



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI PELAT BIPOLAR  
PEMFC DENGAN GRAFIT EAF 44 MIKRON DAN VARIASI  
UKURAN PARTIKEL 10% *CARBON BLACK***

**SKRIPSI**

**SUTAN DHANY P. L. TOBING  
0706268902**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JANUARI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI PELAT BIPOLAR  
PEMFC DENGAN GRAFIT EAF 44 MIKRON DAN VARIASI  
UKURAN PARTIKEL 10% *CARBON BLACK***

**SKRIPSI**

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

**SUTAN DHANY P. L. TOBING  
0706268902**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN 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 : Sutan Dhany P. L. Tobing**

**NPM : 0706268902**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 06 Januari 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Sutan Dhany P. L. Tobing  
NPM : 0706268902  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pembuatan dan Karakterisasi Pelat Bipolar PEMFC dengan  
Grafit EAF 44 mikron dan Variasi Ukuran Partikel 10%  
*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 Pri Handoko, M.T ( )

Penguji I : Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi, DEA ( )

Penguji II : Dra. Sari Katili, M.Si ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 06 Januari 2011

## KATA PENGANTAR

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

1. Ir. Yunita Sadeli, M.Sc., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, stamina, dan pikiran untuk mengarahkan dan membimbing penulis dalam penyusunan skripsi ini
2. Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T sebagai pembimbing dari Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang di tengah kesibukannya yang padat masih dapat meluangkan waktu membantu dan mengarahkan penelitian ini.
3. Pak Hendra dan Pak Subhan dari Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang telah membantu serangkaian pengujian untuk keperluan skripsi ini.
4. Kedua orang tua penulis, Sihar Lumban Tobing dan Tumiar Hutaaruk, serta seluruh keluarga besar penulis yang selalu mendoakan dan memberikan semangat, dukungan, dan motivasi bagi penulis.
5. Khaterin Gebriria, atas doa dan dukungan yang selalu diberikan kepada penulis.
6. Christine Samosir, Dinda Putri, Henny Indrawati, Mutakin, Fajar, dan Sukiman selaku teman satu kelompok penelitian pelat bipolar PEMFC.
7. Seluruh teman-teman metalurgi, dosen, dan karyawan yang banyak membantu dan memberikan dukungan kepada penulis.

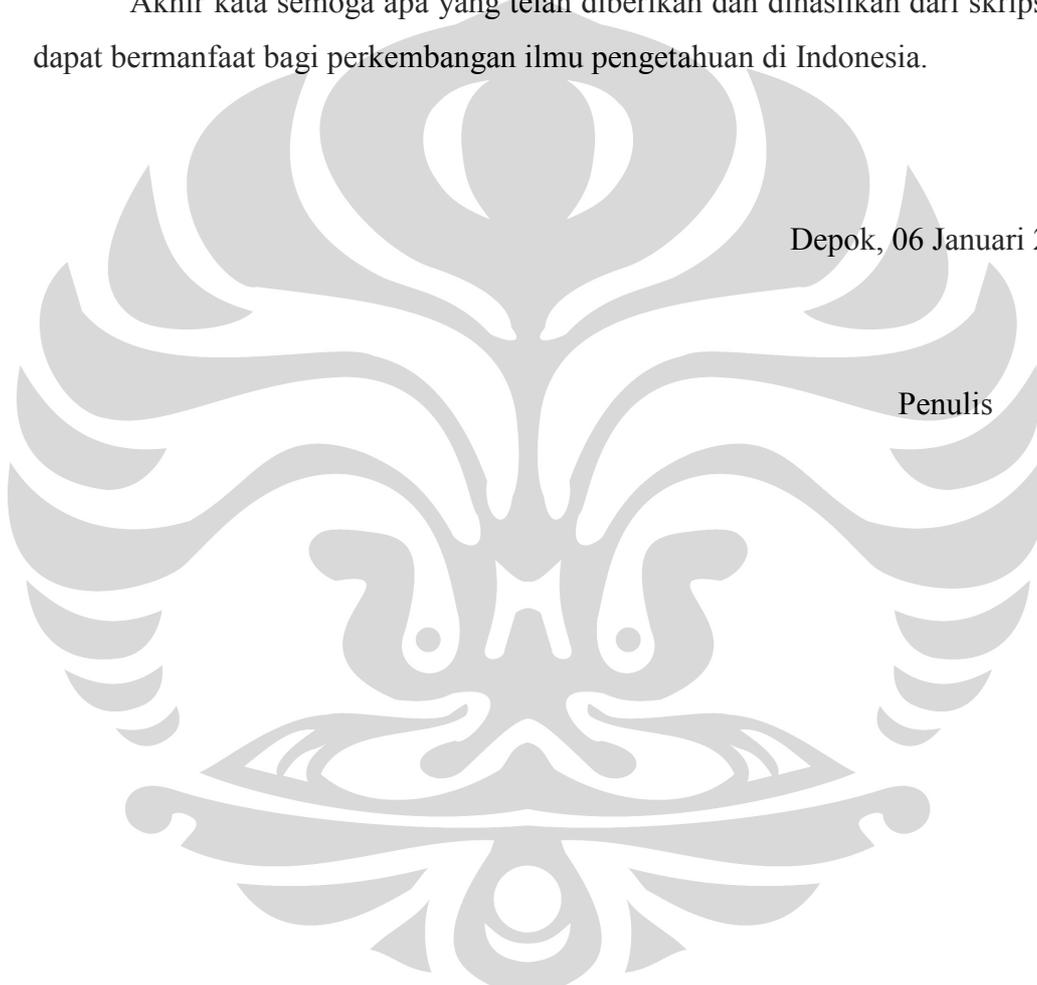
8. Pihak-pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Kepada mereka penulis mengucapkan terima kasih.

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

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

Depok, 06 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 : Sutan Dhany P. L. Tobing  
NPM : 0706268902  
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**Pembuatan dan Karakterisasi Pelat Bipolar PEMFC dengan Grafit  
EAF 44 mikron dan Variasi Ukuran Partikel 10% *Carbon Black***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 06 Januari 2011  
Yang menyatakan

(Sutan Dhany P. L. Tobing)

## ABSTRAK

Nama : Sutan Dhany P L Tobing  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Pembuatan dan Karakterisasi Pelat Bipolar PEMFC dengan Grafit EAF 44 mikron dan Variasi Ukuran Partikel 10% *Carbon Black*

Pelat bipolar merupakan komponen utama dalam *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Pada penelitian ini pelat bipolar dibuat dari karbon-karbon komposit yang terdiri dari matriks grafit *Electric Arc Furnace* (EAF), *carbon black* sebagai *filler*, dan resin epoksi sebagai *binder*.

Ukuran partikel *carbon black* yang digunakan adalah 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  dengan perbandingan 100:0; 90:10; 80:20; dan 70:30. Metode *compression moulding* dilakukan dalam pembuatan pelat bipolar dengan menggunakan tekanan 450  $\text{kg}/\text{cm}^2$  selama 4 jam pada temperatur 70<sup>o</sup>C.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ukuran partikel *carbon black* 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  dengan perbandingan 90:10 menghasilkan pelat bipolar dengan karakteristik optimum dengan nilai konduktivitas tertinggi sebesar 1,11 S/cm dan kekuatan fleksural sebesar 24,66 MPa. Namun demikian, densitas terendah sebesar 1,64  $\text{gr}/\text{cm}^3$  diperoleh dengan perbandingan 70:30, dan porositas terkecil 1,41% diperoleh dengan perbandingan 100:0. Pengamatan visual menunjukkan bahwa seluruh pelat bipolar mempunyai penampakan yang baik, tidak retak, dan permukaan yang rata.

Kata kunci: PEMFC, pelat bipolar, karbon-karbon komposit, *carbon black*, konduktivitas listrik, fleksural, densitas, porositas

## ABSTRACT

Name : Sutan Dhany P L Tobing  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : Preparation and Characterization of PEMFC Bipolar Plates with EAF Graphite 44 micron and Particle Size Variation of Carbon Black 10%

Bipolar plate is the main component in the *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC). In this study, bipolar plates made of carbon-carbon composites consisting of EAF (Electric Arc Furnace) graphite matrix, carbon black as filler, and epoxy as the binder.

The particle size of carbon black used in this study is 44  $\mu\text{m}$  and 37  $\mu\text{m}$  with ratio of 100:0; 90:10; 80:20; and 70:30. Compression moulding is used in the process with 450  $\text{kg}/\text{cm}^2$  pressure, for four hours with temperature of 700°C.

The result of this study shows that the particle size of carbon black 44  $\mu\text{m}$  and 37  $\mu\text{m}$  with ratio 90:10 has the highest value for conductivity, 1,11 S/cm, and for the flexural strength 24,66 MPa. The lowest density 1,64  $\text{gr}/\text{cm}^3$  attained in variation ratio 70:30, and the lowest porosity 1,41% attained in the variation ratio 100:0. Visual examination shows that all the bipolar plate have a good appearance, no cracks, and flat surface.

Keywords: PEMFC, bipolar plates, carbon-carbon composite, carbon black, electrical conductivity, flexural, density, porosity

## DAFTAR ISI

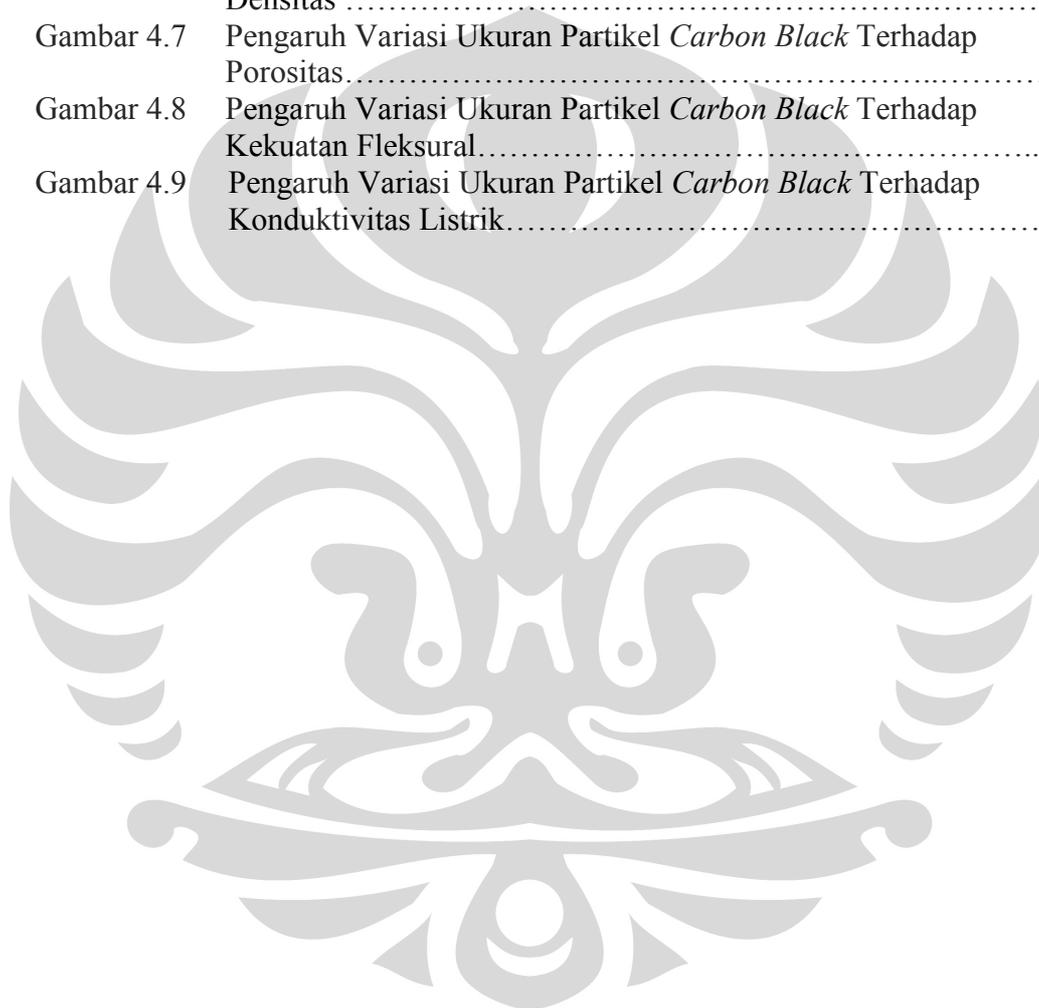
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACK.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
<b>1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	5
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
<b>2 TEORI PENUNJANG.....</b>	<b>7</b>
2.1 Sel Tunam ( <i>Fuel Cell</i> ).....	7
2.1.1 Prinsip Kerja Sel Tunam.....	8
2.1.2 Jenis-jenis Sel Tunam.....	9
2.2 <i>Polymer Electrolite Membrane Fuel Cell</i> (PEMFC).....	10
2.2.1 Struktur PEMFC.....	12
2.2.2 Pelat Bipolar.....	13
2.2.2.1 Klasifikasi Pelat Bipolar.....	14
2.2.2.2 Fungsi Pelat Bipolar.....	17
2.3 Material Komposit.....	18
2.4 Material Komposit Sebagai Bahan Pembuat Pelat Bipolar.....	21
2.4.1 Pelat Bipolar Karbon-Karbon Komposit.....	22
2.4.2 Material Penyusun Pelat Bipolar Karbon-Karbon Komposit.....	23
2.4.2.1 Grafit.....	23
2.4.2.2 Resin Epoksi.....	26
2.4.2.3 <i>Carbon Black</i> .....	29
2.4.2.4 Metanol.....	32
<b>3 METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>34</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	34
3.1.1 Diagram Alir Fabrikasi Sampel.....	34
3.1.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel.....	35
3.2 Komposisi Pelat Bipolar dan Variabel Penelitian.....	35
3.3 Alat dan Bahan.....	36
3.3.1 Peralatan.....	36

3.3.2 Bahan.....	37
3.4 Proses Pembuatan Pelat Bipolar.....	38
3.4.1 Penghalusan Grafit.....	38
3.4.2 Pembuatan <i>Carbon Black</i> .....	38
3.4.3 Penimbangan.....	39
3.4.4 Pencampuran.....	39
3.4.5 Pencetakan Pelat.....	39
3.5 Pembuatan Sampel Uji.....	40
3.6 Karakterisasi Pelat Bipolar.....	41
3.6.1 Pengujian Konduktivitas.....	41
3.6.2 Pengujian Densitas.....	42
3.6.3 Pengujian Porositas.....	43
3.6.4 Pengujian Fleksural.....	44
<b>4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>46</b>
4.1 Hasil Preparasi Sampel.....	46
4.1.1 Hasil Preparasi Grafit.....	46
4.1.2 Hasil Preparasi <i>Carbon Black</i> .....	46
4.1.3 Hasil Pencampuran Bahan ( <i>Mixing</i> ).....	47
4.2 Hasil Pencetakan Pelat Bipolar.....	48
4.3 Hasil Pembuatan Sampel Uji.....	49
4.4 Hasil Karakterisasi Sampel Uji.....	50
4.4.1 Hasil Pengujian Densitas.....	50
4.4.2 Hasil Pengujian Porositas.....	52
4.4.3 Hasil Pengujian Fleksural.....	53
4.4.4 Hasil Pengujian Konduktivitas.....	55
4.5 Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar.....	57
<b>5 KESIMPULAN.....</b>	<b>58</b>
<b>DAFTAR REFERENSI.....</b>	<b>59</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>63</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Laju Produksi dan Konsumsi Energi Primer.....	1
Gambar 1.2	Distribusi Massa Untuk <i>Stack</i> PEMFC.....	3
Gambar 2.1	Skema Operasi Sel Tunam Tunggal.....	7
Gambar 2.2	Reaksi Anoda dan Katoda Pada Berbagai Jenis Sel Tunam.....	10
Gambar 2.3	Skema Operasi PEMFC.....	11
Gambar 2.4	Skema Struktur Komponen PEMFC.....	12
Gambar 2.5	Pelat Bipolar dengan <i>Gas Flow Channel</i> .....	14
Gambar 2.6	Klasifikasi Pelat Bipolar dalam PEMFC.....	15
Gambar 2.7	Jenis Penguat yang Terdistribusi pada Matiks Komposit.....	18
Gambar 2.8	<i>Interface</i> dan <i>Interphase</i> pada Komposit.....	19
Gambar 2.9	Sudut Kontak yang Terbentuk Pada Komposit.....	19
Gambar 2.10	Skema Sudut Kontak dan Energi Bebas Permukaan Komposit....	20
Gambar 2.11	Parameter dari Bahan Pengisi pada Komposit: (a) Konsentrasi; (b) Ukuran; (c) Bentuk; (d) Distribusi; (e) Orientasi.....	21
Gambar 2.12	Struktur Kristal Grafit.....	23
Gambar 2.13	Elektroda Grafit pada Dapur Busur Listrik.....	25
Gambar 2.14	(a) Pengaruh Komposisi, dan (b) Pengaruh Ukuran Partikel Terhadap Resistivitas Listrik .....	25
Gambar 2.15	Struktur Dasar Resin Epoksi.....	27
Gambar 2.16	Pembentukan Jaringan dan Ikatan dari Resin Epoksi.....	27
Gambar 2.17	Pengaruh Fraksi Volume Resin Terhadap Densitas dan Porositas	28
Gambar 2.18	Pengaruh Jenis Resin dan Variasi <i>Carbon Black</i> Terhadap (a) Densitas, dan (b)Konduktivitas dari Pelat Bipolar Komposit...	29
Gambar 2.19	Struktur <i>Carbon Black</i> .....	30
Gambar 2.20	Pengaruh <i>Carbon Black</i> Pada Resin Epoksi Terhadap Resistivitas Pelat Bipolar.....	30
Gambar 2.21	Ilustrasi Skematik dari (a) Berbagai Hambatan Tersusun Secara Seri, (b) Partikel <i>Carbon Black</i> Ditempatkan di antara Lapisan Grafit Untuk Mengurangi Nilai Hambatan $R_e$ .....	31
Gambar 2.22	Pengaruh Komposisi <i>Carbon Black</i> Terhadap Kekuatan Fleksural.	32
Gambar 2.23	Struktur Metanol.....	32
Gambar 3.1	Diagram Alir Fabrikasi Sampel.....	34
Gambar 3.2	Diagram Alir Karakterisasi Sampel.....	35
Gambar 3.3	(a) Bahan Baku Sabut Kelapa; (b) Perangkat Oven untuk Pembuatan <i>Carbon Black</i> .....	38
Gambar 3.4	Hasil Pencampuran Bahan-bahan Penyusun Pelat Bipolar.....	39
Gambar 3.5	Proses Pencetakan pada Mesin <i>Hot Press</i> .....	40
Gambar 3.6	Spesimen Uji untuk Karakterisasi Pelat Bipolar.....	40
Gambar 3.7	Skema Uji Konduktivitas.....	41
Gambar 3.8	Mesin Veeco FPP 5000 - <i>Four Point Probe Test</i> .....	41
Gambar 3.9	Sampel Dipanaskan di dalam Air Pada Temperatur 100°C.....	43
Gambar 3.10	Gambar Skematis Pengujian Fleksural.....	44
Gambar 3.11	Pengujian Fleksural.....	45
Gambar 4.1	Grafit EAF (a) Bongkahan Grafit Sebelum Preparasi;	

	(b) Serbuk Grafit Hasil Preparasi.....	46
Gambar 4.2	<i>Carbon Black</i> (a) Hasil Pirolisis; (b) Hasil Pengayakan.....	47
Gambar 4.3	Hasil Pencampuran (a) Sebelum <i>Mixing</i> pada <i>Hot Plate</i> ; (b) Hasil Akhir <i>Hot Mixing</i> .....	47
Gambar 4.4	Hasil Pencetakan Pelat Bipolar dengan Variasi Ukuran Partikel <i>Carbon Black</i> 44 $\mu\text{m}$ dan 37 $\mu\text{m}$ dengan perbandingan: (a) 100:0 (b) 90:10 (c) 80:20 (d) 70:30.....	48
Gambar 4.5	Sampel Uji (a) Konduktivitas, Densitas, dan Porositas (b) Fleksural.....	49
Gambar 4.6	Pengaruh Variasi Ukuran Partikel <i>Carbon Black</i> Terhadap Densitas .....	51
Gambar 4.7	Pengaruh Variasi Ukuran Partikel <i>Carbon Black</i> Terhadap Porositas.....	52
Gambar 4.8	Pengaruh Variasi Ukuran Partikel <i>Carbon Black</i> Terhadap Kekuatan Fleksural.....	54
Gambar 4.9	Pengaruh Variasi Ukuran Partikel <i>Carbon Black</i> Terhadap Konduktivitas Listrik.....	56



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Jenis-jenis Sel Tunam .....	9
Tabel 2.2	Komponen Penyusun PEMFC.....	13
Tabel 2.3	Kelebihan dan Kekurangan Material Penyusun Pelat Bipolar.....	16
Tabel 2.4	Target Teknis DOE untuk Karakteristik Pelat Bipolar.....	17
Tabel 2.5	Sifat Umum Grafit.....	24
Tabel 2.6	Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel Grafit.....	26
Tabel 2.7	Sifat Umum Metanol.....	33
Tabel 3.1	Komposisi dan Pengkodean Formulasi Sampel.....	36
Tabel 4.1	Data Hasil Pengujian Densitas.....	50
Tabel 4.2	Data Hasil Pengujian Porositas.....	52
Tabel 4.3	Data Hasil Pengujian Fleksural.....	54
Tabel 4.4	Data Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik.....	55
Tabel 4.5	Perbandingan Sifat Pelat Bipolar.....	57



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Hasil Pengujian Densitas.....	63
Lampiran 2	Hasil Pengujian Porositas.....	64
Lampiran 3	Hasil Pengujian Fleksural.....	65
Lampiran 4	Hasil Pengujian Konduktivitas.....	66
Lampiran 5	Tabel Densitas Air (simetri.co.uk).....	67
Lampiran 6	Spesifikasi Resin Epoksi.....	69
Lampiran 7	Spesifikasi <i>Hardener</i> Epoksi.....	70
Lampiran 8	Spesifikasi Grafit EAF.....	71

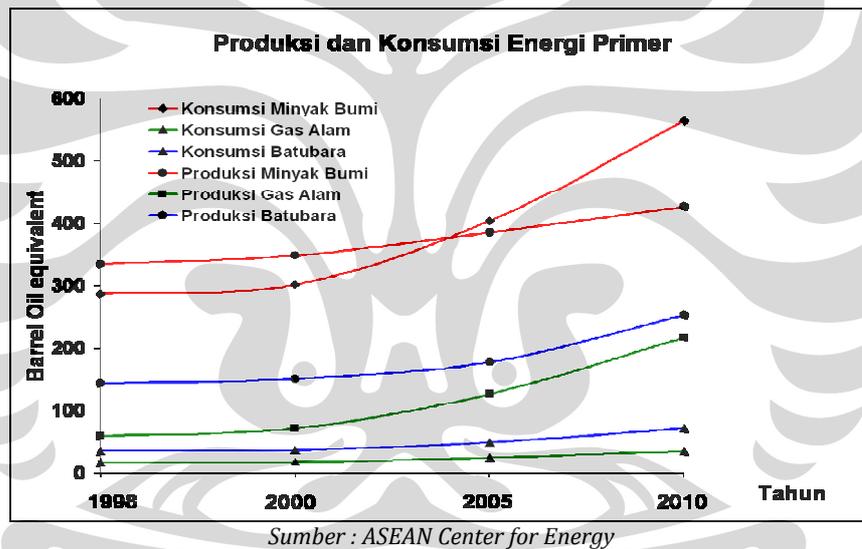


# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan zaman yang semakin maju dan teknologi yang semakin modern menyebabkan tingkat kebutuhan manusia dalam mengkonsumsi energi terus meningkat. Hal ini bisa kita lihat dari laju konsumsi terhadap energi bahan bakar yang terus meningkat setiap tahun <sup>[1]</sup>, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.1 dapat dilihat bahwa konsumsi energi bahan bakar, terutama minyak bumi, mengalami peningkatan yang cukup signifikan dari tahun 1998 hingga tahun 2010.



