya temperatur *compression molding* atau temperatur *curing* yang digunakan pada saat pembuatan pelat bipolar<sup>[6]</sup>. Dengan adanya peningkatan temperatur *curing* maka semakin banyak dan cepat *crosslink* polimer yang terbentuk akibat adanya peningkatan aktivitas molekular polimer yang menyebabkan rantai-rantai epoksi mudah membentuk cabang dari rantai polimer lainnya, sehingga terbentuk ikatan yang kuat<sup>[21]</sup> sehingga dapat meningkatkan kekuatan fleksural dari material komposit grafit-polimer.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya sulit untuk mendapat material pelat bipolar yang memiliki konduktivitas yang tinggi dan sifat mekanis yang cukup sekaligus. Hal ini disebabkan karena material konduktif biasa digunakan seperti *carbon black* yang sangat rapuh. Material yang sangat berperan dalam meningkatkan sifat mekanis dari pelat bipolar yaitu polimer dalam penelitian ini yang digunakan epoksi. Material grafit memiliki gugus yang reaktif seperti karboksil dan epoksid pada permukaannya yang apabila bereaksi dengan epoksi akan membentuk daya adesi yang kuat pada interfasa, sehingga dapat meningkatkan sifat mekanis<sup>[18]</sup>. Sedangkan pada *carbon black* tidak terdapat gugus yang reaktif pada permukaannya dan juga luas permukaannya yang kecil (karena biasanya *carbon black* yang digunakan ukurannya lebih kecil dari grafit). Sehingga *carbon black* tersebut akan bergabung antara partikel grafit sehingga akan menurunkan daya adesi interfasa antara grafit dan epoksi<sup>[6]</sup>. Selain itu juga, peningkatan kekuatan fleksural tersebut juga dapat disebabkan oleh adanya ikatan kimia yang terjadi antara agregat dengan resin epoksi dengan terbukanya gugus epoksid akibat peningkatan temperatur<sup>[40]</sup>.

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 temperatur sebesar 100°C, dan yang terburuk terjadi pada sampel yang dihasilkan dengan menggunakan temperatur sebesar 70°C. Namun secara keseluruhan, nilai kekuatan fleksural yang dimiliki oleh masing-masing pelat yang dihasilkan masih di bawah target yang ditetapkan oleh US DOE.

#### 4.2.4. Pengujian Konduktivitas Listrik

Sesuai dengan persyaratan yang dikeluarkan DOE yaitu 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<sup>[10]</sup>.

Terdapat beberapa kemungkinan variasi mekanisme yang digunakan untuk menggambarkan perilaku konduktivitas (elektron atau transpor muatan) dari komposit grafit-polimer yaitu teori perkolasi, *quantum mechanical tunneling* dan ekspansi termal. Teori perkolasi menjelaskan pembentukan dan struktur tiga dimensi *conducting network* ketika pengisi konduktif dicampurkan dengan polimer. Dengan peningkatan jumlah pengisi konduktif maka resistivitas menurun dan terjadi transisi dari isolator menjadi konduktor. Penurunan resistivitas tersebut menunjukkan bahwa terjadi agregasi membentuk jaringan. Fenomena tersebut merupakan perkolasi transisi dengan volum fraksi pengisi tertentu yang membatasi antara isolator dan konduktor. Hal tersebut tergantung pada sifat fisik-kimia dari polimer dan pengisi, seperti ukuran partikel, porositas, luas permukaan, serta kondisi pada saat pemrosesan komposit seperti temperatur, jenis pelarut<sup>[41]</sup>.

Pada penelitian ini yang berkontribusi besar terhadap perilaku listrik dari material komposit grafit-polimer yaitu ekspansi termal. Namun, teori perkolasi juga sedikit berkontribusi karena berdasarkan penelitian sebelumnya<sup>[36]</sup> dengan volum fraksi *carbon black* sebesar 5% merupakan batas perkolasi dari material komposit ini sehingga memungkinkan terjadi fenomena PTCR<sup>[6, 37-41]</sup>. Ekspansi termal sangat berpengaruh karena apabila mendekati temperatur leleh dari polimer atau *first state region* untuk polimer termoset, ekspansi termal tersebut akan memisahkan jalur konduktif yang sudah terbentuk pada saat pengadukan bakalan sehingga jarak antar agregat meningkat dan menurunkan konduktivitas listrik<sup>[41]</sup>.

Namun, ekspansi termal tersebut berkebalikan apabila peningkatan temperatur akan meningkatkan mobilitas molekular dari rantai polimer sehingga memudahkan terjadinya *crosslink* antar rantai polimer<sup>[7,40]</sup>. *Crosslink* tersebut menyebabkan partikel grafit EAF dan *carbon black* sulit bergerak pada saat pemanasan<sup>[6]</sup> sehingga ekspansi termal tidak mempengaruhi terjadinya destruksi

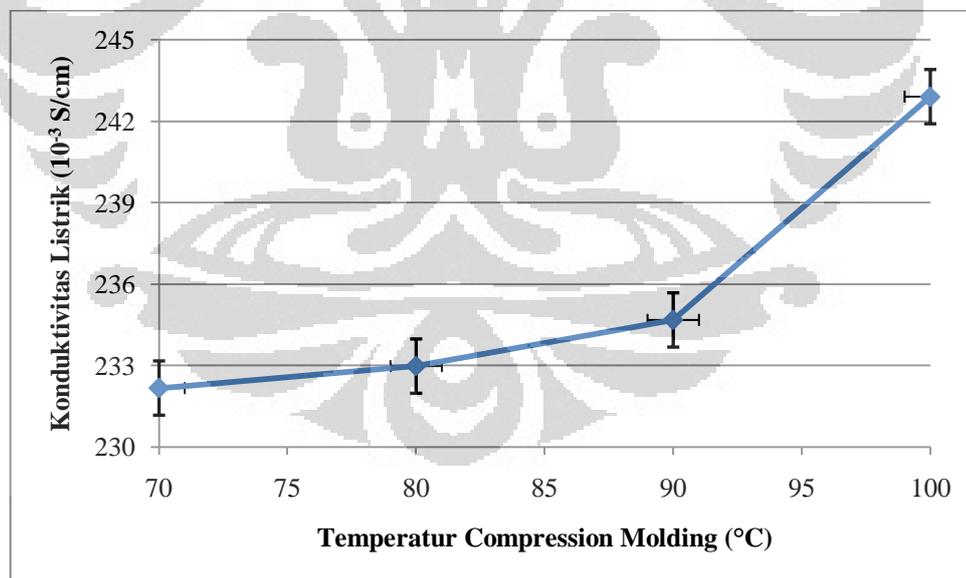
Universitas Indonesia

jalur konduktif. 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 Listrik

Temperatur Compression Molding (°C)	Konduktivitas Listrik ( $10^{-3}$ S/cm)
70	232,16
80	232,97
90	234,67
100	242,90

Peningkatan temperatur *compression molding* diharapkan secara signifikan mempengaruhi nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan<sup>[6]</sup>. Namun, pada Gambar 4.5, terlihat bahwa dengan peningkatan temperatur yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar terjadi peningkatan pada nilai konduktivitas listrik pelat bipolar yang tidak terlalu signifikan, yaitu dengan peningkatan konduktivitas listrik seiring dengan penambahan temperatur dari 70-100°C berurutan sebesar 0,34%, 0,72%, dan 3,50%.



**Gambar 4.5** Pengaruh Peningkatan Temperatur terhadap Konduktivitas Listrik

Tidak terlalu tajamnya peningkatan konduktivitas listrik tersebut menyerupai hasil penelitian sebelumnya dengan menggunakan komposisi epoksi

(EP): *expanded graphite* (EG): *carbon black* (CB) = 50:50:0 dan 50:45:5 menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan konduktifitas listrik yang signifikan. Hal tersebut dapat terjadi karena variasi pada temperatur *compression molding* yang digunakan dalam penelitian ini belum mencapai temperatur transisi (bukan temperatur transisi gelas ataupun temperatur leleh dari polimer) dari fenomena PTC ataupun NTC yang dapat mempengaruhi resistivitas komposit polimer, yang biasanya terjadi pada jumlah pengisi konduktif yang sedikit di atas konsentrasi batas perkolasi<sup>[6]</sup>. Batas perkolasi merupakan batasan dimana dengan penambahan konsentrasi *filler* tertentu dapat meningkatkan secara tajam konduktivitas listrik suatu polimer komposit, atau menurunkan secara tajam resistivitas<sup>[37]</sup>.

Pengaruh PTC pada resistivitas listrik apabila temperatur mendekati temperatur transisi. Koefisien ekspansi termal pada hampir semua polimer meningkat signifikan dengan temperatur mendekati temperatur transisi. Ketika jumlah pengisi sedikit di atas batas konsentrasi perkolasi, arah konduktif elektron mulai terbentuk karena adanya kontak fisik antara partikel konduktif. Jaringan konduktif antara partikel akan hancur akibat ekspansi termal yang tinggi pada temperatur yang mendekati temperatur transisi. Oleh karena itu, resistivitas listrik meningkat tajam dengan peningkatan temperatur.

Sedangkan pengaruh NTC pada konduktifitas listrik komposit polimer konduktif jarang terjadi. Partikel konduktif tidak terhubung dengan arah konduktif elektron karena adanya ekspansi termal pada temperatur sekitar temperatur transisi gelas, tetapi partikel konduktif tersebut akan mengalami reagregat membentuk arah konduktif elektron pada temperatur yang lebih tinggi, sehingga menghasilkan pengaruh NTC.

Pada penelitian ini, berdasarkan hasil penelitian sebelumnya<sup>[26]</sup> diketahui bahwa jumlah pengisi yang digunakan ternyata lebih tinggi dibandingkan batas konsentrasi perkolasi kedua komposit yaitu sebesar 5 wt%. Oleh karena itu, tidak terjadinya peningkatan konduktivitas listrik yang signifikan dengan peningkatan temperatur karena grafit EAF yang digunakan pada penelitian ini memiliki struktur jaringan layer sehingga tidak mudah rusak dengan adanya termal ekspansi<sup>[6]</sup>. Selain itu, ekspansi termal juga dapat menyebabkan jalur konduktif

yang terbentuk sebelumnya akan terlepas akibat pemanasan pada temperatur di atas temperatur transisi<sup>[38]</sup>.

Oleh karena polimer yang digunakan pada penelitian ini menggunakan termoset yang amorf, sehingga tidak memiliki temperatur leleh sehingga yang dapat ditentukan hanya temperatur transisi gelas, sehingga tidak adanya perubahan kristalinitas pada temperatur tinggi. Oleh karena itu, fenomena PTC cukup jarang terjadi pada polimer termoset, dan cukup sering terjadi fenomena NTC<sup>[37, 41-43]</sup>.