Gambar 1.1 Laju Produksi dan Konsumsi Energi Primer<sup>[1]</sup>

Saat ini dunia sangat bergantung kepada minyak bumi sebagai sumber energi. Namun, minyak bumi merupakan sumber energi yang tak dapat diperbaharui dan ketersediaannya di alam pun semakin menipis. Kondisi tersebut mendorong manusia untuk mencari sumber energi alternatif yang dapat diperbaharui, murah dan efisien. Salah satu energi alternatif yang sedang marak dikembangkan saat ini adalah *fuel cell* atau sel tunam.

Sel tunam merupakan salah satu teknologi penghasil energi listrik yang bersih, efisien dan ramah lingkungan karena dalam aplikasinya tidak dibutuhkan

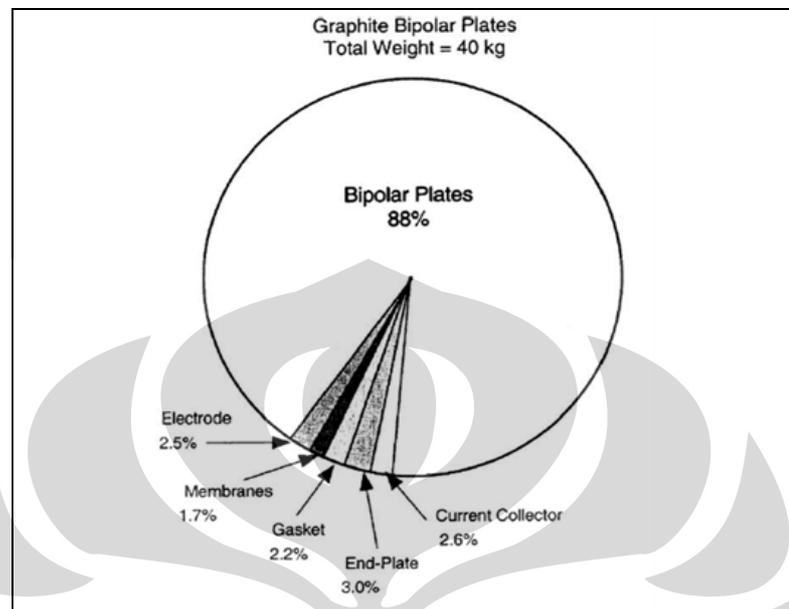
suatu reaksi pembakaran yang dapat menghasilkan gas atau emisi gas buang yang berbahaya. Prinsip kerja sel tunam adalah proses elektrokimia, yaitu mengubah energi kimia menjadi energi listrik dengan menggunakan media elektrolit. Sel tunam memiliki banyak kelebihan dilihat dari segi efisiensi, portabilitas, kebisingan yang rendah, dan emisi yang dihasilkan <sup>[2]</sup>. Oleh karena itu, sel tunam merupakan energi alternatif masa depan yang sangat menjanjikan.

Salah satu jenis sel tunam yang sedang dikembangkan saat ini adalah *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) untuk aplikasi transportasi dan peralatan elektronik portabel. Keunggulan PEMFC adalah memiliki efisiensi dan kerapatan arus tinggi, temperatur aplikasi yang relatif rendah, suplai bahan bakar yang baik, dan waktu pakai yang panjang <sup>[3]</sup>. Akan tetapi, PEMFC belum dapat diproduksi secara massal dan dikomersialisasi dengan berbagai alasan antara lain, masalah biaya produksi yang tinggi, densitas penyimpanan hidrogen yang rendah, serta masalah bobot dan daya tahan dari PEMFC.

Komponen penting yang terdapat pada PEMFC antara lain pelat bipolar, pelat penutup, *Membran Electrolite Assembly* (MEA), dan pengumpul arus. Dari keempat komponen tersebut, yang akan dijadikan fokus dalam penelitian ini adalah pelat bipolar. Pelat bipolar berfungsi sebagai pemisah antar *single stack*, pendistribusi bahan bakar, pengatur distribusi air dan panas, serta penghantar arus keluar sel <sup>[4]</sup>. Pelat bipolar berpengaruh terhadap 80% volum, 70% berat, dan 60% biaya dari sel tunam <sup>[3]</sup>. Pada Gambar 1.2 dapat dilihat bahwa komponen pelat bipolar mencakup hampir sebagian besar dari total berat PEMFC.

Pelat bipolar merupakan salah satu bagian terpenting dari PEMFC sebagai faktor penyebab tingginya biaya produksi PEMFC. Usaha untuk mengurangi ukuran, berat, dan biaya pelat bipolar yang digunakan, dapat mengurangi biaya produksi dari PEMFC secara keseluruhan. Oleh karena itu, yang harus dikembangkan adalah bagaimana mendapatkan pelat bipolar dengan berat komponen yang ringan, performa yang baik dalam hal sifat mekanis, konduktivitas listrik, serta biaya produksi yang rendah. Salah satunya adalah dengan cara pembuatan pelat bipolar dengan material komposit. Penggunaan pelat bipolar komposit banyak diteliti karena pelat ini mampu menggabungkan

kelebihan dari beberapa sifat material yang berbeda sehingga dapat meningkatkan sifat material serta meminimalisasi kelemahan dari material tersebut.



**Gambar 1.2** Distribusi Massa untuk *Stack* PEMFC<sup>[6]</sup>

Dalam pengembangan material ini, kita perlu memperhatikan sifat dan performa dari komponen pelat bipolar tersebut. Hal ini dikarenakan fungsi pelat ini yang sangat penting, yaitu sebagai sebagai pengumpul arus muatan listrik (*electrical current*), sebagai alur pemasok bahan bakar itu sendiri atau dapat dikatakan sebagai pengatur pendistribusian bahan bakar, sebagai penahan lewatnya gas secara langsung (*gas barrier*), serta sebagai penyalur sisa reaksi/hasil samping<sup>[5]</sup>. Oleh karena itu, pemilihan material yang tepat sebagai penyusun pelat bipolar komposit perlu diperhatikan agar penggunaan sel tunam sebagai penghasil energi listrik dapat bernilai ekonomis dan memiliki efisiensi yang tinggi.

Pada penelitian ini dibuat pelat bipolar dari karbon-karbon komposit, yaitu komposit berbasis grafit yang menggunakan *carbon black* sebagai pengisi, dan epoksi sebagai *binder*. Grafit yang digunakan berasal dari limbah EAF (*Electric Arc Furnace*) atau elektroda dapur listrik proses peleburan baja. *Carbon black* yang digunakan berasal dari serat alami (serabut kelapa) yang dihasilkan dari proses pirolisis. Dengan demikian, dari penelitian ini diharapkan pelat bipolar

yang dibuat memiliki karakteristik yang diharapkan sesuai aplikasi sel tunam, dan juga dapat mereduksi biaya produksi dari pelat bipolar tersebut.

## 1.2 Perumusan Masalah

Perkembangan penggunaan PEMFC sebagai energi alternatif memiliki kendala dalam hal mahalnya biaya produksi pembuatan pelat bipolar. Upaya yang dilakukan untuk mengatasi permasalahan tingginya biaya produksi adalah pemilihan material untuk pembuatan pelat bipolar yang lebih ringan dan ekonomis. Salah satunya dengan menggunakan material polimer yang memiliki densitas yang rendah, sehingga berat dari pelat bipolar sebesar 80% dari total berat PEMFC dapat dikurangi dan biaya produksi pun dapat direduksi. Akan tetapi, polimer pada umumnya memiliki nilai konduktivitas yang sangat rendah. Oleh karena itu, perlu dilakukan pencampuran dengan material lain seperti *carbon black* untuk mendapatkan konduktivitas yang baik.

Menanggapi permasalahan di atas, karbon-karbon komposit digunakan sebagai material pelat bipolar. Penggunaan material komposit diharapkan bisa mendapatkan sifat terbaik dari kombinasi sifat material penyusun yang digunakan untuk kebutuhan suatu aplikasi yang diinginkan. Material penyusun yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari grafit EAF sebagai matriks, *carbon black* sebagai pengisi, dan resin epoksi sebagai *binder*. Penambahan *carbon black* dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan nilai konduktivitas dan nilai fleksibilitas dari pelat bipolar. Pada penelitian ini juga akan dilihat pengaruh variasi dari *carbon black* berdasarkan ukuran partikel terhadap karakteristik pelat bipolar yang dihasilkan. Dengan mendapatkan variasi ukuran partikel yang optimum akan diperoleh pelat bipolar komposit dengan sifat mekanis dan konduktivitas listrik yang baik.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui komposisi yang optimum dari masing-masing material yang digunakan dalam pembuatan pelat bipolar komposit seperti grafit, *carbon black*, dan resin epoksi.

2. Mengetahui pengaruh 10%wt. *carbon black* dengan variasi ukuran partikel 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  terhadap sifat densitas, porositas, konduktivitas, dan kekuatan fleksural dari pelat bipolar komposit.
3. Mendapatkan variasi ukuran partikel *carbon black* yang optimum untuk membuat pelat bipolar dengan sifat yang memenuhi persyaratan.

#### 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Pada penelitian ini pelat bipolar dibuat dari material karbon-karbon komposit dengan perbandingan komposisi dari berat total material yang digunakan adalah:

1. 80%wt. karbon yang terdiri dari campuran 90%wt. grafit EAF berukuran 44  $\mu\text{m}$  dan 10%wt. *carbon black*
2. 20%wt. terdiri dari resin epoksi dan *hardener*

Ukuran partikel 10%wt. *carbon black* yang digunakan dalam penelitian ini divariasikan antara ukuran partikel 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  dengan perbandingan 100:0; 90:10; 80:20; dan 70:30. Pembuatan pelat bipolar dilakukan dengan metode *compression moulding* yang menggunakan tekanan 450  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , dengan temperatur cetakan 70°C selama 4 jam. Setelah proses pembuatan pelat, dilakukan pengujian untuk mengetahui sifat yang dihasilkan. Karakterisasi material yang akan dipelajari pada penelitian ini adalah pengujian konduktivitas (*four point probe test*- ASTM B193), pengujian densitas (ASTM D792), pengujian porositas (ASTM C20), dan pengujian fleksural (ASTM D790) untuk mengetahui sifat mekanis dan sifat konduktivitas listrik dari pelat bipolar tersebut.

#### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan skripsi ini dapat dilihat pada uraian berikut:

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

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

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

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

**BAB 3: METODOLOGI PENELITIAN**

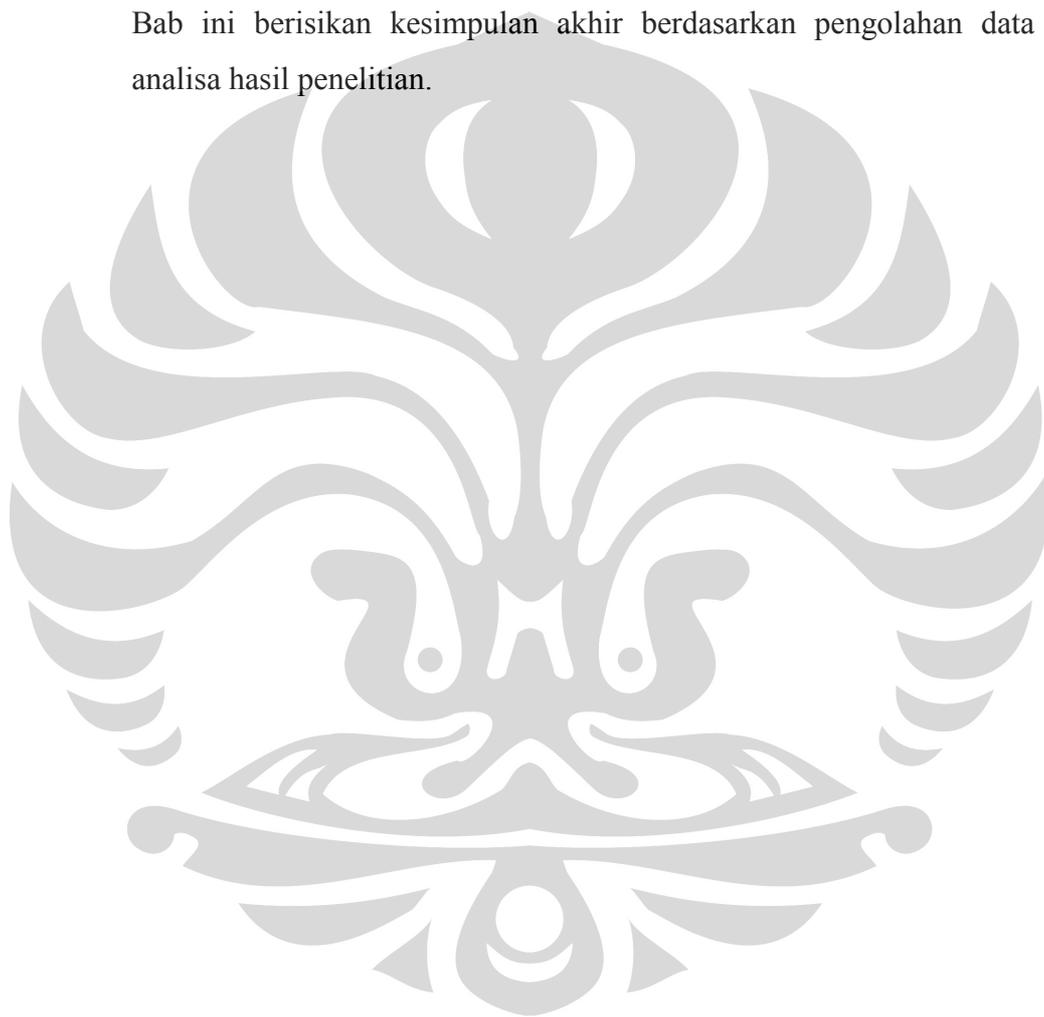
Bab ini berisikan prosedur penelitian, daftar peralatan, dan komposisi bahan yang digunakan dalam penelitian.

**BAB 4: HASIL DAN PEMBAHASAN**

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

**BAB 5: KESIMPULAN**

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

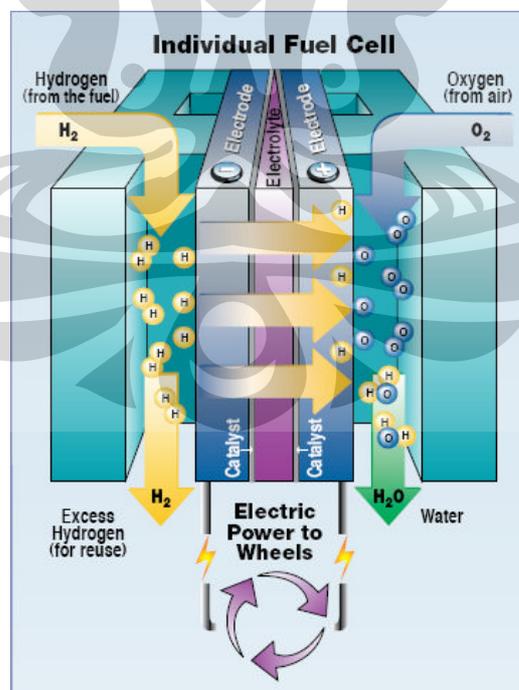


## BAB 2

### TEORI PENUNJANG

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

Sel tunam adalah perangkat konversi energi yang akan mengubah hidrogen dan oksigen menjadi energi listrik, dan secara bersamaan menghasilkan air dan panas dalam prosesnya. Hal ini menyebabkan sel tunam tidak mencemari lingkungan seperti penghasil listrik konvensional yang memanfaatkan bahan bakar fosil. Hidrogen yang digunakan sebagai sumber bahan bakar dapat berasal dari gas alam, propana, butana, metanol, serta bahan bakar diesel, sedangkan oksigen berasal dari udara. Sel tunam tidak memerlukan sistem pengisian ulang, tidak seperti pada baterai, dimana energi akan terus dihasilkan selama bahan bakar diberikan [7]. Efisiensi proses yang dihasilkan juga lebih tinggi dibandingkan penghasil listrik konvensional, yang berarti dengan jumlah bahan bakar yang sama, energi listrik yang akan dihasilkan lebih banyak. Gambar 2.1 menunjukkan skema operasi dari sel tunam tunggal.



Gambar 2.1 Skema Operasi Sel Tunam Tunggal [8]

### 2.1.1 Prinsip Kerja Sel Tunam

Prinsip kerja dari sel tunam adalah mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik. Proses tersebut terjadi karena adanya proses oksidasi bahan bakar dan reduksi oksigen sehingga terbentuk proton dan elektron sebagai partikel bermuatan listrik (ion). Melalui sebuah elektrolit proton akan berpindah dari anoda (elektroda negatif) ke katoda (elektroda positif), sementara elektron akan mengalir melalui suatu beban eksternal memberikan kerja arus listrik<sup>[2]</sup>.

Reaksi yang terjadi pada anoda adalah reaksi oksidasi hidrogen menjadi proton:



Setiap molekul  $\text{H}_2$  terpecah menjadi dua atom  $\text{H}^+$  (proton), sedangkan setiap atom hidrogen melepaskan elektronnya. Proton ini akan bergerak menuju katoda melewati membran. Elektron yang dihasilkan tersebut merupakan sumber dari energi listrik. Reaksi yang terjadi pada katoda adalah:



Molekul oksigen akan bergabung dengan empat elektron, untuk selanjutnya bergabung lagi dengan proton yang mengalir dari anoda dan akan menghasilkan air<sup>[9]</sup>.

Penggunaan teknologi sel tunam sebagai sumber penghasil listrik memiliki banyak keuntungan, antara lain<sup>[7]</sup>:

1. Penggunaan energi fosil yang pesediaannya makin terbatas dapat dikurangi, sehingga ketergantungan akan kebutuhan energi fosil pun dapat dikurangi.
2. Dapat meningkatkan ketersediaan energi listrik.
3. Biaya operasi yang lebih rendah dibandingkan dengan penghasil energi listrik konvensional.
4. Menghasilkan energi listrik dengan jumlah yang tetap.
5. Bahan bakar yang digunakan tersedia dalam jumlah yang banyak (gas hidrogen dan gas oksigen).
6. Emisi yang dihasilkan tidak mencemari lingkungan (hanya berupa air).
7. Tidak menghasilkan polusi bunyi pada saat operasi.

8. Memiliki efisiensi yang tinggi hingga 90%, sehingga penggunaan bahan bakar pun lebih efisien.

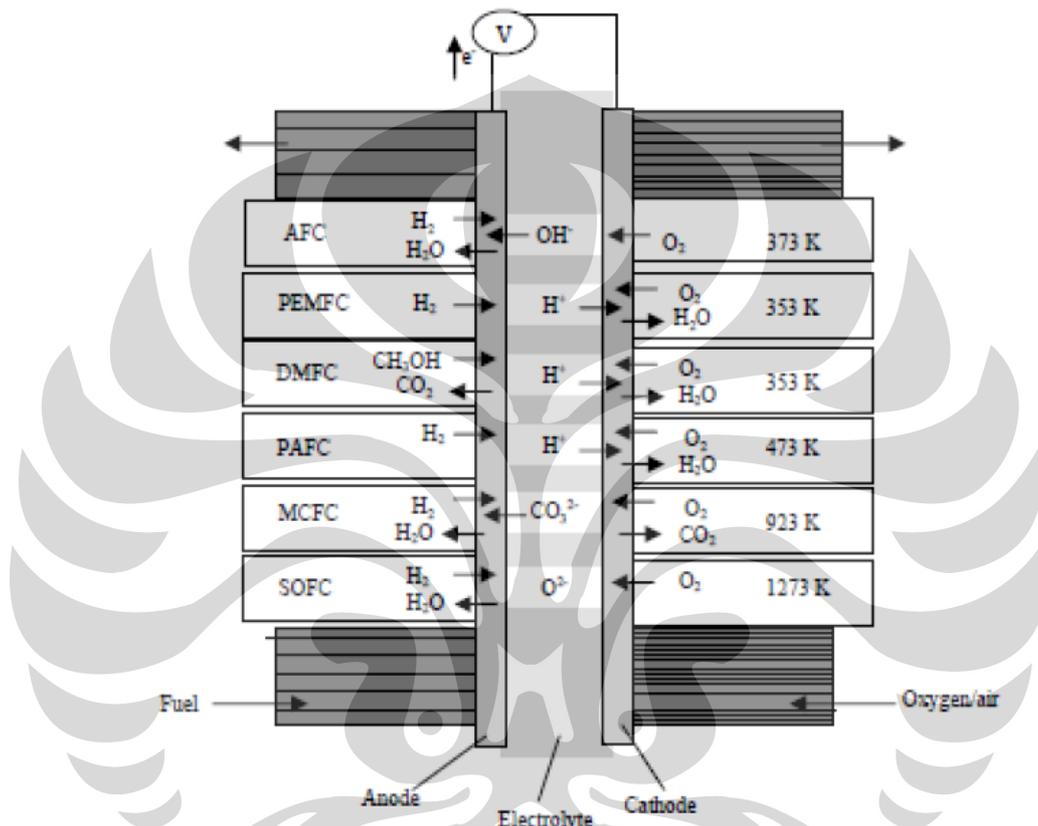
### 2.1.2 Jenis-jenis Sel Tunam

Sel tunam terdiri dari lima jenis yang dibedakan berdasarkan elektrolit yang digunakan. Perbedaan lainnya terdapat pada jenis material penyusun, metode fabrikasi, dan aplikasi. Pada Tabel 2.1 berikut ini diinformasikan secara detail mengenai perbedaan beberapa jenis sel tunam.