Peningkatan nilai konduktivitas listrik dapat terjadi seiring dengan peningkatan temperatur, 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<sup>[6]</sup>. Peningkatan temperatur juga berpengaruh dalam menghasilkan komposit yang lebih padat (*dense*). Komposit yang lebih padat akan memberikan nilai konduktivitas listrik yang semakin tinggi<sup>[6]</sup>.

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 temperatur sebesar 100°C, dan yang terburuk terjadi pada sampel yang dihasilkan dengan menggunakan temperatur sebesar 70°C. Namun secara keseluruhan, nilai konduktivitas listrik yang dimiliki oleh masing-masing pelat yang dihasilkan masih di bawah target yang ditetapkan oleh US DOE<sup>[10]</sup>.

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<sup>[6]</sup>. 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<sup>[6]</sup>. Hal tersebut

**Universitas Indonesia**

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<sup>[6]</sup>. 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.

#### 4.3. Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar dengan Peningkatan Temperatur *Compression Molding*

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

Keterangan pada Tabel 4.5 menunjukkan bahwa pelat bipolar komposit terbaik yang dihasilkan pada penelitian ini dimiliki oleh pelat bipolar yang dihasilkan dengan menggunakan temperatur sebesar 100°C. Pelat bipolar ini memiliki spesifikasi berat yang rendah (nilai densitas kurang dari 5 g/cm<sup>3</sup>), porositas yang cukup kecil (kurang dari 1%), nilai fleksural yang cukup besar dan hampir memenuhi target US DOE sebesar 25 MPa, serta nilai konduktivitas listrik tertinggi jika dibandingkan dengan pelat bipolar yang lain.

**Tabel 4.5** Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar dengan Peningkatan Temperatur *Compression Molding*

Temperatur (°C)	Karakteristik Pelat Bipolar			
	Porositas (%)	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	Kekuatan Fleksural (MPa)	Konduktivitas Listrik (10 <sup>-3</sup> S/cm)
70	0,99	1,69	39,03	232,16
80	0,79	1,71	41,41	232,97
90	0,51	1,73	42,08	234,67
100	0,36	1,78	48,24	242,90

Hasil karakterisasi tersebut memperlihatkan pengaruh kenaikan temperatur terhadap sifat pelat bipolar komposit yang dihasilkan. Semakin tinggi temperatur yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar dengan metode *compression molding*, maka akan berpengaruh terhadap peningkatan dari nilai konduktivitas listrik, kekuatan fleksural, dan nilai densitas, serta penurunan tingkat porositas dari pelat bipolar yang dihasilkan. Semakin tinggi temperatur yang digunakan, semakin tinggi mobilitas molekular dan menurunnya viskositas<sup>[7]</sup> dari polimer epoksi yang terjadi sehingga akan berpengaruh terhadap berkurangnya porositas dari komposit akibat pengisian void atau jarak antar partikel dengan polimer, serta meningkatkan pembasahan resin epoksi pada permukaan partikel grafit EAF dan *carbon black*, sehingga akan menghasilkan kekuatan fleksural yang semakin tinggi dan nilai konduktivitas listrik yang cukup meningkat.

Namun, dalam membandingkan karakteristik pelat bipolar yang dihasilkan dengan temperatur *compression molding* tersebut perlu diperhatikan standar deviasi dari masing-masing sampel tersebut. Hal tersebut dapat ditunjukkan pada data hasil pengujian porositas dan kekuatan fleksural yaitu pada sampel dengan temperatur *compression molding* 90°C menunjukkan standar deviasi terbesar apabila dibandingkan dengan sampel lainnya pada hasil pengujian yang sama yaitu 0,71 dan 6,01. Kedua hasil pengujian karakteristik tersebut saling mempengaruhi, karena dengan nilai standar deviasi yang tinggi menunjukkan bahwa pengujian yang dilakukan menghasilkan penyimpangan yang sangat jauh antara data yang satu dengan yang lainnya. Standar deviasi yang tinggi pada data hasil pengujian porositas menunjukkan bahwa poros-poros yang terdapat pada pelat bipolar tidak merata atau pada saat pengambilan sampel (*sampling*), sampel yang digunakan tidak mewakili karakteristik secara keseluruhan pelat. Ketidakterwakilan karakteristik secara keseluruhan pelat dapat disebabkan karena pada saat proses pengadukan bakalan yang kurang efektif sehingga partikel grafit maupun *carbon black* tidak terbasahi secara merata oleh epoksi<sup>[6]</sup> dan juga distribusi tekanan dan temperatur yang tidak merata. Hal tersebut juga menyebabkan nilai standar deviasi hasil pengujian kekuatan fleksural tinggi akibat tidak meratanya poros sehingga ada bagian sampel spesimen uji yang memiliki porositas tinggi sehingga kekuatan fleksuralnya rendah dan sebaliknya.

**Universitas Indonesia**

## BAB 5

### KESIMPULAN

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

1. Variasi pada temperatur *compression molding* tidak mempengaruhi proses pembuatan, serta penampilan fisik dari pelat bipolar yang dihasilkan atau minim cacat.
2. Kenaikan temperatur *compression molding* dari 70-100°C, secara umum akan berpengaruh terhadap peningkatan nilai densitas, konduktivitas listrik, dan kekuatan fleksural, serta menurunkan tingkat porositas dari pelat bipolar komposit.
3. Pelat bipolar yang dihasilkan dengan menggunakan temperatur sebesar 100°C memiliki performa terbaik dengan nilai densitas sebesar 1,78 g/cm<sup>3</sup>, kekuatan fleksural sebesar 48,24 MPa, nilai konduktivitas listrik sebesar 0,24 S/cm, serta porositas sebesar 0,36%.
4. Peningkatan temperatur *compression molding* pada penelitian ini berpengaruh untuk menghasilkan pelat bipolar dengan bobot yang ringan mencapai 1,78 g/cm<sup>3</sup>, tingkat porositas yang kecil mencapai 0,36%, serta kekuatan fleksural yang baik mencapai 48,24 MPa. Target US DOE untuk ketiga karakteristik tersebut telah terpenuhi pada penelitian ini.

## DAFTAR REFERENSI

- [1] Stambouli, A. Boudghene, and E. Traversa. *Fuel Cells, an Alternative to Standard Sources of Energy*. Italy: University of Roma, 2001.
- [2] World Energy Council. Survey of energy resources. 1998.
- [3] Sopian, Kamaruzzaman, and Wan Ramli Wan Daud. *Challenges and Future Developments in Proton Exchange Membrane Fuel Cells*. Malaysia: Universiti Kebangsaan Malaysia, 2005.
- [4] Boudghene Stambouli A, Dadouche F. *Renewable energies, technical and economic developments*. Proceeding of the Seminaire International de la Physique Energetique, SIPE 5. Bechar, Algeria. 2000.
- [5] Bossel, Ulf. *Alternative Energy Conversion*. European Fuel Cell Forum. Switzerland: Oberrohrdorf. 2008.
- [6] Ling Du. *Thesis : Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. 2008.
- [7] H.S. Lee, et al., ed. *Evaluation of Graphite Composite Bipolar Plate for PEM (Proton Exchange Membrane) Fuel Cell: Electrical, Mechanical, and Molding Properties*. South Korea, 2006.
- [8] Besmann, T., Klett, James Henry, Jr., Lara-curzio, Edgar, *Carbon/Carbon Composite Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cells*. J. Electrochem. Soc. 2000.
- [9] Busick, D.N., Wilson, S., *Low-Cost Composite Materials for PEFC Bipolar Plates*, Fuel Cells Bulletin. 1999.
- [10] Cunningham, Brent. *The Development of Compression Moldable Polymer Composite Bipolar Plates for Fuel Cells*. Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University. 2007.
- [11] Hermanna, Allen, Tapas Chaudhuria, and Priscila Spagnolb. *Bipolar plates for PEM Fuel Cells : A Review*. Golden National Renewable Energy Laboratory: University of Colorado. 2005.
- [12] K. Robberg, V. Trapp, in: W. Vielstich, H.A. Gasteiger, A. Lamm (Eds.), *Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications*, vol. 3: Fuel Cell Technology and Applications, Wiley & Sons, New York. 2003

- [13] J. G. Clulow, F.E. Zappitelli, C.M. Carlstrom, J.I.L. Zemsky, D.N. Busick, M.S. Wilson, in: *Fuel Cell Technology: Opportunities and Challenges*, Topical Conference Proceedings, 2002 AIChE Spring National Meeting, New Orleans, LA, March 10–14. 2002.
- [14] Wilson, Mahlon S. Busick, Deanna N. *Low-Cost Composite Materials for Polymer Electrolyte Fuel Cells Bipolar Plates*. Fuel Cell Seminar Palm Springs, CA. 1998
- [15] Joshua Hertz, GJ La O', Jungik Kim. *Fuel Cells Fundamentals The Materials Science of Renewable Energy*. 2006
- [16] Yuhua Wang. *Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. University of Waterloo, Canada.2006
- [17] *ASM Handbook Volume 21 Composite*. ASM Internasional. 2001
- [18] Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia MSc. *Diklat Kuliah Komposit*. Departemen Metalurgi & Material UI. Depok. 2009
- [19] Matthews and Rawlings. *Composite Material: Engineering and Science*. New York. 2005.
- [20] Taylor and Francis. *Wood Thermoplastic Composites Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite*. D.F. Caulfield et al. 2005
- [21] <http://www.industrialmetalcasting.com/electric-arc-furnaces.html> diakses tanggal 20 Januari 2011.
- [22] 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.
- [23] Nikhil H. Jalani. *Development of Nanocomposite Polymer Electrolyte Membranes for Higher Temperature PEM Fuel Cells*. Chemical Engineering, Worcester Polytechnic Institute.2006
- [24] Li, Xianguo and Imran Sabir. (2004). *Review of Bipolar Plate in PEM Fuel Cell: Flow-field designs*. Department of Mechanical Engineering, University of Waaterloo, 200 University Avenue West, Waterloo, Ontario, Canada, N2L.
- [25] Hsu-Chiang Kuan , Chen-Chi M. Ma, Ke Hong Chen, Shih-Ming Chen. *Preparation, electrical, mechanical and thermal properties of composite bipolar plate for a fuel cell*. Journal of Power Sources 134 (2004) 7–17.