**Tabel 2.1** Jenis-jenis Sel Tunam <sup>[2,7-10]</sup>

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

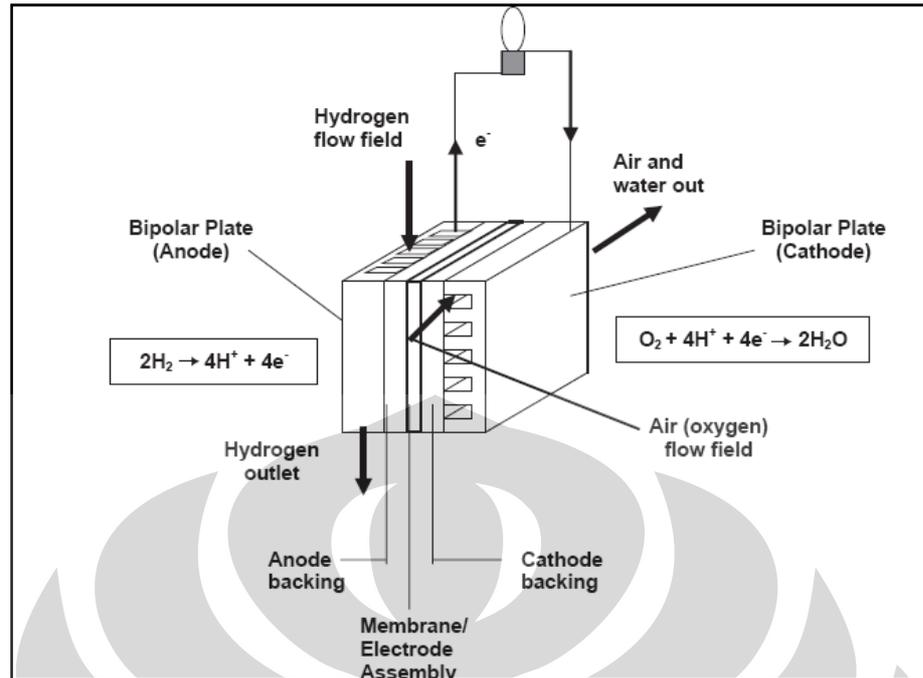
Dari Tabel 2.1 di atas terlihat bahwa kelima jenis sel tunam menggunakan sumber energi yang berbeda dan menghasilkan emisi yang berbeda pula jika digunakan untuk bahan bakar hidrokarbon. Reaksi yang terjadi pada anoda dan katoda dari masing-masing sel juga berbeda sesuai dengan bahan bakar yang digunakan, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.2<sup>[10]</sup>.



Gambar 2.2 Reaksi Anoda dan Katoda Pada Berbagai Jenis Sel Tunam<sup>[10]</sup>

## 2.2 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

*Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell* atau yang disebut juga sebagai *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* merupakan komponen yang terdiri dari elektrolit dan elektroda berbentuk padat<sup>[11]</sup>. Elektrolit terbuat dari polimer padat terhidrasi (*fluorinated sulfonic acid polymer* dan sejenisnya) yang berfungsi sebagai membran pertukaran ion. Sedangkan elektroda terbuat dari karbon berpori yang mengandung katalis (Pt)<sup>[12]</sup>. Satu-satunya cairan dalam PEMFC adalah air hasil reaksi elektrokimia seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2.3 Skema Operasi PEMFC <sup>[4]</sup>

Dari beberapa jenis sel tunam yang dikembangkan, PEMFC merupakan sumber energi yang paling berpotensi untuk aplikasi pada perumahan dan bidang otomotif. Hal ini dikarenakan beberapa keunggulan yang dimiliki oleh PEMFC, seperti mampu menghasilkan energi yang besar, temperatur operasi yang rendah, sehingga membuat sel ini dapat bereaksi lebih cepat, dan dapat meminimalisasi adanya unsur penyebab korosi <sup>[2]</sup>, suplai bahan bakar yang baik, serta daya tahan yang baik <sup>[13]</sup>. Akan tetapi, dalam prakteknya, kehilangan tegangan dan *overpotential* yang terjadi selama beroperasi dapat mengurangi efisiensi dari keunggulannya tersebut <sup>[13]</sup>. Sel ini juga mengalami keterbatasan terhadap bahan bakar yang digunakan, yaitu hidrogen, mengingat kadar H<sub>2</sub> di udara cukup rendah dan biaya pembuatannya pun masih mahal, sehingga perlu dilakukan pengembangan untuk mengurangi keterbatasan tersebut <sup>[3]</sup>.

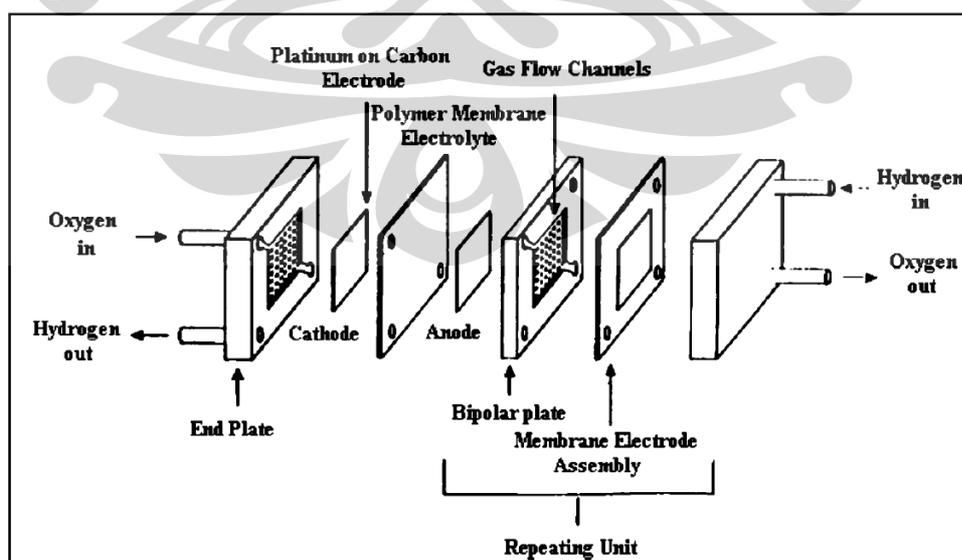
Pengoperasian PEMFC juga memiliki permasalahan efisiensi berkaitan dengan sumber bahan bakar. Sumber bahan bakar hidrogen umumnya memiliki pengotor berupa karbon monoksida (CO). Pengotor akan bereaksi dengan katalis Pt yang berada di anoda. Kondisi ini menyebabkan fungsi katalis terhambat dan menurunkan efisiensi sistem. Oleh karena itu dibutuhkan sumber bahan bakar hidrogen dengan tingkat kemurnian tinggi. Hidrogen murni memiliki densitas

rendah sehingga perlu *hydrogen storage* berupa tabung bertekanan tinggi. Namun kondisi ini sulit diaplikasikan pada *Fuel Cell Vehicle* (FCV) karena dengan begitu dibutuhkan kapasitas penyimpanan yang besar sehingga berat kendaraan meningkat. Solusinya adalah menggunakan sumber bahan hidrogen dengan densitas yang lebih besar sehingga kapasitas penyimpanan menjadi kecil, meskipun dibutuhkan tambahan biaya untuk membuat *fuel reformer* <sup>[12]</sup>.

PEMFC beroperasi pada kisaran temperatur 80°C. Hal ini membuatnya cepat bereaksi untuk menghasilkan energi yang dibutuhkan. Sel tunam ini memiliki rasio energi terhadap berat yang tinggi serta ketahanan korosi dan durabilitas komponen yang baik. Karakteristik tersebut menjadi dasar pemanfaatan PEMFC sebagai FCV dengan tingkat kebutuhan efisiensi yang tinggi. Pencapaian nilai efisiensi tersebut tentunya juga memerlukan pengaturan keseimbangan air dan panas hasil reaksi elektrokimia secara baik serta pengaturan kualitas sumber bahan bakar hidrogen <sup>[2,12]</sup>.

### 2.2.1 Struktur PEMFC

PEMFC memiliki beberapa komponen primer yang memegang peranan penting dalam menjalankan fungsi dari PEMFC itu sendiri, yaitu *Membrane Electrolyte Assembly (MEA)*, pelat bipolar, *endplate*, dan pengumpul arus. Susunan komponen PEMFC dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skema Struktur Komponen PEMFC <sup>[13]</sup>

Karakter dan fungsi dari keempat komponen utama dalam PEMFC tersebut, secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini.

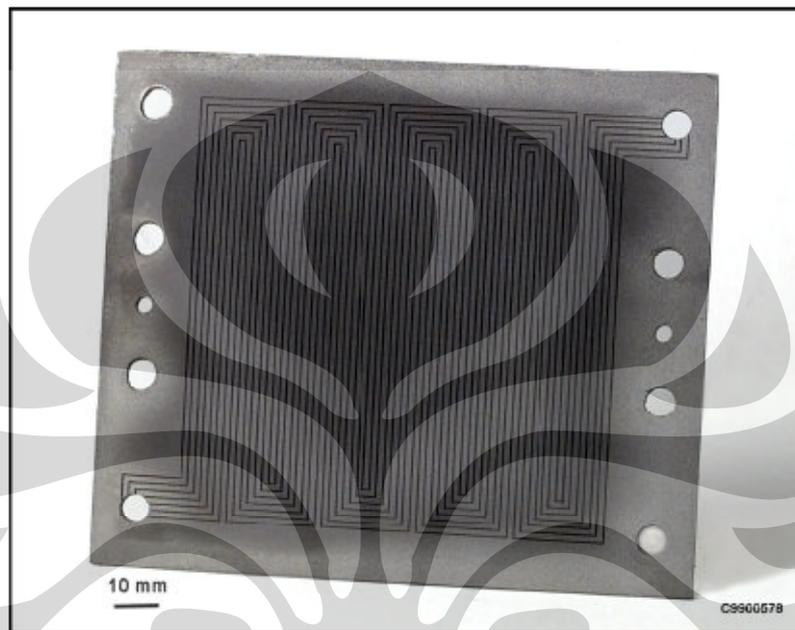
**Tabel 2.2** Komponen Penyusun PEMFC <sup>[3]</sup>

<b>Komponen</b>	<b>Material</b>	<b>Fungsi</b>
<i>Membrane Electrolyte Assembly</i> (MEA)	Terdiri dari dua elektroda, satu membran elektrolit, dan dua <i>Gas Diffusion Layer</i> . Polimer solid terimpregnasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memisahkan reaksi setengah sel antara anoda-katoda.</li> <li>• Mendistribusikan proton dari anoda ke katoda.</li> <li>• Mendistribusikan gas secara merata pada lapisan difusi gas kedalam lapisan katalis.</li> <li>• Mengalirkan elektron dari area aktif menuju pelat bipolar.</li> <li>• Membantu pengaturan air.</li> </ul>
Pelat Bipolar	Grafit, <i>stainless steel</i> , atau komposit polimer.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mendistribusikan gas di bagian area aktif membran.</li> <li>• Mengalirkan elektron dari anoda ke katoda</li> <li>• Mendistribusikan air keluar sel.</li> </ul>
<i>End plate</i>	Material dengan kekuatan mekanik yang baik (baja ataupun paduan aluminium).	Membentuk rangkaian PEMFC yang terintegrasi.
Pengumpul Arus	Logam dengan kontak elektrik & konduktivitas yang baik (Cu).	Menyimpan dan mentransfer arus dari dalam menuju keluar sirkuit.

### 2.2.2 Pelat Bipolar

Pelat bipolar seringkali dikenal pula dengan sebutan *flow field plate* atau pelat separator. Pelat bipolar memiliki dua fungsi utama, yaitu mengalirkan gas reaktan menuju *gas diffusion layer* melalui *flow channel* dan mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda <sup>[14]</sup>. Seperti yang telah dijelaskan dalam bab

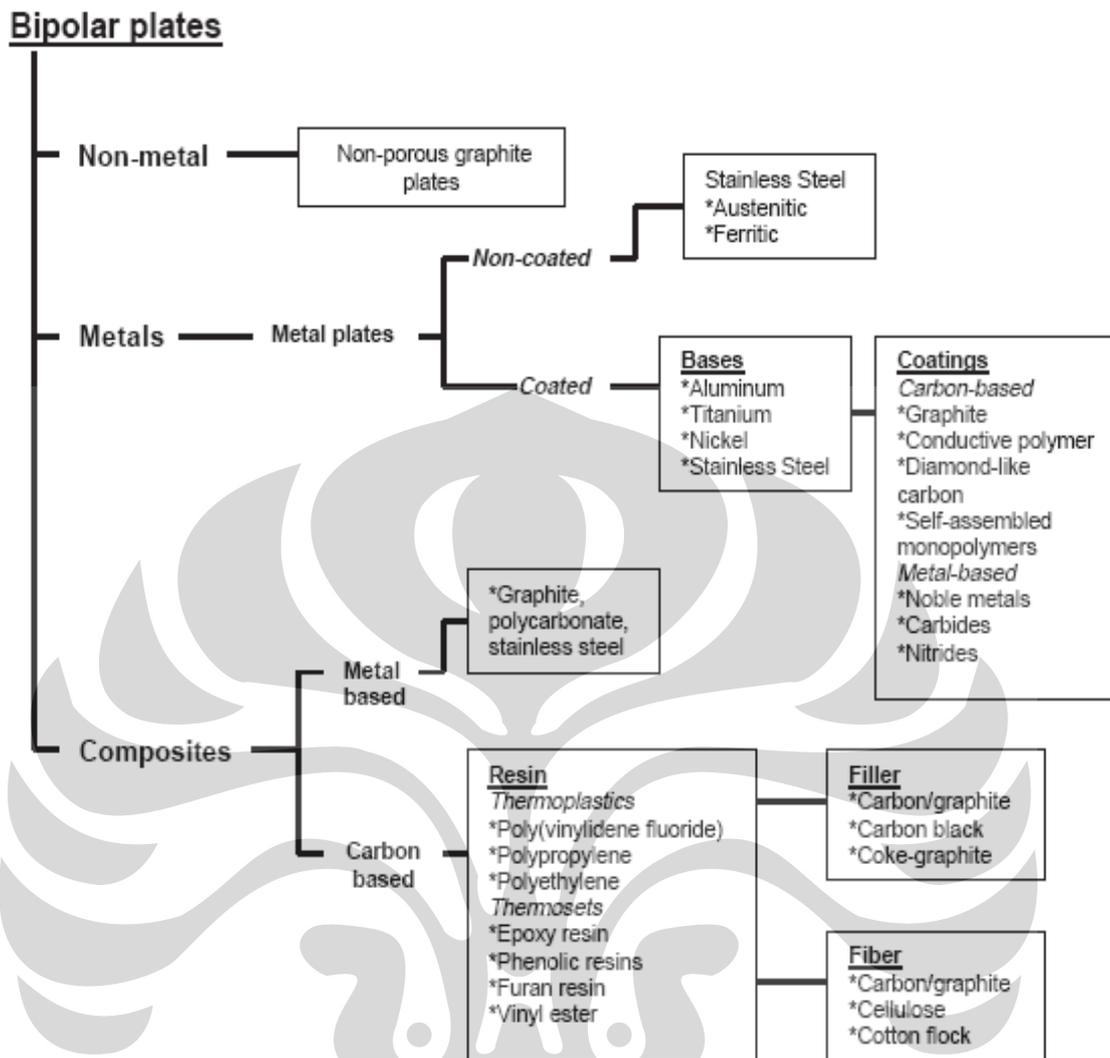
pendahuluan, pelat bipolar konvensional berkontribusi terhadap 80% volume, 70% berat, dan 60% biaya dari sel tunam<sup>[3]</sup>. Oleh karena itu pelat bipolar harus dibuat setipis dan seringan mungkin, ekonomis, dan mudah dibentuk<sup>[6]</sup>. Pada Gambar 2.5 dapat dilihat contoh pelat bipolar hasil pencetakan dengan ketebalan minimum disertai *flow field* pada bagian permukaannya<sup>[17]</sup>.



Gambar 2.5 Pelat Bipolar dengan *Gas Flow Channel*<sup>[17]</sup>

### 2.2.2.1 Klasifikasi Pelat Bipolar

Pelat bipolar harus dibuat dari material yang memiliki sifat konduktivitas listrik yang tinggi dan tidak dapat dilewati oleh gas atau memiliki sifat permeabilitas yang rendah. Sifat tersebut dibutuhkan untuk menghasilkan aliran elektron yang baik dalam sistem operasi sel tunam. Sifat tersebut dapat diperoleh dari beberapa material dasar pembentuk pelat bipolar seperti material grafit, logam, maupun komposit<sup>[4,14-15]</sup>. Material dasar tersebut memiliki sifat tertentu yang membedakan proses fabrikasi, biaya produksi serta aplikasi dari pelat bipolar. Jenis-jenis material dasar penyusun pelat bipolar dapat dilihat pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Klasifikasi Pelat Bipolar dalam PEMFC <sup>[4]</sup>

Setiap material dasar yang digunakan sebagai penyusun pelat bipolar difungsikan untuk aplikasi tertentu yang spesifik. Material tersebut memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing yang menjadi dasar perbedaan pemanfaatannya, seperti terlihat pada Tabel 2.3. Hal ini dikarenakan dalam kondisi pengaplikasian yang berbeda maka dibutuhkan sifat pelat bipolar yang berbeda pula baik dari segi sifat mekanis, sifat kimia, sifat kelistrikan maupun sifat termal. Pertimbangan dari segi ekonomi juga menjadi bagian penting. Pemilihan material yang tepat sebagai penyusun pelat bipolar perlu dilakukan dengan cermat agar penggunaan sel tunam sebagai penghasil energi listrik dapat bernilai ekonomis dan memiliki efisiensi yang tinggi <sup>[12]</sup>.

Tabel 2.3 Kelebihan dan Kekurangan Material Penyusun Pelat Bipolar <sup>[14]</sup>

Material	Kelebihan	Keterbatasan
<b>Grafit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ketahanan korosi baik.</li> <li>• Resistivitas rendah.</li> <li>• Resistansi kontak rendah.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sifat mekanik buruk (getas).</li> <li>• Porositas.</li> <li>• Volume dan berat yang besar.</li> <li>• Biaya produksi tinggi.</li> </ul>
<b>Komposit Karbon - Karbon</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densitas rendah.</li> <li>• Ketahanan korosi baik.</li> <li>• Resistansi kontak rendah.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kekuatan mekanik rendah.</li> <li>• Konduktivitas listrik rendah.</li> <li>• Harga relatif mahal.</li> </ul>
<b>Komposit Karbon - Polimer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatif murah.</li> <li>• Ketahanan korosi baik.</li> <li>• Densitas rendah.</li> <li>• Tidak perlu adanya permesinan tambahan untuk membuat <i>flow field</i>.</li> <li>• Ketersediaan bahan baku.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kekuatan mekanik rendah.</li> <li>• Konduktivitas listrik rendah.</li> </ul>
<b>Logam</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konduktivitas listrik tinggi.</li> <li>• Konduktivitas panas tinggi.</li> <li>• Biaya produksi rendah</li> <li>• Sifat mekanik baik.</li> <li>• Proses fabrikasi relatif mudah.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rentan terjadi korosi (terbentuk oksida pada membran).</li> </ul>

Salah satu fokus pemanfaatan PEMFC adalah sebagai FCV (*fuel cell vehicle*). Aplikasi ini membutuhkan tingkat efisiensi tinggi yang dapat diperoleh dengan cara merekayasa desain dan rekayasa material penyusunnya. Tujuannya adalah untuk menurunkan berat kendaraan sehingga mengurangi daya yang dibutuhkan untuk mobilisasi. Bahan yang digunakan sebagai komponen pelat bipolar perlu dipastikan agar memenuhi karakteristik standar untuk aplikasi FCV. Seperti yang disyaratkan US DOE (*Department of Energy*) pada Tabel 2.4 berikut.

**Tabel 2.4** Target Teknis DOE (*Department of Energy-USA*) untuk Karakteristik Pelat Bipolar <sup>[16]</sup>

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

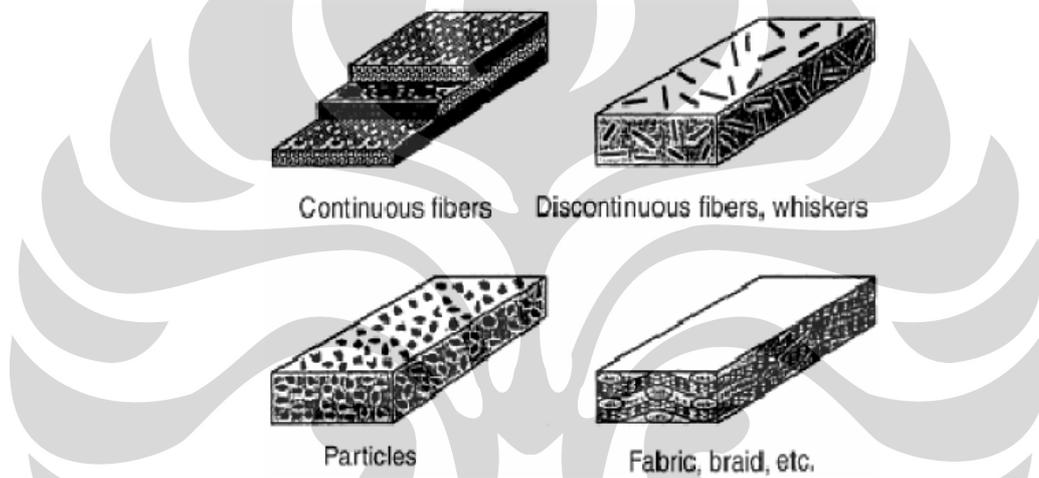
### 2.2.2.2 Fungsi Pelat Bipolar

Pelat bipolar memiliki banyak fungsi dalam lingkungan operasi PEMFC. Beberapa fungsi dari pelat bipolar adalah sebagai berikut <sup>[18,22]</sup>:

1. Membawa elektron menuju sirkuit, termasuk:
  - a. mengumpulkan dan mengalirkan elektron dari anoda dan katoda
  - b. menghubungkan komponen sel, yang membentuk susunan/ rangkaian sel tunam yang menghasilkan suatu tegangan (rangkaiian sel tunam tergantung pada bentuk pelat bipolar)
2. Menyediakan *flow field* untuk mendistribusikan gas secara merata ke seluruh elektroda
3. Memisahkan oksidan dan bahan bakar gas, mengangkut gas H<sub>2</sub> menuju anoda dan O<sub>2</sub> ke katoda, serta membuang hasil reaksi berupa air
4. Penguat mekanik sekaligus penahan membran tipis dan elektroda serta sebagai penjepit rangkaian sel tunam
5. Konduktor panas untuk mengatur temperatur sel tunam dan melepaskan panas dari elektroda ke saluran pendingin

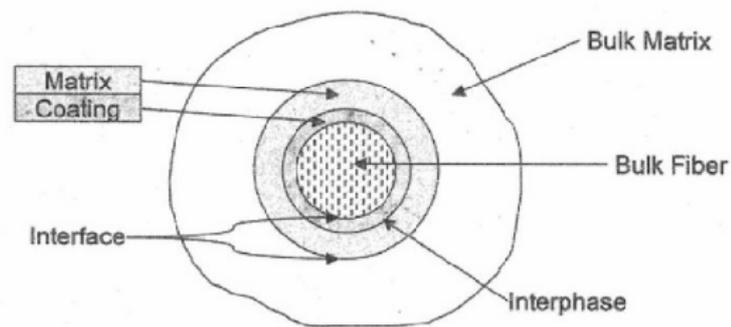
### 2.3 Material Komposit

Komposit adalah material hasil kombinasi makroskopis dari dua atau lebih material dengan sifat dan bentuk berbeda yang disatukan oleh suatu ikatan permukaan <sup>[19]</sup>. Tujuan pembuatan material komposit adalah mendapatkan sifat (mekanis, optis, termal maupun kelistrikan) terbaik dari kombinasi sifat dasar material penyusunnya untuk kebutuhan suatu aplikasi tertentu. Konstituen yang menyusun material komposit disebut sebagai matriks (*matrix*) dan penguat (*reinforcement*) <sup>[12]</sup>. Pada Gambar 2.7 dapat dilihat berbagai jenis penguat yang terdispersi pada suatu matriks.



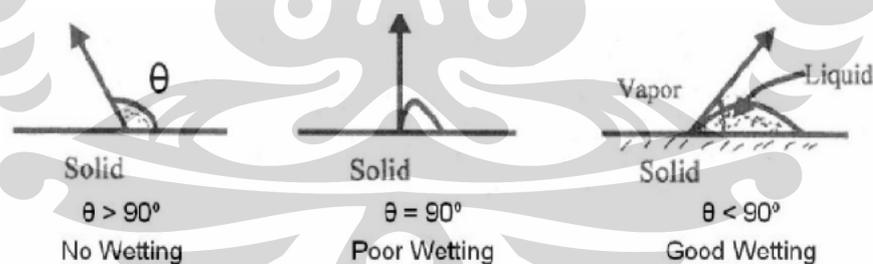
Gambar 2.7 Jenis Penguat yang Terdistribusi pada Matriks Komposit <sup>[19]</sup>

Matriks berfungsi sebagai pengikat dan penransfer beban ke penguat, sedangkan penguat berfungsi sebagai penahan beban tersebut. Fungsi dari matriks yang lain adalah penentu stabilitas komposit terhadap temperatur, pelindung penguat dari lingkungan abrasif dan korosif, media transfer tegangan, pemberi ketangguhan dan kekuatan geser serta penjaga orientasi penguat yang terdispersi di dalamnya. Dalam memenuhi fungsi tersebut matriks perlu membasahi permukaan penguat dengan baik agar dihasilkan ikatan permukaan (ikatan antarmuka dan ikatan antar fasa) di antara keduanya, seperti terlihat pada Gambar 2.8. Ikatan permukaan berfungsi sebagai jembatan transfer energi ketika material komposit menerima suatu nilai pembebanan <sup>[12]</sup>.



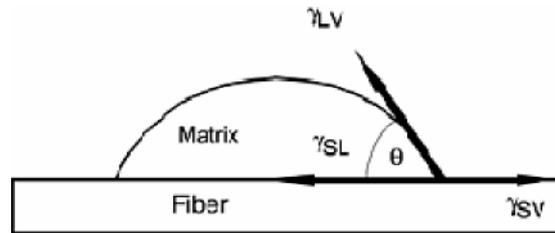
Gambar 2.8 *Interface* dan *Interphase* pada Komposit <sup>[19]</sup>

Ikatan permukaan yang terbentuk antara matriks dan penguat sangat mempengaruhi sifat akhir dari material komposit. Daya pembasahan merupakan faktor penting untuk menghasilkan ikatan permukaan yang baik. Indikator yang digunakan sebagai penentu daya pembasahan adalah dengan menguji pembentukan sudut kontak antar kedua konstituen. Pada Gambar 2.9 ditunjukkan daya pembasahan akan bersifat baik apabila sudut kontak yang terbentuk kurang dari  $90^\circ$ <sup>[19]</sup>. Namun apabila sudut kontak yang terbentuk lebih dari  $90^\circ$  maka daya pembasahan dianggap buruk atau tidak terjadi pembasahan sama sekali. Daya pembasahan yang buruk dapat diperbaiki dengan menambahkan suatu *wetting agent* terhadap konstituen.



Gambar 2.9 Sudut Kontak yang Terbentuk pada Komposit <sup>[19]</sup>

Daya pembasahan dipengaruhi oleh besar energi permukaan yang dimiliki oleh konstituen, seperti terlihat pada Gambar 2.10. Daya pembasahan yang baik dapat dicapai ketika energi permukaan penguat bernilai lebih besar dari energi permukaan matriks. Energi permukaan dapat dihitung menggunakan persamaan Young – Dupré atau “*work of adhesion (WA)*” berikut ini:



**Gambar 2.10** Skema Sudut Kontak dan Energi Bebas Permukaan Komposit <sup>[16]</sup>

$$W_A = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (2.3)$$

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LV} \cos\theta + \gamma_{SL} \quad (2.4)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.3) ke persamaan (2.4) maka didapatkan:

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

Keterangan:  $\gamma_{LV}$  = energi bebas permukaan *liquid-vapor*

$\gamma_{SV}$  = energi bebas permukaan *solid-vapor*

$\gamma_{SL}$  = energi bebas permukaan *solid-liquid*

$W_A$  = *work of adhesion*

$\theta$  = sudut kontak

Selain memperhatikan daya pembasahan untuk menghasilkan ikatan permukaan dan sifat akhir komposit yang baik, nilai komposisi antar konstituen juga perlu diperhatikan agar didapatkan sifat material komposit yang sesuai dengan kebutuhan. Sifat akhir dari material komposit akan didominasi oleh material dengan komposisi (fraksi volume) terbesar. Sifat akhir yang dipengaruhi oleh komposisi tersebut biasanya berupa koefisien elongasi, densitas, rasio tegangan, rasio regangan, kekerasan, dll. Pengaruh komposisi terhadap sifat komposit ini diturunkan menggunakan *rule of mixture* untuk memprediksi sifat akhir komposit <sup>[12,20]</sup>.

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.6)$$

$$\rho = \frac{m_c}{v_c} = \frac{m_f + m_m}{V_f + V_m + V_v} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{\rho_f + V_m + V_v} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{1} \quad (2.7)$$

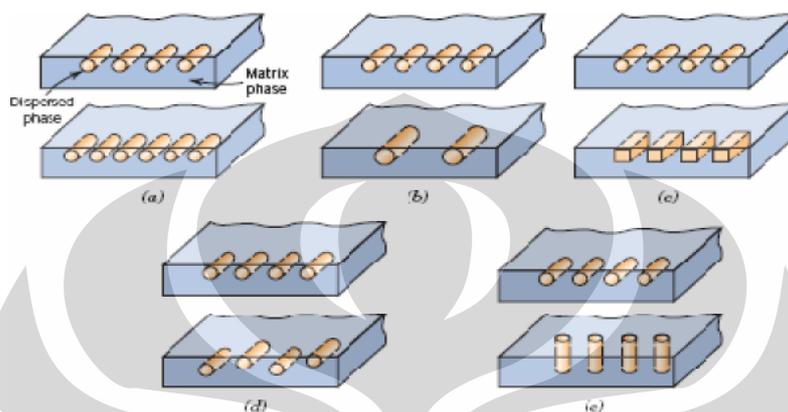
Keterangan: Komposit (c); Matriks (m); Penguat (f)

E = Modulus Elastisitas [MPa]

V = Fraksi Volume [%]

$\rho$  = Densitas [gr/cm<sup>3</sup>]

Faktor lain yang mempengaruhi sifat dari komposit adalah fasa yang terdispersi dalam suatu matriks. Fasa terdispersi atau penguat umumnya memiliki distribusi, konsentrasi, orientasi, bentuk, dan ukuran yang berbeda, seperti terlihat pada Gambar 2.11. Hal ini dapat dijadikan parameter lain sebagai dasar merencanakan sifat komposit melalui pemanfaatan dari fasa terdispersi <sup>[12]</sup>.



**Gambar 2.11** Parameter dari Bahan Pengisi pada Komposit: (a) Konsentrasi; (b) Ukuran; (c) Bentuk; (d) Distribusi; (e) Orientasi <sup>[20]</sup>

## 2.4 Material Komposit Sebagai Bahan Pembuat Pelat Bipolar

Pembuatan pelat bipolar dari material komposit merupakan solusi untuk mengembangkan material baru guna memperoleh sifat mekanis dan konduktivitas yang baik dengan berat yang ringan. Penggunaan pelat bipolar komposit dalam berbagai aplikasi banyak diminati karena pelat ini mampu menggabungkan kelebihan dari dua sifat material yang berbeda dan meminimalisasi kerugian dari material tersebut. Sehingga sampai saat ini pengembangan material komposit untuk komponen pelat bipolar terus dilakukan guna mendapatkan sifat material yang baik dan memenuhi persyaratan dari pelat bipolar. Adapun sifat-sifat yang dihasilkan dari pelat bipolar komposit antara lain <sup>[15]</sup>:

1. Memiliki stabilitas kekuatan yang cukup baik untuk menahan beban kompresi
2. Memiliki berat dan volume yang rendah
3. Memiliki nilai konduktivitas termal dan listrik yang tinggi
4. Permeabilitas gas yang rendah untuk hidrogen
5. Memiliki ketahanan kimia dan korosi yang baik

## 6. Biaya material dan proses yang relatif kecil

Jenis pelat bipolar komposit umumnya dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu komposit berbasis logam dan karbon. Biasanya, pelat bipolar dengan material komposit logam menggunakan grafit berpori, plastik polikarbonat, dan baja tahan karat. Sedangkan pada komposit berbasis karbon biasa digunakan bahan pengikat atau *binder* berupa polimer, baik polimer termoplastik, seperti polipropilen dan polietilen, serta polimer termoset, seperti resin epoksi, resin *phenolic*, maupun vinil ester. Pada komposit berbasis karbon biasa ditambahkan bahan pengisi (*filler*), baik yang berbentuk partikel maupun serat (*fiber*) guna meningkatkan sifat dari pelat bipolar<sup>[3]</sup>.

### 2.4.1 Pelat Bipolar Karbon-Karbon Komposit

Karbon-karbon komposit merupakan klasifikasi dari komposit berbasis karbon<sup>[22]</sup>. Komposit jenis ini terdiri dari material karbon sebagai material penyusun utama (matriks), seperti grafit, dan menggunakan material karbon sebagai pengisi (*filler*), misalnya *carbon black*, untuk meningkatkan sifat dari komposit. Polimer biasanya digunakan sebagai *binder* dengan tujuan untuk memperkuat ikatan antara matriks dengan *filler carbon*. Metode fabrikasi yang umum digunakan untuk membuat karbon-karbon komposit adalah *chemical-vapor infiltration* (CVI)<sup>[17,22]</sup>.

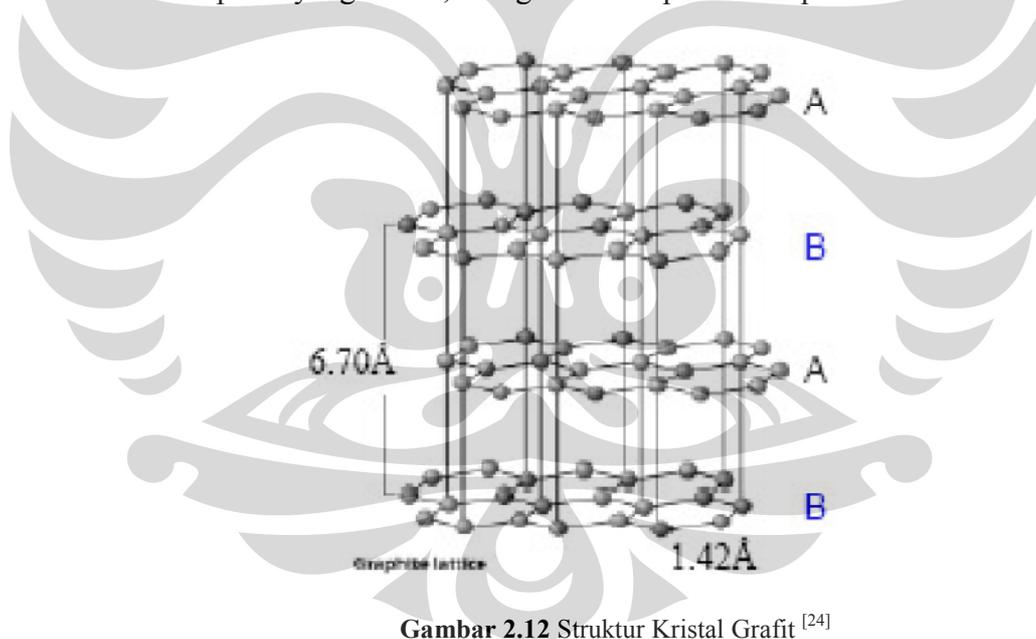
Pelat bipolar yang telah banyak digunakan dan dikembangkan pada sistem PEMFC adalah pelat berbasis grafit, yang memberikan beberapa keuntungan dalam hal ketahanan terhadap korosi, menghasilkan konduktivitas panas dan listrik yang baik, dan memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan pelat logam<sup>[11,21]</sup>. Namun, sifat mekanis yang dihasilkan buruk, karena pelat ini sangat getas dan berpori. Sehingga perlu dilakukan penambahan material lain untuk memperbaiki sifat mekanis, seperti *carbon black* sebagai *filler* dan polimer sebagai *binder*. Oleh karena itu, pengembangan material karbon-karbon komposit ini diharapkan untuk mendapatkan sifat yang sesuai dengan fungsi dan aplikasi pelat bipolar. Pada penelitian ini pembuatan pelat bipolar dari material karbon-karbon komposit menggunakan grafit sebagai matriks, *carbon black* sebagai pengisi dan polimer resin epoksi sebagai pengikat.

## 2.4.2 Material Penyusun Pelat Bipolar Karbon-Karbon Komposit

### 2.4.2.1 Grafit

Grafit merupakan jenis material karbon yang terbentuk dari atom-atom karbon yang membentuk ikatan " $sp^2$ ". Satu atom karbon membentuk ikatan dengan tiga atom karbon lainnya. Jika dilihat dalam skala mikroskopis material grafit ini terdiri atas lembaran-lembaran datar atom-atom karbon yang berikatan, biasanya disebut sebagai "graphene". Graphene-graphene ini saling membentuk ikatan satu sama lain melalui ikatan lemah *van der waals*. Sifat struktur ikatan dan interaksi dinamis antara "lembaran graphene" menghasilkan sifat konduktivitas listrik yang besar serta sifat sebagai pelumas (pelumas). Material grafit ini berperan sebagai konduktor listrik yang baik dan bahan untuk pelumas [23].

Grafit merupakan salah satu bentuk alotropi dari karbon yang terdiri dari susunan atom-atom karbon secara heksagonal yang membentuk kisi planar dengan ikatan antar lapisan yang lemah, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.12 [24].



Gambar 2.12 Struktur Kristal Grafit [24]

Kisi yang terbentuk memiliki kekakuan yang tinggi, namun mudah mengalami pergeseran antar lapisan. Grafit dengan struktur seperti ini akan menghasilkan sifat yang unik, sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi, baik sebagai material utama maupun material pengisi. Secara umum, sifat dari grafit dapat dilihat pada Tabel 2.5.

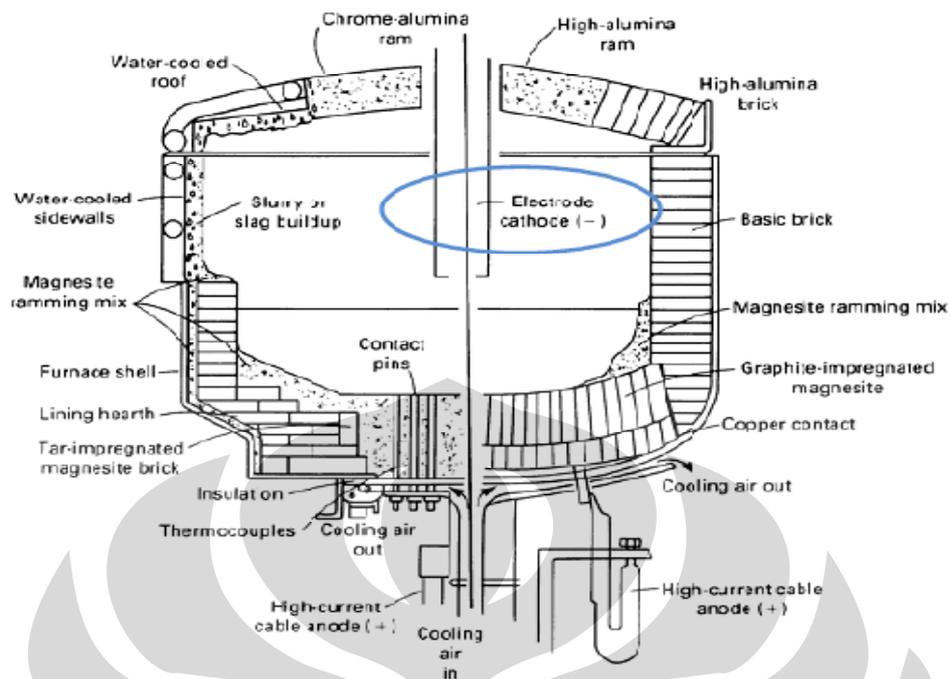
Tabel 2.5 Sifat Umum Grafit <sup>[18]</sup>

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

Adapun sifat kimia dan fisik dari grafit adalah sebagai berikut <sup>[12]</sup>:

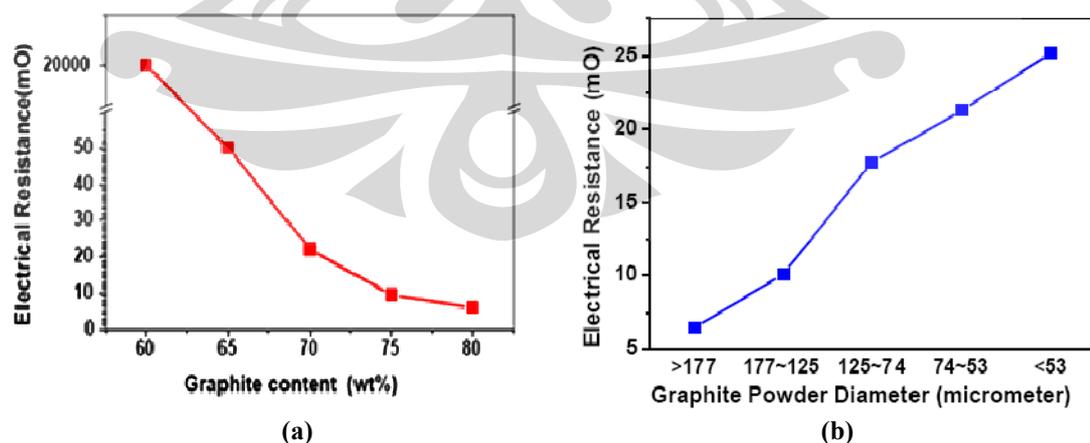
1. Memiliki konduktivitas panas dan listrik yang sangat baik
2. Memiliki sifat lubrikasi yang baik pada tekanan dan temperatur yang tinggi
3. Ketahanan oksidasi dan daya tahan terhadap unsur kimia tinggi
4. Kemampuan untuk mengikat molekul kimia di antara lapisan grafit

Pada penelitian ini, grafit limbah (*recycled*) dari elektroda yang digunakan pada proses peleburan dapur busur listrik, digunakan sebagai material utama pada sistem karbon-karbon komposit dikarenakan harganya yang lebih murah dibandingkan grafit sintesis dan dapat berpotensi mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah elektroda. Pada dapur busur listrik, elektroda ini berfungsi menghantarkan arus listrik hingga menghasilkan energi panas tinggi yang mampu mencapai titik lebur besi maupun baja. Oleh karena itu, grafit yang digunakan memiliki konduktivitas listrik yang baik. Pada Gambar 2.13 di bawah ini ditunjukkan penggunaan grafit sebagai elektroda dalam suatu dapur busur listrik.



Gambar 2.13 Elektroda Grafit pada Dapur Busur Listrik<sup>[32]</sup>

Grafit dalam aplikasi komposit dapat berfungsi sebagai material konduktif yang dapat mengurangi resistansi listrik dari pelat bipolar, meningkatkan koefisien friksi, serta meningkatkan konduktivitas termal<sup>[25]</sup>. Penambahan grafit juga akan meningkatkan *machinability* dari material komposit karena fungsinya yang baik sebagai pelumas padat. Gambar 2.14 menunjukkan pengaruh penambahan grafit terhadap resistivitas listrik dari pelat bipolar<sup>[26]</sup>.



Gambar 2.14 (a) Pengaruh Komposisi, dan (b) Pengaruh Ukuran Partikel Terhadap Resistivitas Listrik<sup>[26]</sup>

Pada Gambar 2.14a dapat dilihat bahwa resistansi listrik dari pelat bipolar komposit menurun dengan penambahan komposisi grafit, misalnya dengan penambahan dari komposisi 60% ke 80% resistansi listrik menurun dari 2000 m $\Omega$  menjadi 5,8 m $\Omega$ . Sedangkan pada gambar 2.14b ditunjukkan bahwa resistansi listrik meningkat dengan ukuran partikel yang semakin kecil, misalnya dari 6,5 m $\Omega$  (ukuran partikel 1000-177  $\mu\text{m}$ ) menjadi 25,2 m $\Omega$  (ukuran lebih kecil dari 53  $\mu\text{m}$ ). Peningkatan nilai resistansi didapat dengan ukuran partikel yang semakin kecil <sup>[26]</sup>.

Ukuran, arah, dan bentuk dari partikel grafit yang digunakan akan mempengaruhi sifat dari komposit yang dihasilkan, terutama sifat 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. Kekuatan fleksural dari grafit yang berbentuk partikel lebih baik dibandingkan dengan grafit berbentuk serpih (*flake*), karena tegangan yang diterima oleh grafit akan tersebar merata di seluruh permukaannya, sehingga regangan yang terjadi akan semakin kecil. Pada Tabel 2.6 ditunjukkan bahwa semakin kecil ukuran dari partikel, akan menurunkan nilai konduktivitasnya, namun secara tidak langsung akan meningkatkan kekuatannya.