- [26] [http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_black](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_black) diakses pada 26 November 2010.
- [27] <http://www.efunda.com/> diakses pada 10 Desember 2010.
- [28] Erik H. Weber. *Development and Modeling of Thermally Conductive Polymer/Carbon Composites*. Bachelor of Science, Michigan Technological University. 1999
- [29] Yuwono, A. Herman and Sumadi Agustinus. *Diktat Kuliah Teknologi Polimer*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2008.
- [30] American Standards for Testing Material international. ASTM D792-00 Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. 2003.
- [31] American Standards for Testing Material international. ASTM C20-00 Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water. 2003.
- [32] American Standards for Testing Materials International. *ASTM B193 – Standard Test Methods for Resistivity of Electrical Conductor Materials*. 2003.
- [33] American Standards for Testing Materials International. *ASTM D790–00 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. 2003.
- [34] Akovali, Güneri. *Handbook of Composite Fabrication*. RAPRA Technology Ltd., 2001.
- [35] Pham, Ha. Q. and Maurice J. Marks. *Epoxy Resin Vol. 9*. Encyclopedia of polymer Science and Technology, John Wiley & Sons, Dow Chemical.
- [36] Putra, Setiadi. *Pengaruh Tekanan Compression Moulding Terhadap Performa Pelat Bipolar Komposit Karbon EAF/Resin Epoksi dengan Komposisi 5% Carbon Black*. Skripsi. Universitas Indonesia. Depok. 2009.
- [37] Zhang, B. Baowei Li. and Changsheng Xie. *Epoxy Resin/Nano NiC Composites Exhibiting NTC Effect with Tunable Resistivity*. J. Mater. Sci. Technol., Vol. 25. No. 2, 2009.
- [38] Li, Q. Q. Z. Xue. X. L. Gao. and Q. B. Zheng. *Temperature Dependence of Electrical Properties of The Carbon Nanotube/Polymer Composites*. eXPRESS Polymer Letters Vol. 3. No. 12, 2009.

- [39] Chung, Soonwan. Sandeep Makhar. Harold Ackler. and Seungbae Park. *Material Characterization of Carbon-Nanotube-Reinforced Polymer Composite*. Electronic Materials Letters, Vol 2, No. 3, 2006.
- [40] Droval, G. P. Glouannec. P. Salagnac. and J. F. Feller. *Electrothermal Behavior of Conductive Polymer Composite Heating Elements Filled with Ceramic Particles*. Journal of Thermophysics and Heat Transfer. Vol. 22, No. 4, 2008.
- [41] Homer, M. L. J. R. Lim. K. Manatt. A. Kisor. A. M. Manfreda. L. Lara. A. D. Jewell. S. P. S. Yen. H. Zhou. A. V. Shevade. and M. A. Ryan. *Temperature Effects on Polymer-Carbon Composite Sensors: Evaluating The Role of Polymer Molecular Weight and Carbon Loading*. IEEE. 2003.
- [42] XJ He, LJ Wang, and XF Chen, *PTC effect in carbon black-filled ethylene-propylene-diene terpolymer systems*, Journal of Applied Polymer Science, 80 (9): 2001.
- [43] J. Fournier, G. Boiteux, G. Seytre, and G. Marichy, *Positive temperature coefficient effect in carbon black epoxy polymer composites*, Journal of Materials Science Letters, 16(20): 1677-1679 (1997).
- [44] Reddy, Ramana G. *Fuel Cell and Hydrogen Economy*. Tuscaloosa: University of Alabama, 2006.
- [45] <http://www.tda.com/eMatls/composites.htm> diakses pada 20 Januari 2011.
- [46] Boliver. D. *Polymeric Positive Temperature Coefficient (PPTC) Resettable Device Technology and Application Guide*. Speer Electronics Inc. 2011.
- [47] Woodlands. *Carbon-filled polymer blend based bipolar plates for PEM fuel cell stack*. Center for fuel cell research and applications. 2006.
- [48] Jan-chan Huang. *Carbon Black Filled Conducting Polymers and Polymer Blends*. Plastics Engineering Department, University of Massachusetts Lowell, Lowell, 2002.
- [49] 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.
- [50] 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.

## Lampiran 1. Hasil Pengujian Densitas

Temperatur Compression Molding (°C)	Kode Sampel	Temperatur Pengujian (°C)	$\rho_{\text{air}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	A (g)	B (g)	$\rho_{\text{sampel}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Rata-Rata
70	9	22	0,997774	3,75	1,6	1,7403026	1,696339033
	12			3,41	1,38	1,6760629	
	15			3,52	1,43	1,6804606	
	16			3,47	1,41	1,6807156	
	20			3,23	1,32	1,6873342	
	21			3,64	1,52	1,7131583	
80	10	25	0,997048	3,2	1,34	1,7153512	1,710706955
	12			3,44	1,45	1,7235401	
	17			3,55	1,48	1,7099131	
	22			3,08	1,26	1,6873118	
	7			3,17	1,35	1,7366164	
	23			3,41	1,4	1,6915091	
90	7	27	0,996516	1,98	0,86	1,7616983	1,738682447
	8			2,05	0,87	1,7312358	
	11			2,23	0,94	1,7226598	
	15			2,13	0,9	1,7256744	
	19			2,26	0,94	1,7061565	
	14			1,97	0,87	1,7846699	
100	10	23	0,997542	2,55	1,13	1,7913597	1,782600587
	11			2,32	1,02	1,7802279	
	14			2,51	1,11	1,7884494	
	17			2,62	1,19	1,8276634	
	16			2,48	1,04	1,7179881	
	22			2,53	1,12	1,7899149	

Contoh Perhitungan:

$$A = 3,75 \text{ g}$$

$$B = 1,6 \text{ g}$$

$$\rho_{\text{air}} (22^\circ\text{C}) = 0,997774 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{sampel}} = \frac{A}{A-B} \times \rho_{\text{air}} = \frac{3,75}{3,75-1,6} \times 0,997774 = 1,7403026 \text{ g/cm}^3$$

## Lampiran 2. Hasil Pengujian Porositas

Temperatur Compression Molding (°C)	Kode Sampel	D (g)	S (g)	S <sub>w</sub> (g)	Porositas (%)	Rata-Rata
70	9	3,72	1,62	3,74	0,952381	0,993184315
	12	3,39	1,41	3,41	1,010101	
	15	3,5	1,45	3,53	1,4634146	
	16	3,45	1,42	3,47	0,9852217	
	20	3,21	1,34	3,23	1,0695187	
	21	3,62	1,53	3,63	0,4784689	
80	10	3,18	1,35	3,2	1,0928962	0,795262071
	12	3,42	1,46	3,44	1,0204082	
	17	3,53	1,49	3,54	0,4901961	
	22	3,06	1,29	3,07	0,5649718	
	7	3,15	1,32	3,17	1,0928962	
	23	3,39	1,43	3,4	0,5102041	
90	8	1,96	0,83	1,97	0,8849558	0,507640964
	22	4,23	1,77	4,24	0,4065041	
	18	3,53	1,45	3,53	0	
	7	3,82	1,6	3,82	0	
	14	1,95	0,81	1,97	1,754386	
	20	3,73	1,55	3,73	0	
100	10	2,54	1,15	2,55	0,7194245	0,361462655
	11	2,31	1,06	2,31	0	
	14	2,5	1,13	2,51	0,729927	
	17	2,61	1,22	2,62	0,7194245	
	16	2,47	1,06	2,47	0	
	22	2,52	1,14	2,52	0	

Contoh Perhitungan:

$$D = 3,72 \text{ g}$$

$$S = 1,62 \text{ g}$$

$$S_w = 3,74 \text{ g}$$

$$\text{Porositas (\%)} = \frac{S_w - D}{D - S} \times 100 = \frac{3,74 - 3,72}{3,72 - 1,62} \times 100 = 0,952381\%$$

**Lampiran 3. Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik**

<b>Temperatur Compression Molding (°C)</b>	<b>Kode Sampel</b>	<b><math>\rho</math> (<math>\Omega</math> cm)</b>	<b>C (S/cm)</b>	<b>Rata-Rata</b>
70	8	4,54	0,220264317	0,232167972
	14	5,98	0,16722408	
	21	6,54	0,152905199	
	10	3,66	0,273224044	
	9	2,88	0,347222222	
80	6	5,32	0,187969925	0,232977494
	8	4,92	0,203252033	
	11	5,57	0,179533214	
	14	2,87	0,348432056	
	16	4,07	0,245700246	
90	9	3,01	0,332225914	0,234677504
	11	3,43	0,29154519	
	15	5,54	0,180505415	
	21	4,34	0,230414747	
	13	7,21	0,138696255	
100	15	4,76	0,210084034	0,242904572
	9	3,32	0,301204819	
	12	2,89	0,346020761	
	18	4,72	0,211864407	
	20	6,88	0,145348837	

Contoh Perhitungan:

$$\rho = 4,45 \Omega\text{cm}$$

$$C = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{4,45} = 0,22026432 \text{ S/cm}$$

## Lampiran 4. Hasil Pengujian Fleksural

Temperatur Compression Molding (°C)	Kode Sampel	P (MPa)	L (mm)	b (mm)	d (mm)	$\sigma_f$ (MPa)	Rata-Rata
70	1	30,4	64	13,5	2,5	34,58844444	39,03452991
	2	36,8	64	13	2,5	43,48061538	
80	1	33,6	64	12,5	2,5	41,28768	41,41371077
	2	33,6	64	13	2,5	39,69969231	
	3	35,2	64	12,5	2,5	43,25376	
90	1	36,8	64	13	2,5	43,48061538	42,0802735
	2	41,6	64	12,5	3	35,49866667	
	3	40	64	13	2,5	47,26153846	
100	1	40	64	12,5	2,5	49,152	48,24177778
	2	41,6	64	13,5	2,5	47,33155556	

Contoh Perhitungan:

$$P = 30.4 \text{ MPa}$$

$$L = 64 \text{ mm}$$

$$b = 13 \text{ mm}$$

$$d = 3 \text{ mm}$$

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} = \frac{3 \times 32 \times 64}{2 \times 13,5 \times 2,5^2} = 39,03452991 \text{ MPa}$$

## Lampiran 5.: Spesifikasi Resin Epoksi



  
 Technical Information

## Bakelite® EPR 174

Unmodified, liquid standard epoxy resin based on Bisphenol-A

### Characteristics

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

### Curing agent

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

### Applications

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

### Shelf Life

In sealed containers at room temperature at least one year. Bakelite 0164/LV can crystallize under certain circumstances after longer storage. The crystallization can be removed by heating to 60 - 70 °C and stirring.

### Precautions

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

P.T. JUSTUS KIMARAYA  
JAKARTA

Universitas Indonesia

## Lampiran 6. Spesifikasi Epoksi *Hardener*

### TECHNICAL DATA SHEET

#### EPOXY HARDENER V-140

Epoxy Hardener V-140 is a reactive polyamide resin based on dimerized fatty acid and polyamines and designed for use with solid or liquid epoxy resin. Epoxy Hardener V-140 offers ambient cure, excellent adhesion and resistance properties which may be used in high solid coating, adhesive, sealant, primer, and enamel paint formulations, putties and small casting.