Tabel 2.6 Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel Grafit <sup>[27]</sup>

Sample	Particle size	Direction	Bulk electrical conductivity (S/cm)	Thermometric conductivity [W/(m $\cdot$ °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	

#### 2.4.2.2 Resin Epoksi

Epoksi merupakan salah satu jenis polimer yang tergolong dalam polimer termoset, yang memiliki sifat tidak dapat menerima siklus pemanasan dan pendinginan berulang secara kontiniu. Ketika dipanaskan pada tahap awal,

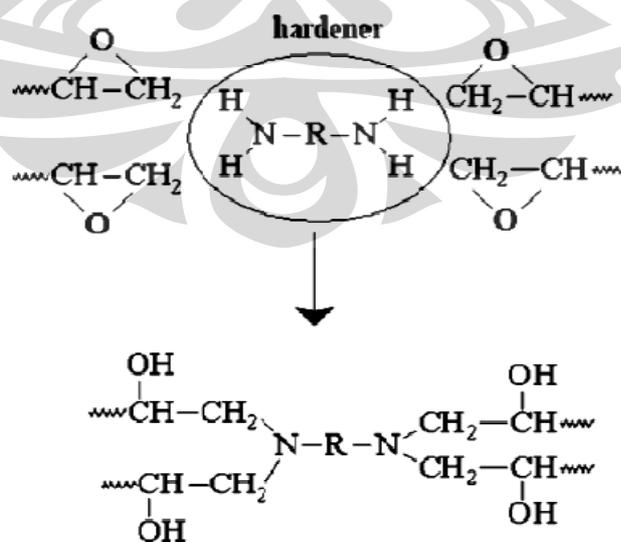
polimer ini akan melunak dan mampu mengalir di dalam cetakan, kemudian akan mengalami reaksi kimia yang diikuti dengan pengerasan. Ketika dipanaskan ulang, epoksi tidak mampu melunak kembali ke bentuk semula, melainkan akan terdegradasi <sup>[28]</sup>. Epoksi sederhana disusun oleh dua atom karbon dan satu atom oksigen, seperti terlihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Struktur Dasar Resin Epoksi <sup>[30]</sup>

Penggunaan epoksi dalam aplikasi komposit seperti pada pembuatan pelat bipolar memiliki fungsi sebagai *binder* yang akan mengikat matriks dengan bahan pengisi sehingga dihasilkan ikatan permukaan yang baik. Ikatan permukaan yang baik tersebut akan membentuk sifat mekanis yang baik pula. Resin epoksi digunakan sebagai *binder* karena memiliki keunggulan dalam kemampuan proses, murah, ketahanan korosi yang baik, sifat termal dan mekanik yang baik, serta penyusutan yang kecil pada saat *curing* <sup>[11]</sup>.

Mengenai reaksi yang terjadi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.16, resin epoksi akan mengalami proses *curing*, dan membentuk struktur jaring bersilang (*crossed-link*) ketika dicampur dengan unsur katalis atau *hardener*.

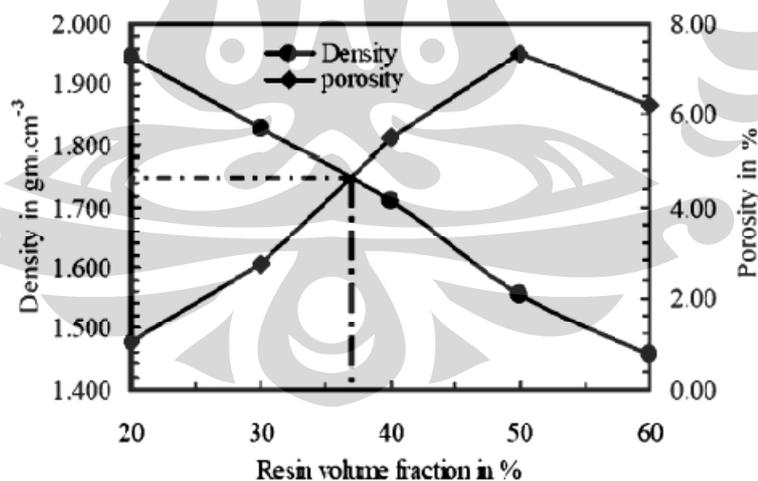


Gambar 2.16 Pembentukan Jaringan dan Ikatan dari Resin Epoksi <sup>[13]</sup>

Struktur kimia resin epoksi dari berbagai macam proses reaksi *curing* akan mempengaruhi sifat dari resin epoksi yang dihasilkan. Pada umumnya, resin epoksi memiliki sifat sebagai berikut <sup>[29]</sup>:

- a) Kekuatan adhesi yang sangat baik
- b) Ketahanan yang baik terhadap panas dan zat kimia lain
- c) *Moisture resistance* yang baik
- d) Sifat mekanis yang cukup baik (tergantung dari jenis epoksi)
- e) Sifat *electrical insulating* yang sangat baik
- f) Dapat dengan mudah diperbaiki sifatnya (misalnya konduktivitas listrik dapat ditingkatkan dengan penambahan aditif/*filler* yang mampu menghantarkan listrik dengan baik)

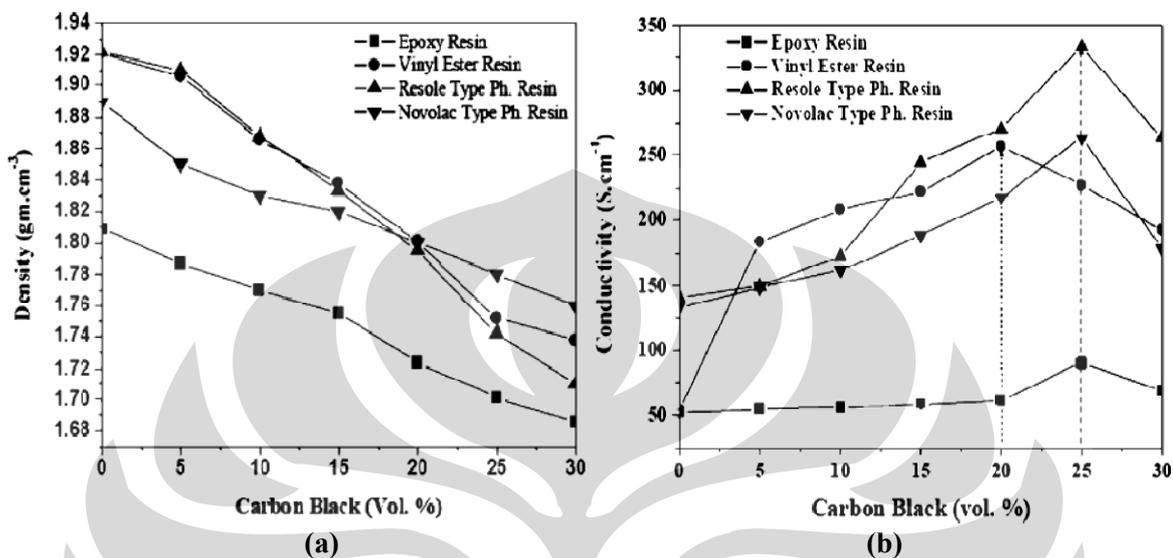
Konsentrasi resin yang digunakan dalam komposit berbasis karbon berpengaruh terhadap sifat densitas dan porositas, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.17 <sup>[13]</sup>. Dari gambar tersebut terlihat bahwa densitas dari komposit akan menurun jika fraksi volume dari resin meningkat. Sementara porositas dari komposit akan meningkat sampai fraksi volume resin 50%, lalu akan menurun setelahnya.



**Gambar 2.17** Pengaruh Fraksi Volume Resin Terhadap Densitas dan Porositas <sup>[13]</sup>

Berdasarkan literatur tentang pengaruh resin epoksi terhadap sifat karakteristik material grafit komposit sebagai pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC, dibandingkan beberapa jenis resin yang digunakan dalam sistem komposit terhadap efek sifat pelat bipolar yang dihasilkan <sup>[13]</sup>. Metode yang

digunakan dalam pembuatan pelat bipolar adalah *compression moulding* pada tekanan  $\sim 100 \text{ kg/cm}^2$ . Dari penelitian tersebut didapat bahwa pemilihan resin yang digunakan akan mempengaruhi nilai densitas dan konduktivitas yang dihasilkan. Pengaruh tersebut dapat kita lihat pada Gambar 2.18.



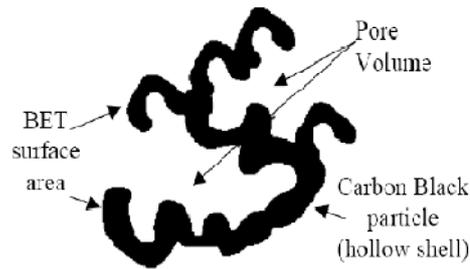
Gambar 2.18 Pengaruh Jenis Resin dan Variasi *Carbon Black* Terhadap (a) Densitas, dan (b) Konduktivitas dari Pelat Bipolar Komposit<sup>[13]</sup>

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.18, penggunaan resin epoksi pada pelat bipolar komposit menunjukkan nilai densitas yang lebih rendah dibanding resin lainnya. Nilai densitas rata-rata yang diperoleh akan semakin kecil seiring dengan penambahan kadar *carbon black*. Sementara, nilai konduktivitas dari pelat bipolar komposit yang menggunakan resin epoksi lebih rendah dibanding menggunakan resin yang lain, dengan nilai konduktivitas maksimum dicapai pada penambahan 25% *carbon black*.

#### 2.4.2.3 Carbon Black

*Carbon black* merupakan padatan karbon amorf yang dibentuk dengan proses deposisi dari partikel padat dalam fasa gas. Proses deposisi tersebut terjadi karena pembakaran tidak sempurna dari hidrokarbon cair<sup>[12,31]</sup>. Struktur karbon mirip dengan struktur grafit yang acak. Ikatan antar atom didalam strukturnya dibentuk oleh ikatan *van der Waals*. Setiap atom karbon dan radikal bebas dalam *carbon black* bereaksi membentuk suatu lapisan yang tersusun menjadi struktur

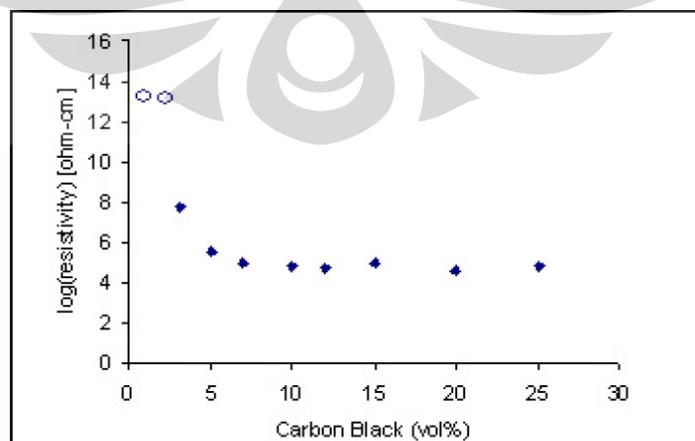
kristal heksagonal. Struktur yang terbentuk memiliki pori dengan volume tertentu, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Struktur *Carbon Black* <sup>[31]</sup>

Pada sistem komposit, dispersi *carbon black* akan membentuk jaringan antar karbon dalam polimer. Jaringan ini berfungsi sebagai sirkuit elektrik sehingga dengan mudah dapat mengalirkan arus listrik. Oleh karena itu, adanya penambahan *carbon black* pada material komposit yang akan dibuat akan meningkatkan sifat konduktivitas listrik dari pelat bipolar. Jaringan tersebut juga mampu meningkatkan kemampuprosesan komposit dan sifat mekanisnya. Namun perlu diketahui ketika komposisi *carbon black* terlalu besar pada suatu matriks maka akan terbentuk pengelompokan atau aglomerasi *carbon black* dan jaringan tidak terbentuk dengan baik <sup>[12,36]</sup>.

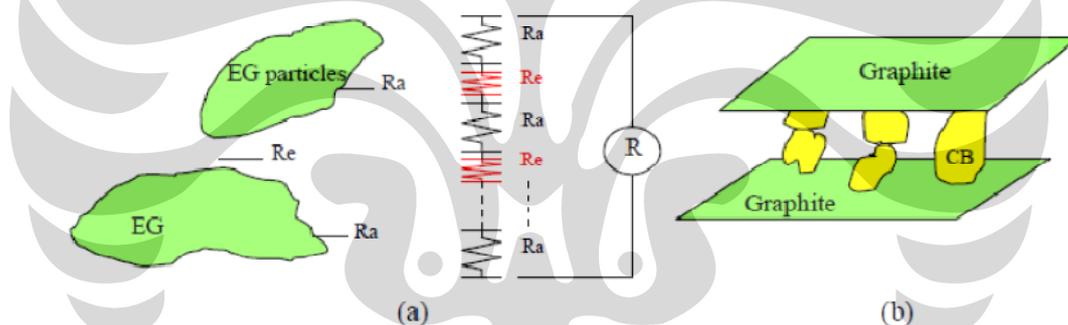
Pengaruh penambahan *carbon black* terhadap resistivitas listrik ditunjukkan pada Gambar 2.20. Gambar tersebut merupakan hasil penelitian tentang peningkatan sifat konduktivitas listrik pada pelat bipolar PEMFC <sup>[33]</sup>. Dari penelitian tersebut, didapatkan bahwa penambahan *carbon black* mempengaruhi sifat resistivitas listrik dari pelat bipolar.



Gambar 2.20 Pengaruh *Carbon Black* Pada Resin Epoksi Terhadap Resistivitas Pelat Bipolar <sup>[33]</sup>

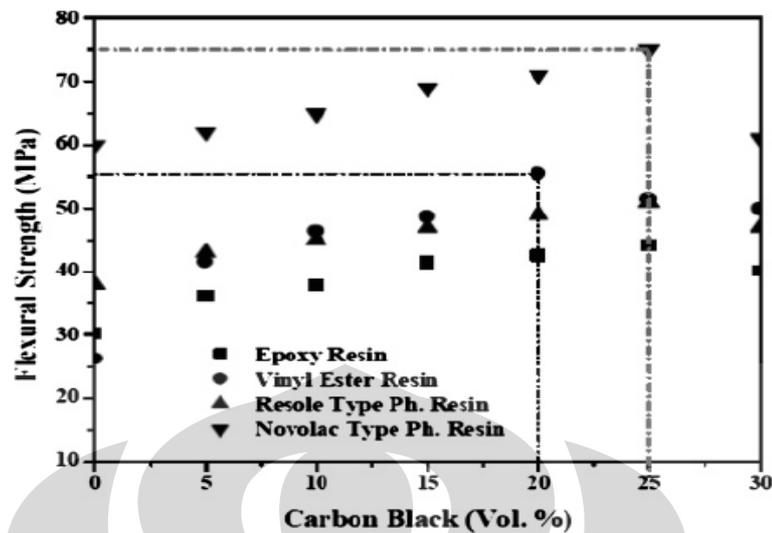
Pada Gambar 2.20 ditunjukkan bahwa penambahan komposisi *carbon black* secara umum akan menurunkan nilai resistivitas listrik dari komposit. Nilai resistivitas minimum diperoleh sekitar  $10^5 \Omega\text{-cm}$ . Resistivitas minimum tersebut ekuivalen dengan nilai konduktivitas listrik maksimum sebesar  $10^{-5} \text{ S/cm}$ , yang diperoleh pada penambahan komposisi *carbon black* sekitar diatas 8% [33].

Resistansi total dari pelat bipolar komposit berasal dari resistansi pada jarak antar agregat (*inter-aggregate space*),  $R_e$ , seperti diilustrasikan pada Gambar 2.21. Oleh karena itu, adanya partikel *carbon black* akan menjadi penghubung tambahan antar lapisan grafit, yang akan mengakibatkan nilai resistansi  $R_e$  menurun [11]. Penambahan *carbon black* dapat meningkatkan nilai konduktivitas listrik secara efisien dengan penambahan yang minimum, karena partikel tersebut memiliki struktur yang bulat berlubang (*hollow*) dan bercabang, luas permukaan yang tinggi dan ukuran partikel yang kecil [11].



**Gambar 2.21** Ilustrasi Skematik dari (a) Berbagai Hambatan Tersusun Secara Seri, (b) Partikel *Carbon Black* Ditempatkan di antara Lapisan Grafit untuk Mengurangi Nilai Hambatan  $R_e$  [11]

Penambahan *carbon black* juga berpengaruh terhadap sifat fleksural dari pelat bipolar komposit. Pada Gambar 2.22 dapat dilihat pengaruh penambahan *carbon black* terhadap sifat fleksural dengan menggunakan beberapa resin yang berbeda. Dari gambar tersebut, ditunjukkan bahwa secara umum penambahan komposisi *carbon black* akan meningkatkan kekuatan fleksural (hingga konsentrasi 25%). Penambahan di atas 25% akan mengakibatkan penurunan kekuatan fleksural dari pelat bipolar komposit, karena terjadi perubahan sifat komposit dari *ductile* (ulet) menjadi *brittle* (rapuh) [13].



Gambar 2.22 Pengaruh Komposisi *Carbon Black* Terhadap Kekuatan Fleksural <sup>[13]</sup>

#### 2.4.2.4 Metanol

Metanol yang dikenal sebagai pelarut organik polar, digunakan sebagai pelarut atau pengencer untuk resin dan *hardener* epoksi, sehingga resin epoksi dapat bercampur dengan grafit dan *carbon black*. Dengan adanya metanol, daya pembasahan resin terhadap grafit akan meningkat sehingga dapat membasahi seluruh permukaan grafit. Dengan demikian, ikatan yang terbentuk antara matriks grafit dengan *filler* akan menjadi lebih kuat. Ikatan yang terbentuk akan menentukan sifat akhir dari karbon-karbon komposit yang akan dibuat.

Struktur metanol secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.23.

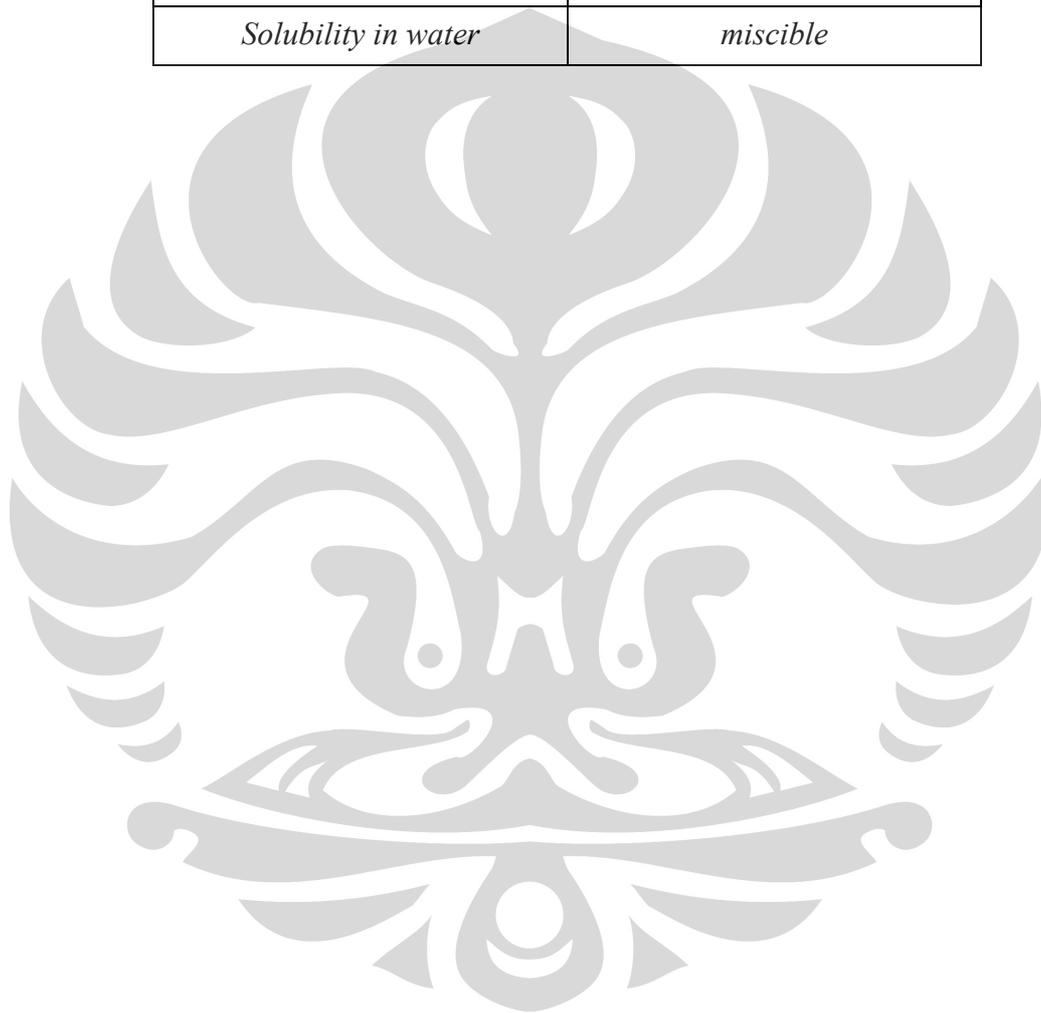


Gambar 2.23 Struktur Metanol <sup>[34]</sup>

Adapun sifat umum dari metanol dapat dilihat pada Tabel 2.7.