#### SPECIFICATION :

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

#### TYPICAL PROPERTIES :

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

#### TYPICAL PROPERTIES IN A CURED COATING :

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

#### TYPICAL CURED RESIN PROPERTIES :

Hardness (shore D)	: 84
Tensile Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 410
Flexural Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 810
Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 740
Shear Adhesive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 160

#### CHEMICAL RESISTANCE PROPERTIES :

(weight change after 10 days immersion, %)

Water desilated	: 0.4
10% Hydrochloric Acid	: 1.0
10% Sodium Hydroxide	: 0.5
5% Sodium Chloride	: 0.5
10% Sulfuric Acid	: 1.3
Methyl Ethyl Ketone	: 35
Xylene	: 0.6
Mineral Spirits	: 0.1

*PT. Justus Kimiatana*  
JAKARTA

### Lampiran 7. Spesifikasi Grafit EAF PT. Krakatau Steel

WED, 29-JUL-09 12:20

DIV SSP II PTKS CLG

62 0254 371184

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

Material Code Name & Spesification	Material Unit Group	B O H	Min	Max
01518429 GRAPHITE,ELECTRODE-D610X2700-60-66KA	KG	169,298,900	350,000.000	1000,000.000

#### GRAPHITE ELECTRODE

GRADE : ULTRA HIGH POWER (UHP)

DIA : NOMINAL 610 MM (24 INCH)

ACTUAL 608 - 613 MM

LENGTH : 2700 MM

POROSITY : 15 TO 26 %

BULK DENSITY : 1.66-1.72 GR/CC

RESISTANCE : 5.6-6.0 OHM/M

YOUNG MODULUS : 900-1250 KGF/MM2

THERMAL CONDUCTIVITY : 120-300 W/MK

COMPRESIVE STRENGTH : 260-262 KG/CM2

CURRENT CARRYING CAPASITY : 60-66 KA

ASH CONTENTS : 0.5% MAX

COMPLETE WITH :

-1 EA NIPPLE TRANSPORT FOR 100 TON GRAPHITE ELECTRODE

-1 EA EXTRA LONG NIPPLE FOR 30 TON GRAPHITE ELECTRODE

-1 EA ELASTIC CRANE SUSPENSION GEAR FOR 200 TON -  
 GRAPHITE ELECTRODE

#### MANUFACTURE :

NCK ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA

SDK ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA

SEC ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA

SGL ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA

TOKAI ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA.

UCAR ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA.

( lanjutan )

WED, 29-JUL-09 12:21

DIV SSP II PTKS CLG

62 0254 371184

P.0

CILEGON

INVENTORY CONTROL SYSTEM

Item No : 00908011

DATE : 04.12.2007

GROUP/CLASS : 443019132

Nato-name : ELECTRODE,

Material Code	Material Unit	BOH	Min	Max
00908011	KG	9.000	50,000.000	150,000.000
GRAPHITE,ELECTRODE-D406X1800MM-20-46KA				
GRAPHITE ELECTRODE				
GRADE: ULTRA HIGH POWER (UHP)				
DIA.: 406 MM				
LENGTH: 1800 MM				
POROSITY:15 - 26%				
BULK DENSITY:1.66-1.72 GR/CM3				
RESISTANCE:5.0-6.0 OHM/M				
THERMAL CONDUCTIVITY:120-300 W/MK				
COMPRESIVE STRENGTH:260-262 KG/CM2				
CURRENT CARRYING CAPACITY:20-46 KA				
WEIGHT OF EACH SET POLE & 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 IN				
MANUFACTURE :				
GENSUPP ELECTRODE-ARC-D406MMX1800MM-20-46KA				

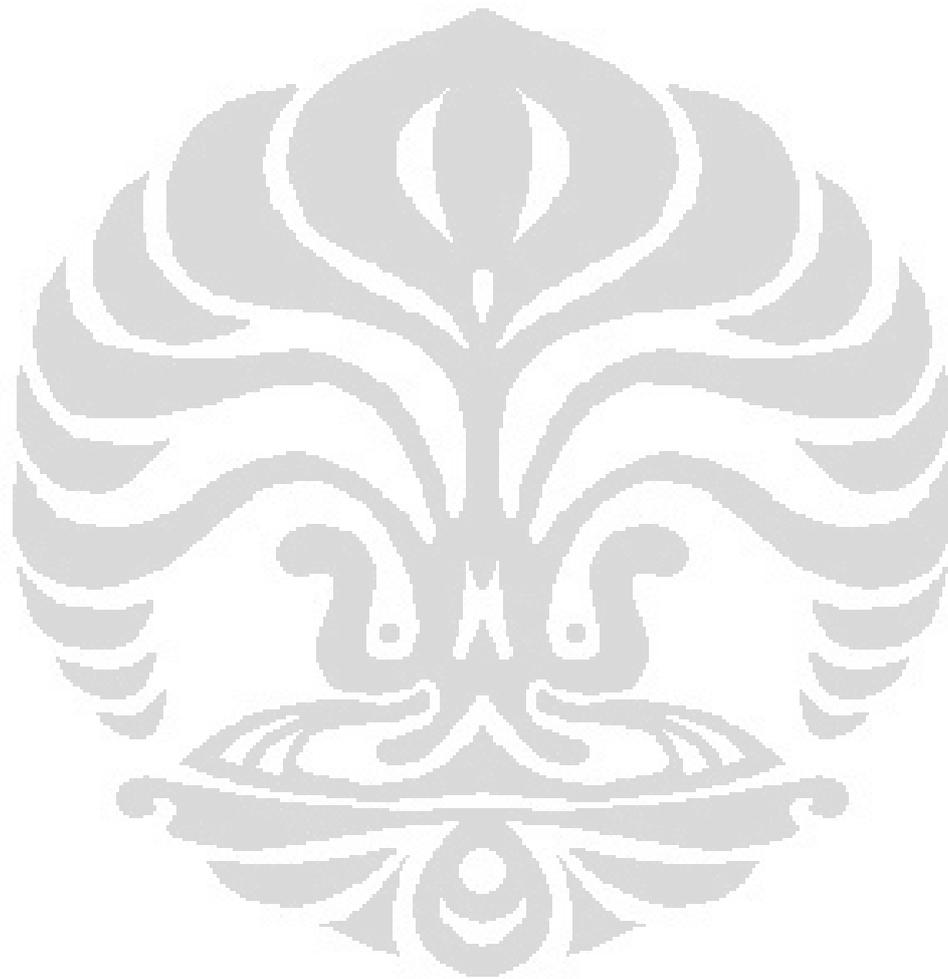
Lampiran 8. Tabel Densitas Air (simetric.co.uk)