**Tabel 2.7** Sifat Umum Metanol <sup>[35]</sup>

<i>Molecular formula</i>	CH <sub>3</sub> OH
<i>Molar mass</i>	32.05 g/mol
<i>Appereance</i>	<i>colorless liquid</i>
<i>Density</i>	0.7918 g/cm <sup>3</sup>
<i>Melting point</i>	-97 °C, -142.9 °F (176 K)
<i>Boiling point</i>	64.7 °C, 184.4 °F (337.8 K)
<i>Solubility in water</i>	<i>miscible</i>



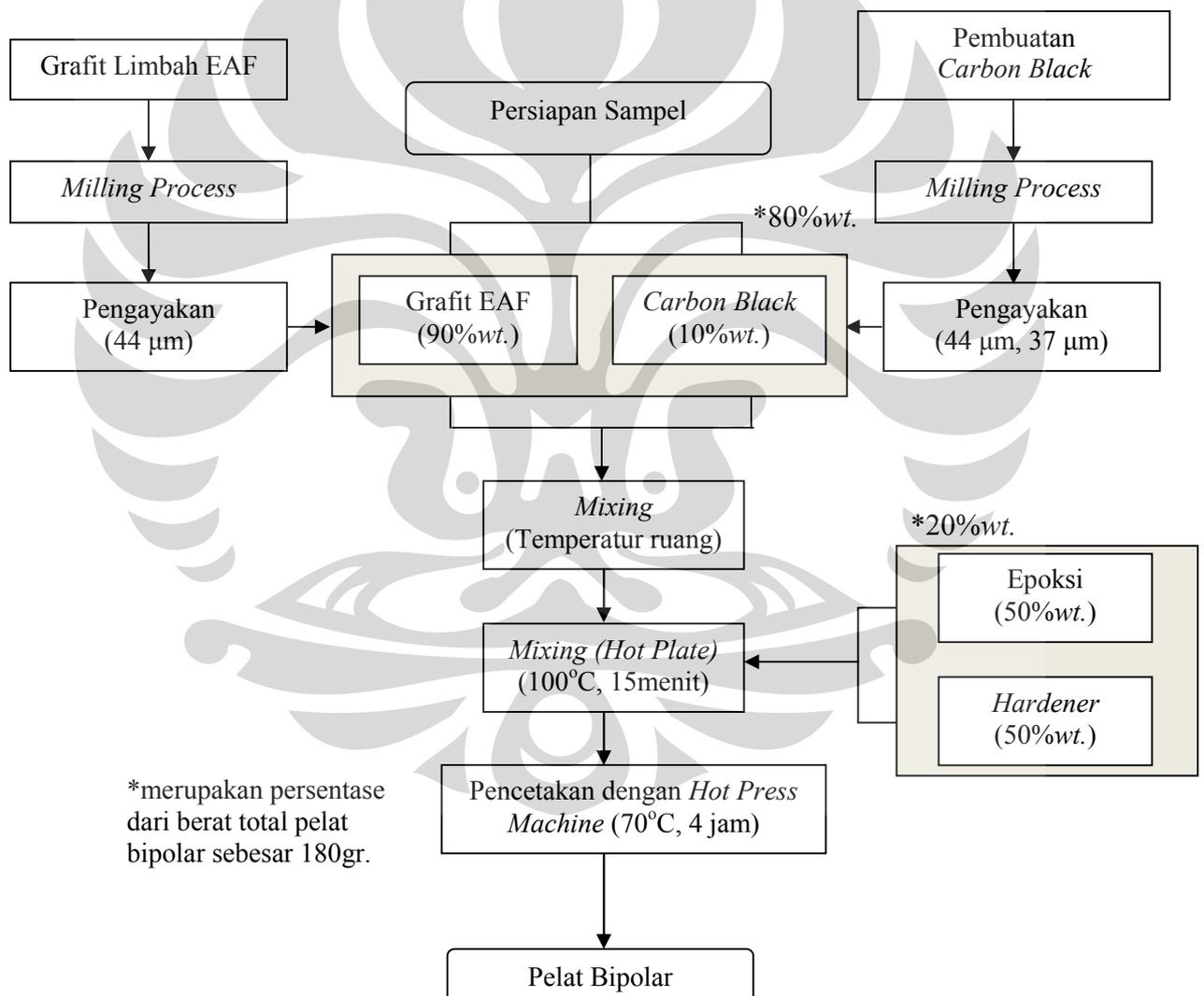
## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

##### 3.1.1 Diagram Alir Fabrikasi Sampel

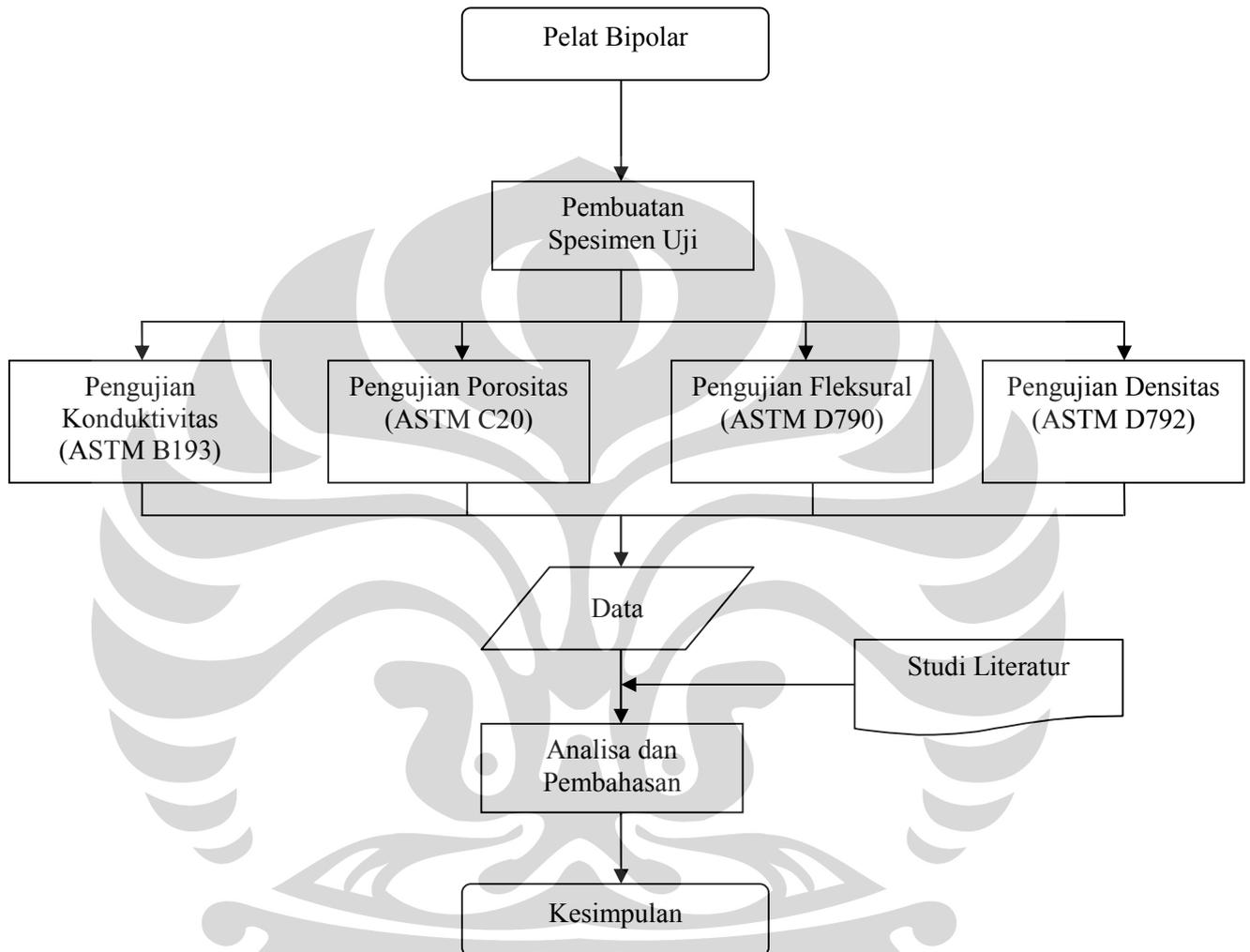
Pada Gambar 3.1 dapat dilihat diagram alir yang menggambarkan secara umum kegiatan dari penelitian mengenai pembuatan pelat bipolar karbon-karbon komposit untuk aplikasi PEMFC.



Gambar 3.1 Diagram Alir Fabrikasi Sampel

### 3.1.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel

Pada Gambar 3.2 berikut ini ditunjukkan diagram alir penelitian dari pengujian yang dilakukan pada sampel pelat bipolar karbon-karbon komposit.



Gambar 3.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel

### 3.2 Komposisi Pelat Bipolar dan Variabel Penelitian

Pada penelitian ini dibuat pelat bipolar dengan berat total bahan-bahan yang digunakan adalah 180 gram pada masing-masing pelat. Pada Tabel 3.1 dijabarkan komposisi bahan dari sampel serta variasi ukuran partikel *carbon black* yang ditandai dengan kode sampel yang berbeda.

Tabel 3.1 Komposisi dan Pengkodean Formulasi Sampel

Kode Sampel	PELAT BIPOLAR KOMPOSIT (100%wt. = 180 gr)				Tekanan [kg/cm <sup>2</sup> ]	
	Material Karbon 80%wt. = 144 gr		Resin Epoksi 20%wt. = 36 gr			
	Grafit EAF (90%wt.) [gr]	Carbon Black (10%wt.)		Epoksi (50%wt.) [gr]		Hardener (50%wt.) [gr]
	44 $\mu\text{m}$	37 $\mu\text{m}$				
A	129,6	100% (14,4 gr)	0% (0 gr)	18	18	450
B		90% (12,96 gr)	10% (1,44 gr)			
C		80% (11,52 gr)	20% (2,88 gr)			
D		70% (10,08 gr)	30% (4,32 gr)			

### 3.3 Alat dan Bahan

#### 3.3.1 Peralatan

Peralatan yang digunakan untuk pembuatan dan karakterisasi pelat bipolar adalah:

1. *Planetary ball mill* dan *disc mill*
2. Timbangan digital
3. *Beaker glass* 1 liter
4. *Mixer*
5. *Thermometer*
6. Mesin *hot plate*
7. Cetakan *Stainless Steel* 15 x 15 cm
8. Mesin *hot press*
9. Gergaji besi
10. Kertas Amplas #500 dan #1200
11. *Oven*
12. Alat Uji Konduktivitas (*four point probe test*)
13. Alat Uji Densitas (berdasarkan ASTM D792)
14. Alat Uji Porositas (berdasarkan ASTM C20)
15. Alat Uji Fleksural (*three point bending* – berdasarkan ASTM D 790)

### 3.3.2 Bahan

#### 3.3.2.1 Grafit EAF

Pada penelitian ini digunakan grafit elektroda EAF (*Electric Arc Furnace*) sisa peleburan baja PT. Krakatau Steel. Ukuran partikel dari grafit EAF yang digunakan adalah 44  $\mu\text{m}$ . Ukuran tersebut diperoleh setelah bongkahan grafit elektroda EAF ditumbuk dan digerus menggunakan alat *disc mill* dan *planetary ball mill* untuk kemudian diayak dengan mesin pengguncang hingga mendapatkan ukuran yang diinginkan.

#### 3.3.2.2 Epoksi

Polimer epoksi yang digunakan dalam penelitian ini berupa resin epoksi bermerek dagang Eposchon (Bhispenol A-epichlorohydrin). *Curing agent* berupa epoksi *hardener* bermerek dagang Eposchon (Polyaminoamide) digunakan sebagai stimulan polimerisasi pada temperatur ruang. Gabungan keduanya berfungsi sebagai *binder* untuk mengikat grafit dan *carbon black*.

#### 3.3.2.3 Carbon black

*Carbon black* yang digunakan merupakan hasil proses pirolisis serat alami berupa sabut kelapa. Proses tersebut dilakukan dalam oven pada temperatur ruang 600°C selama 10 jam. Oven dalam kondisi inert setelah pada awal pemanasan dialirkan gas nitrogen ke dalamnya. Hasil dari proses ini kemudian melalui tahapan penumbukan dan penggerusan dengan alat mortar penumbuk. Selanjutnya diayak hingga memiliki ukuran partikel 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$ .

#### 3.3.2.4 Metanol

Metanol berfungsi sebagai pelarut bagi resin epoksi dan *hardener*. Pelarutan membantu homogenisasi pembasahan matriks terhadap bahan penguat. Jumlah metanol yang digunakan sebanyak 35 ml untuk masing-masing pada resin epoksi dan *hardener* di tiap pembuatan bakalan pelat bipolar.

### 3.4 Proses Pembuatan Pelat Bipolar

#### 3.4.1 Penghalusan Grafit

Penghalusan dilakukan terhadap bongkahan grafit elektroda EAF menggunakan mesin *disc mill* dan *planetary ball mill*. Penghalusan pada masing masing alat berlangsung selama 50 jam dalam kondisi grafit yang kering. Pada *disc mill* digunakan bola penghancur berbahan dasar alumina. Perbandingan antara jumlah berat grafit dengan berat bola alumina adalah 1:10. Sedangkan pada *planetary ball mill* terdapat beberapa perbedaan, yaitu bola penghancur berbahan dasar bola baja yang dikeraskan. Perbandingan antara jumlah berat grafit dengan berat bola baja yang dikeraskan adalah 1:10. Pada *planetary ball mill* kecepatan diatur pada kondisi 180,95 rpm dengan nilai frekuensi 20 Hz.

#### 3.4.2 Pembuatan *Carbon Black*

*Carbon black* yang digunakan pada penelitian ini didapat dari hasil proses pirolisis serabut kelapa yang dilakukan di LIPI. Proses tersebut dilakukan di dalam sebuah oven dimana terdapat wadah berukuran 20 x 20 cm. Serabut kelapa disiapkan dalam keadaan kering untuk selanjutnya dipadatkan ke dalam wadah sebelum ditempatkan pada oven. Temperatur oven diatur pada kondisi 600°C, proses ini disebut *preheating* yang berlangsung selama 1 jam. Secara bersamaan dialirkan gas hidrogen sehingga lingkungan di dalam oven menjadi inert. Proses tersebut dilakukan pada temperatur yang stabil (600°C) dan berlangsung selama 9 jam. Hasilnya kemudian dihaluskan menggunakan alat mortar penumbuk untuk selanjutnya diayak untuk mendapatkan ukuran partikel yang diinginkan.



(a)

(b)

**Gambar 3.3** (a) Bahan Baku Serabut Kelapa;  
(b) Perangkat Oven untuk Pembuatan *Carbon Black*

### 3.4.3 Penimbangan

Bahan-bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini ditimbang menggunakan timbangan digital untuk mendapatkan komposisi sesuai formulasi pada Tabel 3.1. Hasil penimbangan tersebut kemudian dimasukkan ke dalam *beaker glass* untuk proses selanjutnya.

### 3.4.4 Pencampuran

Proses pencampuran dilakukan sesuai dengan tahapan sebagai berikut :

1. Grafit EAF dan *carbon black* dicampur dalam *beaker glass* 1 L, kemudian diaduk dengan sendok sampai rata.
2. Resin epoksi diencerkan dengan metanol sebanyak 35 mL.
3. Resin epoksi yang telah tercampur rata dengan metanol dimasukkan ke dalam *beaker glass* 1 L yang telah berisi grafit EAF dan *carbon black*, kemudian dilakukan *mixing* selama  $\pm 5$  menit.
4. Pengenceran *hardener* dengan metanol 35 mL.
5. *Hardener* yang sudah diencerkan dimasukkan ke dalam bakalan, kemudian dilakukan *mixing* selama  $\pm 5$  menit.
6. *Mixing* di atas *hot plate* ( $T=100^{\circ}\text{C}$ ) selama  $\pm 10$  menit.



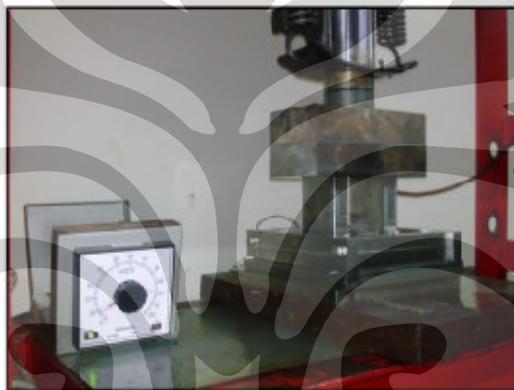
**Gambar 3.4** Hasil Pencampuran Bahan-bahan Penyusun Pelat Bipolar

### 3.4.5 Pencetakan pelat

Adonan yang diperoleh dari pencampuran bahan selanjutnya dicetak pada sebuah cetakan berbahan Duplex SS yang berukuran 15 x 15 x 0.42 cm. Proses pencetakan dilakukan dengan mesin *hot press* selama 4 jam. Kondisi operasi pada

mesin *hot press* menggunakan tekanan  $450 \text{ kg/cm}^2$  dengan temperatur  $70^\circ\text{C}$ .  
Prosedur pencetakan adalah sebagai berikut:

1. Bersihkan cetakan dari kotoran (debu dan karat) yang menempel dan lumuri dengan oli bersih secara merata pada bagian dalam cetakan.
2. Masukkan adonan hasil pencampuran ke dalam cetakan hingga merata.
3. Tutup cetakan dan masukkan ke dalam mesin tekan.
4. Atur tekanan mesin pada kondisi  $300 \text{ kg/cm}^2$  dan temperatur senilai  $70^\circ\text{C}$ .
5. Operasikan mesin selama 4 jam.
6. Matikan indikator panas dan diamkan sampel di dalam cetakan pada temperatur kamar selama 12 jam dengan tekanan tetap.
7. *Release* tekanan yang diberikan dan keluarkan pelat hasil pencetakan.



Gambar 3.5 Proses Pencetakan pada Mesin *Hot Press*

### 3.5 Pembuatan Sampel Uji

Pembuatan sampel uji dilakukan untuk pengujian fleksural, konduktivitas listrik, densitas, dan porositas. Pelat bipolar hasil pencetakan dibentuk ke dalam dimensi tertentu sesuai standar pengujian. Pada pengujian konduktivitas listrik, densitas, dan porositas digunakan sampel berukuran  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ . Sedangkan untuk pengujian fleksural digunakan sampel berukuran  $12 \text{ cm} \times 1,3 \text{ cm} \times 0,3 \text{ cm}$ .



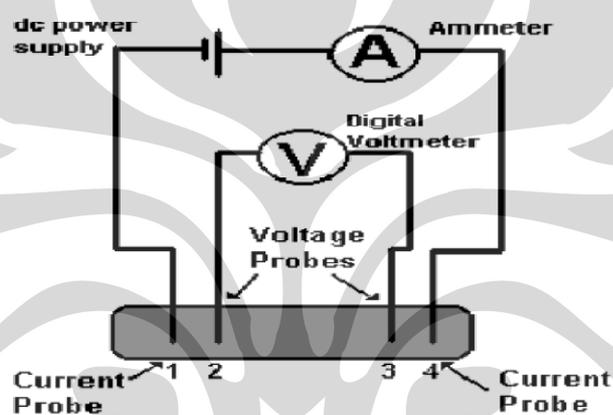
Gambar 3.6 Spesimen Uji untuk Karakterisasi Pelat Bipolar

### 3.6 Karakterisasi Pelat Bipolar

Tahap yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari pelat bipolar yang telah dibuat, antara lain:

#### 3.6.1 Pengujian Konduktivitas

Pengujian dilakukan di Pusat Penelitian Fisika LIPI, Puspiptek, Serpong dengan menggunakan alat *digital Veeco FPP 5000-four point probe test..* Prinsip kerja alat ini menggunakan 4 titik yang terdiri dari titik 1 dan 4 sebagai titik pengukur arus yang dibaca di amperemeter, sedangkan titik 2 dan 3 sebagai pengukur tegangan yang akan dibaca di voltmeter. Skema pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.7** Skema Uji Konduktivitas

Pada pengujian konduktivitas listrik digunakan cakram untuk menahan posisi sampel uji serta memfokuskan arus yang ditembakkan pada titik tertentu. Cakram terbuat dari polimer berwarna hitam yang berbentuk lingkaran dengan diameter dan ketebalan tertentu, seperti terlihat pada Gambar 3.8 di bawah ini.



**Gambar 3.8** Mesin Veeco FPP 5000 - *Four Point Probe Test*

Prosedur pengujian konduktivitas listrik adalah sebagai berikut :

1. Nyalakan voltmeter dan ubah tipe mesin menjadi DC.
2. Letakkan sampel tepat berada ditengah dimana 4 buah *probe* berada.
3. Letakkan cakram di atas permukaan sampel uji.
4. Pilih mode *slice* sesuai dengan bentuk sampel yang akan diuji.
5. Masukkan nilai ketebalan dari sampel uji.
6. Nilai resistivitas akan terlihat pada indikator alat.

Dari pengujian ini akan didapatkan nilai resistivitas sampel ( $\rho$ ) dalam satuan  $\Omega$ -cm, lalu nilai konduktivitas ( $\sigma$ ) dari spesimen akan dihitung sesuai Persamaan 3.1:

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

Keterangan:  $\sigma$  = nilai konduktivitas [S/cm]

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

### 3.6.2 Pengujian Densitas

Pengujian dilakukan berdasarkan hukum Archimedes, dimana massa di udara akan berbeda dengan massa di dalam air. Prosedur pengujian ini dilakukan sesuai standar ASTM D792. Prosedur pengujian densitas adalah sebagai berikut:

1. Timbang sampel pada temperatur ruang, catat sebagai berat sampel di udara (A)
2. Timbang sampel dalam kondisi terendam air dan melayang dalam *beaker glass* sesuai Gambar 3.8, catat sebagai berat sampel dalam air (B).
3. Berat sampel yang diperoleh disubstitusi ke dalam persamaan 3.2. Densitas (kerapatan massa) adalah ukuran massa suatu benda per unit volume, densitas dinyatakan dalam satuan  $\text{kg/m}^3$  dilambangkan dengan  $\rho$ .

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

Keterangan:  $\rho$  = *bulk density* ( $\text{gr/cm}^3$ )

A = massa sampel kering (gr)

B = massa sampel tergantung dalam air (gr)

$\rho$  air = densitas air ( $\text{gr/cm}^3$ )

### 3.6.3 Pengujian Porositas

Porositas merupakan pori yang terbentuk akibat udara yang terperangkap. Pori yang terbentuk dapat mempengaruhi performa pelat bipolar. Persentase porositas yang terbentuk dapat diketahui dengan melakukan pengujian sesuai standar ASTM C20. Prinsip dari pengujian adalah melihat perbedaan berat dari sampel kering (setelah dipanaskan) dan sampel jenuh (setelah direndam). Prosedur pengujian porositas adalah sebagai berikut:

1. Sampel dikeringkan melalui pemanasan dalam oven pada temperatur 100°C selama 1 jam.
2. Sampel yang telah dikeringkan kemudian ditimbang pada temperatur ruang. Catat berat sampel sebagai *dry weight* (D).
3. Sampel kemudian direndam dengan kondisi melayang dalam *beaker glass* berisi air yang dipanaskan pada suhu 100°C di atas *hot plate* selama 2 jam, seperti terlihat pada Gambar 3.9.
4. Sampel dimasukkan ke dalam air dingin selama 12 jam.
5. Sampel ditimbang dalam air dengan posisi sampel melayang dalam *beaker glass*. Catat berat sampel sebagai *suspended weight* (S).
6. Hilangkan air pada permukaan sampel dengan menggunakan kain katun. Lakukan penimbangan pada temperatur ruang dan catat hasilnya sebagai *saturated weight* (Sw).
7. Densitas sampel yang diperoleh dihitung menggunakan Persamaan 3.3.



**Gambar 3.9** Sampel Dipanaskan di dalam Air Pada Temperatur 100°C

Perhitungan nilai porositas dapat dihitung dengan Persamaan 3.3:

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

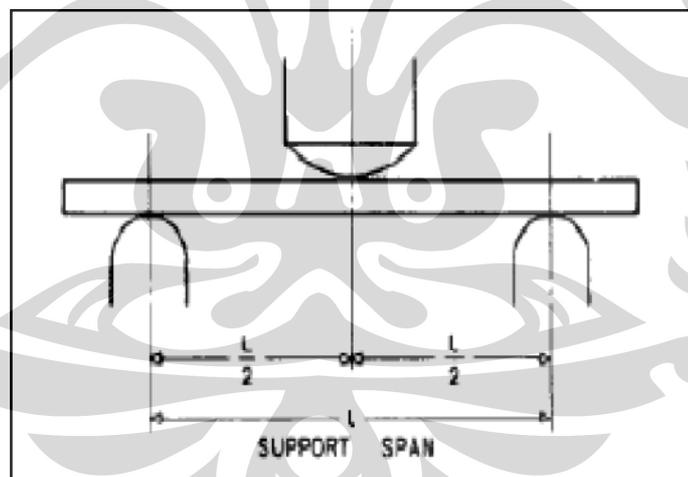
Keterangan:  $S_w$  = *Saturated Weight* (gr)

$D$  = *Dry weight* (gr)

$S$  = *Suspended Weight* (gr)

### 3.6.4 Pengujian Fleksural

Pengujian fleksural bertujuan untuk mengetahui ketahanan dari pelat bipolar terhadap beban tekan. Pengujian ini disesuaikan dengan kondisi aplikasi pelat bipolar yang umumnya dibentuk dalam satu *stack* (susunan pelat saling berhimpitan) serta mendapatkan tekanan dari gas dari segala arah. Pengujian fleksural mengacu pada standar ASTM D790. Metode pengujian berupa metode *three point bending*, pembebanan diberikan pada bagian tengah sampel uji seperti terlihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Gambar Skematis Pengujian Fleksural

Prinsip pengujian berupa pemberian beban tekan pada tengah sampel yang diletakkan diantara dua penahan hingga terjadi perpatahan. Pengujian menggunakan Universal Testing Machine T22K, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.11, dengan panjang penahan 64 mm, diameter *punch* 3,2 mm, dan kecepatan pembebanan 2 mm/menit.



**Gambar 3.11** Pengujian Fleksural

Dari pengujian akan diperoleh beban maksimal ( $P$ ) yang mengindikasikan kemampuan maksimal sampel untuk dapat menahan beban hingga sampel patah. Untuk mendapatkan nilai kekuatan fleksural dari sampel, maka digunakan persamaan 3.4 berikut:

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

Keterangan:  $\sigma_f$  = tegangan / kekuatan lentur (MPa)

$P$  = beban maksimal (N)

$L$  = panjang span (mm)

$b$  = lebar spesimen (mm)

$d$  = tebal spesimen (mm)

Pengujian fleksural lebih tepat digunakan untuk menentukan kekuatan pelat bipolar daripada uji tarik, karena dalam aplikasi dalam sel tunam, pelat bipolar lebih banyak menerima beban tekan dari gas ke arah luar daripada menerima beban regang.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Preparasi Sampel

Sebelum dilakukan pengujian untuk karakterisasi pelat bipolar, terdapat beberapa proses awal yang dilakukan dalam penelitian ini. Proses tersebut terdiri dari preparasi grafit, preparasi *carbon black*, pencampuran bahan (*mixing*), pencetakan, dan pembuatan sampel uji. Hasil dari berbagai proses tersebut akan berpengaruh terhadap sifat akhir yang dihasilkan.

##### 4.1.1 Hasil Preparasi Grafit

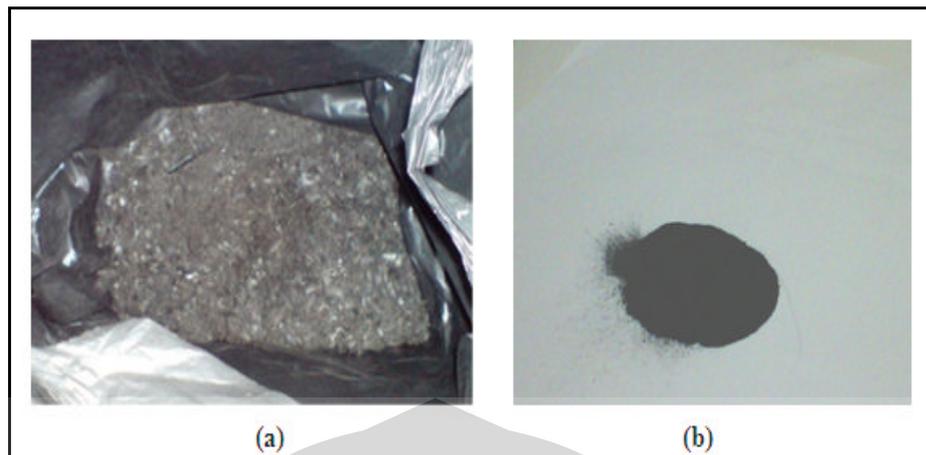
Pada penelitian ini digunakan grafit yang berasal dari elektroda limbah industri peleburan baja. Preparasi grafit dilakukan dengan proses *crushing* dan *milling*. Setelah itu dilakukan *screening* (pengayakan) untuk memperoleh ukuran partikel 44  $\mu\text{m}$ . Pada Gambar 4.1 dapat dilihat grafit EAF sebelum dan sesudah dilakukan preparasi.



**Gambar 4.1** Grafit EAF (a) Bongkahan Grafit Sebelum Preparasi;  
(b) Serbuk Grafit Hasil Preparasi

##### 4.1.2 Hasil Preparasi *Carbon Black*

Preparasi awal *carbon black* dilakukan dengan proses pirolisis. Hasil proses tersebut kemudian direduksi hingga berukuran 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  dengan proses *crushing* dan *milling*.

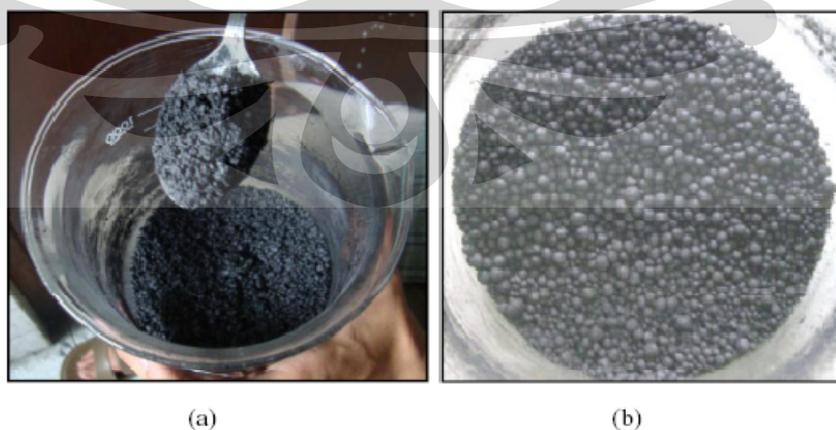


**Gambar 4.2** Carbon Black (a) Hasil Pirolisis ; (b) Hasil Pengayakan

Pada Gambar 4.2a terlihat *carbon black* hasil pirolisis berwarna hitam kecoklatan dengan tekstur serabut. Setelah ditumbuk dan diayak, diperoleh bentuk *carbon black* partikulat berwarna hitam, seperti terlihat pada Gambar 4.2b.

#### 4.1.3 Hasil Pencampuran Bahan (*Mixing*)

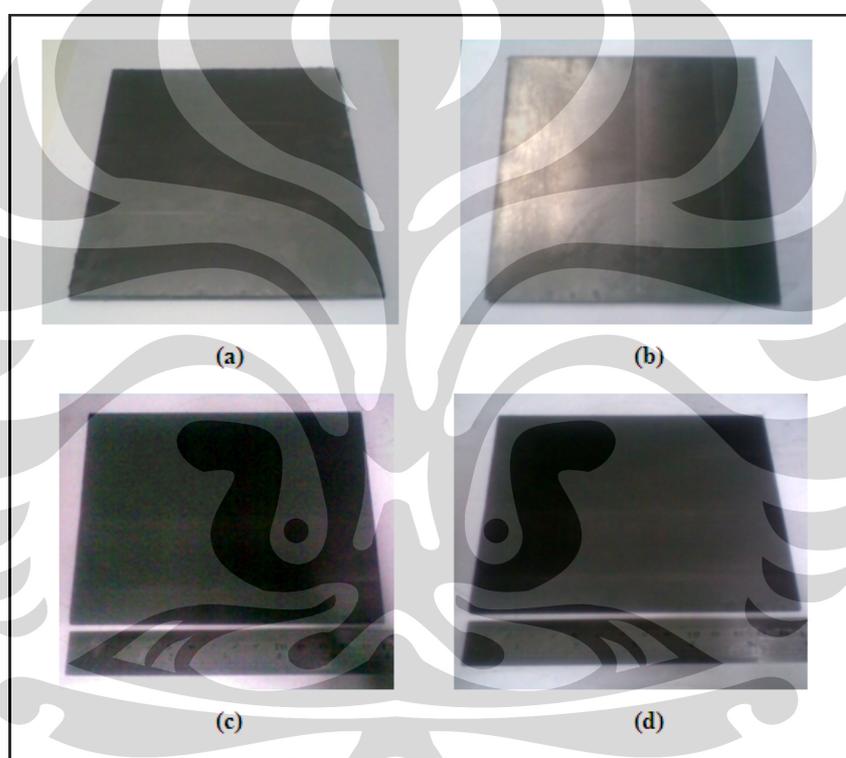
Hasil preparasi bahan (grafit EAF dan *carbon black*) berupa partikel halus selanjutnya dilakukan proses pencampuran (*mixing*) dengan resin epoksi dan *hardener*. Pencampuran dilakukan dengan dan tanpa pengaplikasian panas. Pencampuran dengan pengaplikasian panas dilakukan di atas *hot plate* pada temperatur 100°C. Pada Gambar 4.3 berikut ini terlihat hasil pencampuran awal dan hasil pencampuran akhir dari bahan.



**Gambar 4.3** Hasil Pencampuran (a) Sebelum *Mixing* pada *Hot Plate*; (b) Hasil Akhir *Hot Mixing*

## 4.2 Hasil Pencetakan Pelat Bipolar

Pada penelitian ini, dibuat pelat bipolar dengan menggunakan 90%wt. grafit EAF dan 10%wt. *carbon black*. Masing-masing pelat bipolar dibuat dengan variasi partikel *carbon black* ukuran 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  dengan perbandingan 100:0, 90:10, 80:20, dan 70:30. Proses pencetakan dilakukan dengan variabel tekanan 450  $\text{kg}/\text{cm}^2$  pada kondisi temperatur 70°C selama 4 jam di dalam mesin *hot press*. Masing-masing pelat bipolar yang dihasilkan berukuran 15 x 15 cm, dengan ketebalan pelat yang hampir sama dalam kisaran 0,3–0,4 cm. Hasil pencetakan pelat bipolar ditunjukkan pada Gambar 4.4.



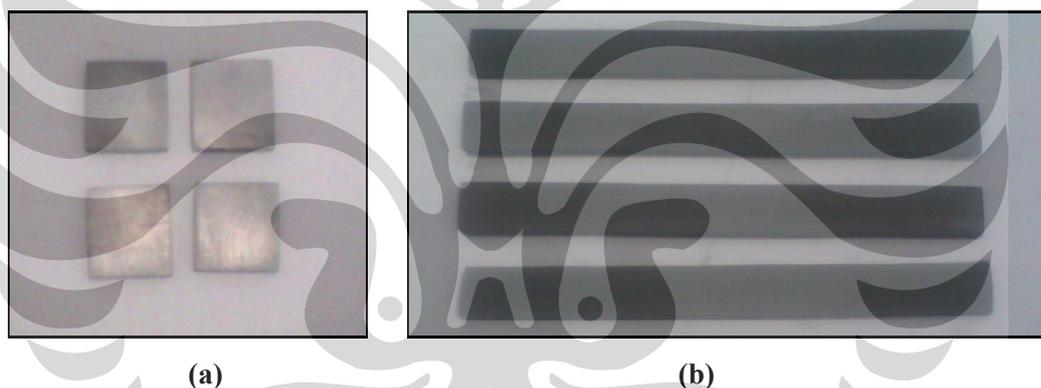
**Gambar 4.4** Hasil Pencetakan Pelat Bipolar dengan Variasi Ukuran Partikel *Carbon Black* 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  dengan perbandingan: (a)100:0 (b) 90:10 (c) 80:20 (d) 70:30

Hasil pengamatan visual menunjukkan bahwa seluruh pelat bipolar pada penelitian ini memiliki permukaan yang rata dan cukup halus, dan tanpa adanya cacat seperti retak. Jika diamati pada permukaannya, pori yang terdapat pada keempat pelat tersebut hanya sedikit. Pori yang terbentuk kemungkinan disebabkan oleh adanya penguapan metanol yang merupakan pelarut resin epoksi pada saat pencetakan. Warna hitam pada permukaan pelat menunjukkan bahwa

material karbon mendominasi komposisi dari pelat bipolar karbon-karbon komposit. Pada permukaan pelat tampak terdapat relief yang merupakan jejak dari cetakan *stainless steel*. Jejak ini selanjutnya dihilangkan dengan cara diampelas untuk preparasi sebagai sampel uji.

### 4.3 Hasil Pembuatan Sampel uji

Pembuatan sampel uji dilakukan sebelum dilakukan pengujian untuk karakterisasi pelat bipolar. Sampel uji dibuat dengan ukuran yang sesuai standar pengujian, seperti terlihat pada Gambar 4.5. Sampel untuk pengujian konduktivitas, densitas, dan porositas dibuat dengan ukuran 2 x 2 cm, dengan ketebalan 0,3 cm, seperti terlihat pada Gambar 4.5a. Sedangkan untuk sampel pengujian fleksural sampel dibuat dengan ukuran 12 x 1,3 cm, dengan ketebalan 0,3 sampai 0,4 cm, seperti terlihat pada Gambar 4.5b.



**Gambar 4.5** Sampel Uji (a) Konduktivitas, Densitas, dan Porositas (b) Fleksural

Permukaan dari sampel uji kemudian diampelas untuk mendapatkan permukaan sampel yang halus dan rata, dan juga untuk menghilangkan adanya retak mikro ataupun sumber konsentrasi tegangan (seperti bekas pemotongan) yang dapat menyebabkan inisiasi retak, sehingga akan didapatkan data hasil pengujian yang lebih akurat. Secara umum sampel uji telah sesuai dengan standar ukuran untuk pengujian dan memiliki permukaan yang halus. Namun tetap didapati sedikit perbedaan dimensi dari sampel uji akibat dari proses pemotongan dan pengamplasan yang kurang presisi. Namun, perbedaan dimensi yang minimal tersebut dianggap tidak mempengaruhi hasil pengujian secara signifikan.

#### 4.4 Hasil Karakterisasi Sampel Uji

Karakterisasi sampel yang dilakukan dalam pengujian ini bertujuan untuk melihat pengaruh variasi ukuran partikel CB (*carbon black*) 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  terhadap sifat pelat bipolar yang dihasilkan. Komposisi ukuran partikel CB tersebut divariasikan pada masing-masing sampel dengan perbandingan 100:0; 90:10; 80:20; 70:30. Melalui karakterisasi sampel uji, akan diketahui variasi yang paling optimum dari keempat pelat bipolar terhadap sifat yang dihasilkan, seperti densitas, porositas, fleksural dan konduktivitas.

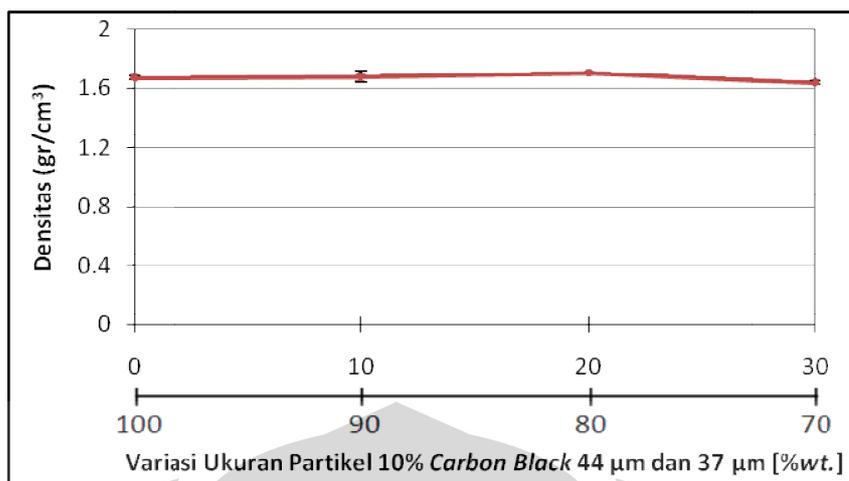
##### 4.4.1 Hasil Pengujian Densitas

Pengujian densitas bertujuan untuk mengetahui massa jenis dari pelat bipolar. Seperti kita ketahui bahwa densitas akan mempengaruhi massa dari suatu benda. Semakin rendah nilai densitas suatu benda, maka massa benda tersebut akan semakin ringan. Untuk komponen pelat bipolar, sifat yang diinginkan adalah massa yang rendah. Misalnya pelat bipolar untuk aplikasi FCV diharapkan massa yang rendah, sehingga akan meningkatkan efisiensi dari kendaraan.

Hasil dari pembuatan pelat bipolar dalam penelitian ini diharapkan memiliki densitas yang rendah, yaitu kurang dari 5  $\text{gr}/\text{cm}^3$ , agar dapat mengurangi biaya produksi dari PEMFC secara keseluruhan. Pada Tabel 4.1 ditunjukkan hasil pengujian densitas dari keempat sampel uji.

**Tabel 4.1** Data Hasil Pengujian Densitas

Variasi komposisi <i>Carbon Black</i> 10 % ukuran 44 $\mu\text{m}$ (% wt.)	Variasi komposisi <i>Carbon Black</i> 10 % ukuran 37 $\mu\text{m}$ (% wt.)	Densitas ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
100	0	1,67
90	10	1,68
80	20	1,70
70	30	1,64



**Gambar 4.6** Pengaruh Variasi Ukuran Partikel *Carbon Black* Terhadap Densitas

Berdasarkan Gambar 4.6 terlihat bahwa tidak didapati adanya perbedaan nilai densitas yang signifikan akibat variasi ukuran partikel *carbon black*. Nilai densitas yang diperoleh dari keempat sampel memiliki kisaran nilai yang sangat berdekatan yaitu antara 1,64-1,70 gr/cm<sup>3</sup>. Namun terlihat adanya kecenderungan peningkatan nilai densitas hingga pada sampel ketiga akibat pengaruh variasi ukuran partikel *carbon black*. Dapat dikatakan bahwa penambahan *carbon black* dengan ukuran 37 μm memiliki densitas yang lebih tinggi dibanding sampel dengan tanpa penambahan *carbon black* 37 μm. Peningkatan ini kemungkinan disebabkan oleh pengaruh partikel *carbon black* dengan ukuran 37 μm telah mengisi kekosongan atau *void* yang terdapat pada pelat. Ukuran partikel *carbon black* yang lebih kecil akan mampu mengisi *void* dari partikel yang ukurannya lebih besar. Hal tersebut menjadi kemungkinan penyebab meningkatnya densitas atau kepadatan dari sampel yang diuji.

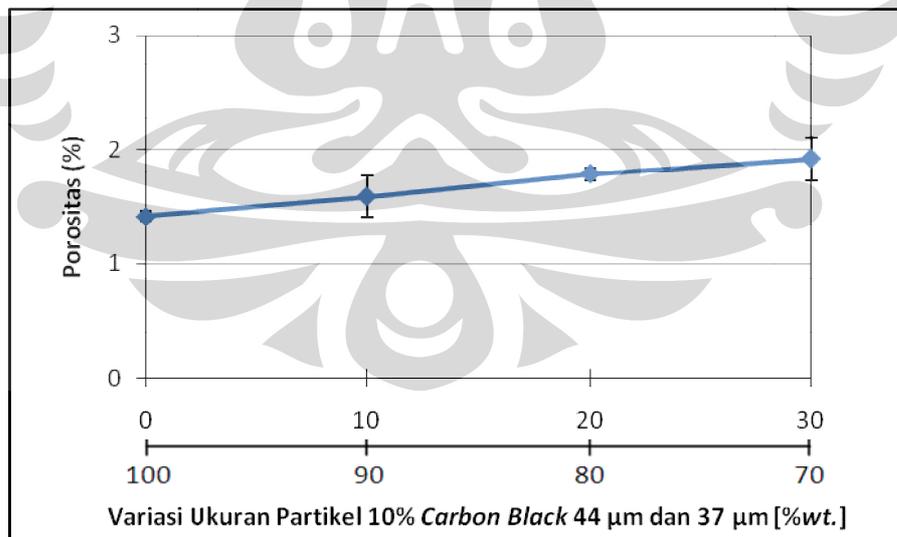
Dari hasil pengujian densitas yang dilakukan pada masing-masing pelat, maka nilai densitas tertinggi dimiliki oleh sampel yang dihasilkan dengan menggunakan variasi ukuran *carbon black* 44 μm dan 37 μm dengan perbandingan 80:20, dan densitas terendah dimiliki oleh sampel yang dibuat dengan perbandingan 70:30. Nilai densitas yang dimiliki oleh masing-masing pelat yang dihasilkan telah memenuhi standar untuk pelat bipolar, yaitu kurang dari 5 gr/cm<sup>3</sup>.

#### 4.4.2 Hasil Pengujian Porositas

Salah satu sifat yang harus dimiliki pelat bipolar adalah memiliki porositas yang sangat kecil. Porositas merupakan rongga yang terbentuk dalam suatu material akibat pengaruh senyawa gas yang umumnya berasal dari luar sistem (uap air dan gas) maupun dari dalam sistem (bagian komposisi bahan yang dapat menguap) yang terbentuk selama proses pembentukan material. Persentase porositas pelat bipolar harus dibuat seminimal mungkin dengan tujuan agar tidak adanya gas lain yang masuk ke dalam sistem sel tunam karena dapat mengganggu performa dan kinerja dari sel tunam. Persentase porositas yang diharapkan pada pelat bipolar adalah kurang dari 1%. Pada Tabel 4.2 dapat dilihat hasil pengujian porositas dari keempat sampel uji.

Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Porositas

Variasi komposisi <i>Carbon Black</i> 10 % ukuran 44 $\mu\text{m}$ (% wt.)	Variasi komposisi <i>Carbon Black</i> 10 % ukuran 37 $\mu\text{m}$ (% wt.)	Porositas (%)
100	0	1,41
90	10	1,59
80	20	1,78
70	30	1,92



Gambar 4.7 Pengaruh Variasi Ukuran Partikel *Carbon Black* Terhadap Porositas

Dari Gambar 4.7 terlihat adanya kecenderungan peningkatan porositas dengan penambahan komposisi partikel *carbon black* 37  $\mu\text{m}$ . Pada sampel

pertama dengan tanpa penambahan *carbon black* 37  $\mu\text{m}$ , nilai porositas yang diperoleh sebesar 1,41%. Namun, pada sampel kedua, ketiga, dan keempat, terlihat adanya kecenderungan peningkatan porositas. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh struktur poros dari partikel *carbon black* tersebut. Ukuran partikel *carbon black* yang semakin kecil membuatnya sulit terdistribusi merata dan cenderung membentuk pengelompokan atau agglomerasi [12,14]. Penambahan komposisi partikel *carbon black* yang semakin tinggi membuatnya menjadi tidak optimum, karena apabila *carbon black* dikomposisikan berlebih maka porositas meningkat akibat distribusi partikel yang tidak merata.

Dapat disimpulkan dari hasil pengujian yang dilakukan, maka tingkat porositas terendah terdapat pada sampel pertama (tanpa penambahan *carbon black* 37  $\mu\text{m}$ ) dengan tingkat porositas 1,41%, sedangkan porositas tertinggi dimiliki oleh sampel ketiga (penambahan 20% *carbon black* 37  $\mu\text{m}$ ) dengan persen porositas 1,92%. Hal tersebut disebabkan oleh peningkatan komposisi partikel dengan ukuran yang semakin kecil akan menyebabkan terjadinya peningkatan kekosongan (*void*) pada komposit, sehingga tingkat porositas dari komposit pun akan meningkat. Nilai persentase porositas dari pengujian berada pada kisaran nilai 1,41%-1,92%. Nilai tersebut masih belum memenuhi standar nilai porositas untuk pelat bipolar.