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

	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0.999841	0.999847	0.999854	0.999860	0.999866	0.999872	0.999878	0.999884	0.999889	0.999895
1	0.999900	0.999905	0.999909	0.999914	0.999918	0.999923	0.999927	0.999930	0.999934	0.999938
2	0.999941	0.999944	0.999947	0.999950	0.999953	0.999955	0.999958	0.999960	0.999962	0.999964
3	0.999965	0.999967	0.999968	0.999969	0.999970	0.999971	0.999972	0.999972	0.999973	0.999973
4	0.999973	0.999973	0.999973	0.999972	0.999972	0.999972	0.999970	0.999969	0.999968	0.999966
5	0.999965	0.999963	0.999961	0.999959	0.999957	0.999955	0.999952	0.999950	0.999947	0.999944
6	0.999941	0.999938	0.999935	0.999931	0.999927	0.999924	0.999920	0.999916	0.999911	0.999907
7	0.999902	0.999898	0.999893	0.999888	0.999883	0.999877	0.999872	0.999866	0.999861	0.999855
8	0.999849	0.999843	0.999837	0.999830	0.999824	0.999817	0.999810	0.999803	0.999796	0.999789
9	0.999781	0.999774	0.999766	0.999758	0.999751	0.999742	0.999734	0.999726	0.999717	0.999709
10	0.999700	0.999691	0.999682	0.999673	0.999664	0.999654	0.999645	0.999635	0.999625	0.999615
11	0.999605	0.999595	0.999585	0.999574	0.999564	0.999553	0.999542	0.999531	0.999520	0.999509
12	0.999498	0.999486	0.999475	0.999463	0.999451	0.999439	0.999427	0.999415	0.999402	0.999390
13	0.999377	0.999364	0.999352	0.999339	0.999326	0.999312	0.999299	0.999285	0.999272	0.999258
14	0.999244	0.999230	0.999216	0.999202	0.999188	0.999173	0.999159	0.999144	0.999129	0.999114
15	0.999099	0.999084	0.999069	0.999054	0.999038	0.999023	0.999007	0.998991	0.998975	0.998959
16	0.998943	0.998926	0.998910	0.998893	0.998877	0.998860	0.998843	0.998826	0.998809	0.998792
17	0.998774	0.998757	0.998739	0.998722	0.998704	0.998686	0.998668	0.998650	0.998632	0.998613
18	0.998595	0.998576	0.998558	0.998539	0.998520	0.998501	0.998482	0.998463	0.998444	0.998424
19	0.998405	0.998385	0.998365	0.998345	0.998325	0.998305	0.998285	0.998265	0.998244	0.998224
20	0.998203	0.998183	0.998162	0.998141	0.998120	0.998099	0.998078	0.998056	0.998035	0.998013
21	0.997992	0.997970	0.997948	0.997926	0.997904	0.997882	0.997860	0.997837	0.997815	0.997792
22	0.997770	0.997747	0.997724	0.997701	0.997678	0.997655	0.997632	0.997608	0.997585	0.997561
23	0.997538	0.997514	0.997490	0.997466	0.997442	0.997418	0.997394	0.997369	0.997345	0.997320
24	0.997296	0.997271	0.997246	0.997221	0.997196	0.997171	0.997146	0.997120	0.997095	0.997069
25	0.997044	0.997018	0.996992	0.996967	0.996941	0.996914	0.996888	0.996862	0.996836	0.996809
26	0.996783	0.996756	0.996729	0.996703	0.996676	0.996649	0.996621	0.996594	0.996567	0.996540
27	0.996512	0.996485	0.996457	0.996429	0.996401	0.996373	0.996345	0.996317	0.996289	0.996261
28	0.996232	0.996204	0.996175	0.996147	0.996118	0.996089	0.996060	0.996031	0.996002	0.995973

Universitas Indonesia

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 9.** Peralatan yang Digunakan Dalam Penelitian

Nama Alat	Foto Alat
<p><i>Beaker glass</i></p>	
<p>Timbangan Digital</p>	
<p>Mesin Pengguncang</p>	

*Ball Mill*



*Hand Mixer*



*Hot Plate*



*Mesin Hot Press*



<p>Mesin <i>Conductivity Test</i></p>	
<p>Mesin <i>Flexural Test</i></p>	
<p>Cetakan</p>	