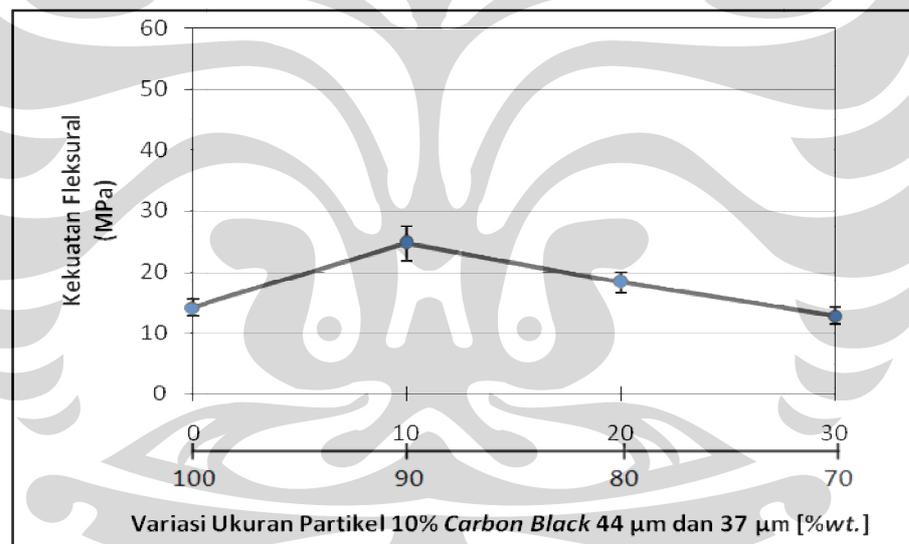
#### 4.4.3 Hasil Pengujian Fleksural

Pengujian fleksural dilakukan untuk mengetahui nilai ketahanan pelat bipolar terhadap suatu beban tekan. Kekuatan fleksural yang baik sangat diharapkan dari suatu pelat bipolar. Sesuai dengan persyaratan yang ditunjukkan pada Tabel 2.4 [16], maka sebuah pelat bipolar harus memiliki kekuatan fleksural lebih besar dari 25 MPa. Kekuatan fleksural diperlukan agar pelat bipolar dapat menahan tekanan dari gas, baik yang masuk ataupun keluar dari sistem sel tunam, serta dapat menahan komponen lain, atau dengan kata lain memperkuat struktur *fuel cell stack* setelah dilakukan proses perakitan. Hasil dari pengujian ini penting karena dalam pengaplikasiannya pelat bipolar akan mengalami tekanan gas dari segala arah. Pada Tabel 4.3 ditunjukkan hasil pengujian fleksural dari keempat sampel uji.

**Tabel 4.3** Data Hasil Pengujian Fleksural

Variasi komposisi <i>Carbon Black</i> 10 % ukuran 44 $\mu\text{m}$ (% wt.)	Variasi komposisi <i>Carbon Black</i> 10 % ukuran 37 $\mu\text{m}$ (% wt.)	Kekuatan Fleksural (MPa)
100	0	14,17
90	10	24,66
80	20	18,25
70	30	12,77

Dari Tabel 4.3 dan Gambar 4.8 terlihat bahwa kekuatan fleksural dari pelat bipolar meningkat dari sampel tanpa penambahan *carbon black* 37  $\mu\text{m}$  hingga penambahan 10% *carbon black* 37  $\mu\text{m}$ . Setelah itu, penambahan komposisi diatas 10% akan mengakibatkan penurunan kekuatan fleksural. Dapat dikatakan bahwa variasi ukuran partikel *carbon black* 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  dengan perbandingan 90:10 merupakan variasi yang paling optimum untuk kekuatan fleksural.

**Gambar 4.8** Pengaruh Variasi Ukuran Partikel *Carbon Black* Terhadap Kekuatan Fleksural

Penambahan partikel *carbon black* sebagai material penyusun pelat bipolar biasanya memiliki batasan komposisi maksimum untuk memperoleh kekuatan fleksural yang optimum. Misalnya pada penelitian yang telah dilakukan oleh Ling Du, komposisi *carbon black* maksimum untuk mendapatkan sifat pelat bipolar komposit yang optimum adalah sebesar 5%. Ketika komposisi bernilai lebih rendah ataupun lebih tinggi dari nilai optimum maka akan terjadi penurunan sifat mekanis <sup>[11,12]</sup>. Penambahan di atas komposisi optimum akan mengakibatkan penurunan kekuatan fleksural dari pelat bipolar komposit, karena terjadi

perubahan sifat komposit dari *ductile* (ulet) menjadi *brittle* (rapuh) [13]. Kemungkinan komposisi optimum yang didapat dipengaruhi juga oleh pembasahan yang terjadi pada antarmuka bahan pengisi karbon dengan matriks grafit. Ketika pembasahan yang terjadi baik, maka diperlukan gaya yang lebih besar untuk dapat memutuskan ikatan antarmuka, sehingga sifat mekanis yang dihasilkan lebih baik. Selain itu, ukuran partikel *carbon black* yang semakin kecil kemungkinan akan mengakibatkan sulitnya mendapatkan distribusi yang merata dan cenderung membentuk pengelompokan atau agglomerasi [36]. Terbentuknya pengelompokan tersebut akan melemahkan ikatan antarmuka sehingga menurunkan sifat mekanis pelat bipolar [12].

Dari hasil pengujian yang dilakukan pada masing-masing sampel, maka nilai kekuatan fleksural terbaik yang didapat adalah 24,66 MPa, yang dimiliki oleh sampel dengan perbandingan komposisi *carbon black* 90:10. Nilai tersebut sudah mendekati persyaratan untuk pelat bipolar, namun nilai fleksural dari keseluruhan sampel berada pada kisaran 14,17-24,66 MPa, dimana nilai tersebut masih belum memenuhi persyaratan untuk pelat bipolar.

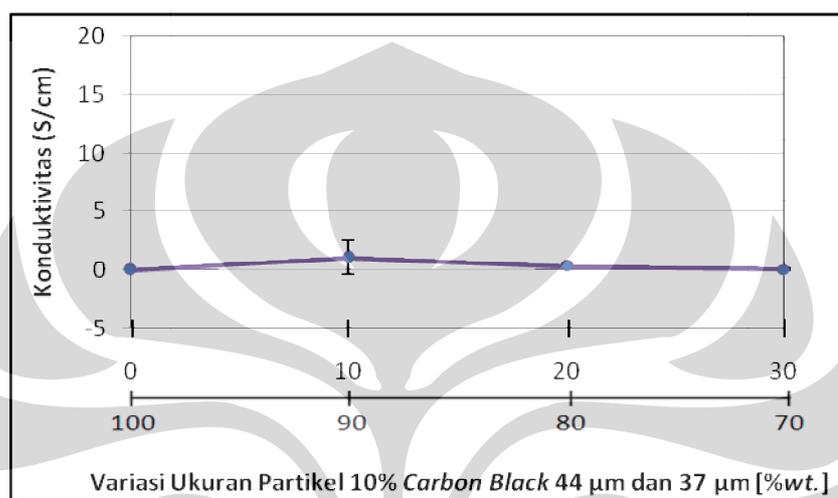
#### 4.4.4 Hasil Pengujian Konduktivitas

Nilai konduktivitas menjadi fokus utama dalam pengembangan komponen pelat bipolar. Pelat bipolar dengan konduktivitas tinggi akan mampu mengalirkan arus listrik antar elektroda dengan baik. Sesuai dengan persyaratan yang ditunjukkan pada Tabel 2.4 [16], maka sebuah pelat bipolar harus memiliki nilai konduktivitas listrik lebih dari 100 S/cm. Pengujian *four point probe* digunakan untuk mengukur resistivitas listrik pelat bipolar untuk dikonversi ke dalam nilai konduktivitas listrik. Pada Tabel 4.4 dapat dilihat hasil pengujian konduktivitas listrik dari pelat bipolar.

**Tabel 4.4** Data Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik

Variasi komposisi <i>Carbon Black</i> 10 % ukuran 44 $\mu\text{m}$ (% wt.)	Variasi komposisi <i>Carbon Black</i> 10 % ukuran 37 $\mu\text{m}$ (% wt.)	Konduktivitas (S/cm)
100	0	$8,07 \cdot 10^{-4}$
90	10	1,11
80	20	0,34
70	30	0,06

Berdasarkan Tabel 4.4 nilai konduktivitas listrik maksimum yang diperoleh adalah 1,11 S/cm. Nilai tersebut masih sangat jauh dari standar DOE untuk konduktivitas listrik, yaitu minimum 100 S/cm<sup>[16]</sup>. Distribusi *carbon black* yang tidak cukup merata dapat meningkatkan nilai resistansi listrik. Hal ini berarti apabila distribusinya dalam matriks dapat lebih merata maka nilai konduktivitas listrik pelat bipolar akan semakin tinggi.



**Gambar 4.9** Pengaruh Variasi Ukuran Partikel *Carbon Black* Terhadap Konduktivitas Listrik

Dari Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa nilai konduktivitas dari sampel kedua dengan variasi penambahan 10% partikel *carbon black* 37  $\mu\text{m}$  mengalami peningkatan dibanding sampel pertama yang tanpa penambahan partikel *carbon black* 37  $\mu\text{m}$ . Peningkatan konduktivitas ini kemungkinan disebabkan oleh adanya partikel *carbon black* dengan ukuran yang lebih kecil, yaitu 37  $\mu\text{m}$ , bertindak sebagai penghubung tambahan antar lapisan grafit, yang akan mengakibatkan nilai resistansi menurun<sup>[11]</sup>, dan hal tersebut ekuivalen dengan peningkatan sifat konduktivitas listrik. Namun, setelah komposisi *carbon black* 37  $\mu\text{m}$  dinaikkan menjadi 20% dan 30%, terjadi penurunan nilai konduktivitas yang dihasilkan. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh komposisi *carbon black* tersebut yang terlalu tinggi dan ukuran partikel *carbon black* yang semakin kecil mengakibatkan distribusi partikel yang tidak merata dan cenderung membentuk pengelompokan atau penggumpalan. Akibatnya, jaringan antar karbon yang seharusnya berfungsi sebagai jaringan sirkuit elektrik tidak terbentuk dengan baik dan akan menurunkan sifat konduktivitas dari pelat bipolar komposit.

#### 4.5 Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar

Berdasarkan hasil karakterisasi pelat bipolar karbon-karbon komposit yang ditinjau dari pengaruh variasi ukuran partikel *carbon black*, maka didapatkan perbandingan sifat akhir seperti terlihat pada Tabel 4.5 berikut.

**Tabel 4.5** Perbandingan Sifat Pelat Bipolar

Perbandingan Ukuran Partikel CB (CB 44 $\mu\text{m}$ : CB 37 $\mu\text{m}$ )	Densitas ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Porositas (%)	Kekutan Fleksural (MPa)	Konduktivitas (S/cm)
100 : 0	1,67	1,41	14,17	$8,07 \cdot 10^{-4}$
90 : 10	1,68	1,59	24,66	1,11
80 : 20	1,70	1,78	18,25	0,34
70 : 30	1,64	1,92	12,77	0,06

Berdasarkan Tabel 4.5 terlihat nilai densitas terendah sebesar  $1,64 \text{ gr}/\text{cm}^3$  diperoleh dengan variasi ukuran partikel *carbon black* 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  dengan perbandingan 70:30. Sedangkan untuk tingkat porositas terkecil sebesar 1,41% diperoleh dengan perbandingan 100:0. Variasi yang paling optimum dari keempat sampel tersebut adalah variasi ukuran partikel *carbon black* 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  dengan perbandingan 90:10, karena memiliki konduktivitas dan kekuatan fleksural yang paling tinggi, dan juga memiliki densitas yang cukup rendah. Namun porositas yang diperoleh masih cukup tinggi.

Dari penelitian ini, sifat yang memenuhi persyaratan standar DOE adalah nilai densitas. Sedangkan untuk tingkat porositas, kekuatan fleksural dan konduktivitas listrik yang didapat masih belum memenuhi standar DOE. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut dibutuhkan untuk menghasilkan perbedaan signifikan dari variabel pengaruh variasi ukuran partikel *carbon black* yang diberikan. Pemahaman sifat dasar material penyusun pelat bipolar komposit menjadi penentu komposisi yang sesuai dan parameter proses yang tepat untuk mengoptimalkan sifat akhir pelat bipolar komposit yang dihasilkan.

## BAB 5

### KESIMPULAN

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

1. Nilai konduktivitas listrik tertinggi sebesar 1,11 S/cm dan kekuatan fleksural tertinggi sebesar 24,66 MPa diperoleh dengan variasi ukuran partikel *carbon black* 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  dengan perbandingan 90:10.
2. Nilai densitas terendah sebesar 1,64  $\text{gr/cm}^3$  diperoleh dengan variasi ukuran partikel *carbon black* 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  dengan perbandingan 70:30. Sedangkan untuk tingkat porositas terkecil sebesar 1,41% diperoleh dengan perbandingan 100:0.
3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi ukuran partikel *carbon black* 44  $\mu\text{m}$  dan 37  $\mu\text{m}$  dengan perbandingan 90:10 merupakan variasi yang paling optimum, karena memiliki konduktivitas dan kekuatan fleksural yang paling tinggi, dan juga memiliki densitas yang cukup rendah. Namun, tingkat porositas yang diperoleh masih cukup tinggi.
4. Dari penelitian ini, sifat yang telah memenuhi persyaratan standar DOE adalah nilai densitas. Sedangkan untuk tingkat porositas, kekuatan fleksural dan konduktivitas listrik yang didapat masih belum memenuhi standar DOE untuk pelat bipolar.

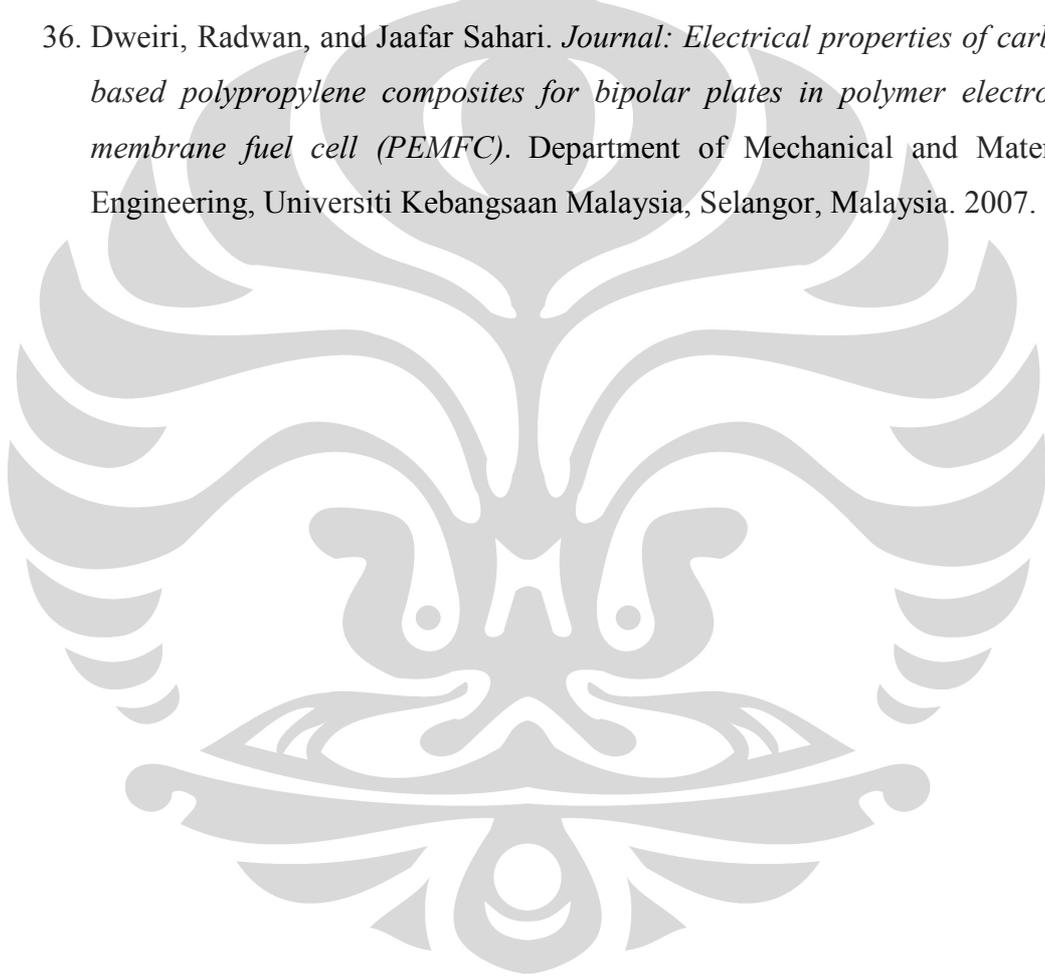
## DAFTAR REFERENSI

1. Diakses pada tanggal 16 November pukul 15.00 dari:  
<http://www.bbmlumpang.blogspot.com/2008/10/10-alasan-kenapa-bbm-dinaikkan.html>
2. US. Department of Energy. *Fuel Cell Handbook 7th Edition*. EG & G Technical Services Inc., Morgantown, West Virginia, 2004.
3. Yuhua Wang. *Thesis: Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. University of Waterloo, Ontario, Canada, 2006.
4. Hermann, Allen, Tapas Chaudhuri, and Priscila Spagnol. *Bipolar plates for PEM Fuel Cells : A Review*. Golden National Renewable Energy Laboratory: University of Colorado, 2005.
5. Suharjanto, yoghi. *Skripsi: Komposit Konduktif Polipropilen (PP)/Maleated-Anhydride-Grafted-Polypropylene (PP-g-MA)/Karbon untuk Aplikasi Pelat Bipolar Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2009.
6. Xianguo Li, and Imran Sabir. *Review of Bipolar Plates in PEM Fuel Cells: Flow-Field Designs*. Canada: University Avenue West, 2004.
7. Stambouli, A. Boudghene and E. Traversa. *Fuel cells, an Alternative to Standard Sources of Energy*. University of Roma. 'Tor Vergata', Department of Chemical Science and Technology. Roma, Italy, 2001.
8. Chicago Argonne. *Just the Basics*. 2009.
9. Prahastio, Renanto. *Proposal Penelitian: Perancangan Komposit Bipolar Plate untuk Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) dengan Variabel Aditif Resin Tembaga*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2009.
10. Viswanathan, B. *An Introduction to Energy Sources*. National Center for Catalysis Research, Department of Chemistry, Indian Institute of Technology, Madras, 2006.

11. Ling Du. *Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. 2008.
12. Wahyu, Desto, *Skripsi: Pengaruh Penambahan Tekanan Compression Moulding Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar Komposit (Epoksi/Carbon EAF-10%CB) untuk Aplikasi PEMFC*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Juli 2009.
13. Kakati, Biraj kumar and Dhanapati Deka. *Journal: 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.
14. Xiao Zi Yuan, et al., ed. *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells – From Materials to Processing*. Vancouver: University of British Columbia, 2006.
15. Heinzl, A., F. Mahlendorf, and C. Jansen. *Bipolar Plates*. Duisburg: University of Duisburg-Essen, Duisburg, Germany, 2009.
16. DOE Hydrogen Program. *Next Generation Bipolar Plates for Automotive PEM Fuel Cells*. Annual Progress Report. 2007.
17. Besmann, T.M., Klett, J. W., Henry, J. J., Lara, C.E., *Carbon/Carbon Composite Bipolar Plate for PEM Fuel Cells*. Journal of The Electrochemical Society. Metals and Ceramics Division, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA, 2001.
18. Adam, M. Hatta. *Skripsi: Analisis sifat mekanik dan konduktivitas komposit polipropilena/etilena propilena diena terpolimer/karbon (PP/EPDM/C) untuk aplikasi pelat bipolar pada polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2008.
19. ASM International Committee. *Composites*. ASM Handbook Vol. 21. 2001.
20. Callister, William D., Jr. *Materials Science and Engineering*. 7th ed. United States of America: University of Utah, 2007.
21. H. S. Lee et al.. *Evaluation of Graphite composite Bipolar Plate for PEM (Proton Exchange Membrane) Fuel Cell: Electrical, Mechanical, and Molding Properties*. Journal of Materials Processing Technology, 2007.

22. Yeetsorn, Rungsima. *Thesis: Development of Electrically Conductive Thermoplastic Composites for Bipolar Plate Application in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*. University of Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
23. Diakses pada tanggal 20 November pukul 15.30 dari:  
<http://www.wagenugraha.wordpress.com/2010/01/26/material-karbon>
24. Radhakrishnan, S.. *Presentation: Developments in Conducting Polymer Composites and Coating for Bipolar Plates*. NCL, PUNE.
25. Nicolas, Probst, Eusebiu Grivei, and Thomas Gruenberger. *New Carbon Nano-materials and Carbon Black: Threats and Opportunities*. Timcal 173, Appeldonkstraat Willebroek, Belgium.
26. Hsu-Chiang Kuan, et al.. *Preparation, Electrical, Mechanical and Thermal Properties of Composite Bipolar Plate for A Fuel Cell*. Journal of Power Sources, 2004.
27. 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.
28. *Polymers: Characteristics and Compatibility for Ultrasonic Assembly*  
<http://www.branson-plasticsjoin.com/pdf/PW-01CharComp.pdf> (diakses pada tanggal 23 November 2010 pukul 15.30)
29. Diestha, Kenya. *Skripsi: Pengaruh Penambahan 10-20 wt.% Carbon Black terhadap Karakterisasi Komposit Epoxy/Grafit Sintetis Sebagai Material Pelat Bipolar Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*, Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Juli 2010.
30. Akovali, Guneri, ed. *Handbook of Composite Fabrication*. Ankara, 2001.
31. Weber, Erik H. *Development and Modeling of Thermally Conductive Polymer/Carbon Composites*. Michigan: Michigan Technological University, 1999.
32. ASM International Committee. *Casting*. ASM Metals Handbook Vol. 15. 9<sup>th</sup> ed. 1988.

33. Chen, Ssuwei, David L. Bourell, and Kristin L. Wood. *Improvement of Electrical Conductivity of SLS PEM Fuel Cell Bipolar Plate*. Department of Mechanical Engineering, Laboratory for Freeform Fabrication, University of Texas, Austin. 2005.
34. D.F. Caulfield et al., ed. *Wood Thermoplastic Composites Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite*. 2005. hlm 4-5.
35. Diakses pada tanggal 15 November 2010 pukul 15.00 dari:  
<http://www.en.wikipedia.org/wiki/Methanol>
36. Dweiri, Radwan, and Jaafar Sahari. *Journal: Electrical properties of carbon-based polypropylene composites for bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)*. Department of Mechanical and Materials Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, Selangor, Malaysia. 2007.



## Lampiran 1. Hasil Pengujian Densitas

Sampel	Massa A (Udara) (gr)	Massa B (Air) (gr)	A-B (gr)	$\rho$ air (gr/cm <sup>3</sup> ) T 28 °C	$\rho$ sampel (gr/cm <sup>3</sup> )	$\rho$ sampel rata2 rata-rata (gr/cm <sup>3</sup> )
<b>Pelat Bipolar 1 (Komposisi CB 44 <math>\mu</math>m : 37 <math>\mu</math>m = 100:0)</b>						
1	2,33	0,95	1,38	0,996232	1,6820439	1,67
2	3,46	1,39	2,07	0,996232	1,6651994	
3	3,65	1,46	2,19	0,996232	1,6603867	
<b>Pelat Bipolar 2 (Komposisi CB 44 <math>\mu</math>m : 37 <math>\mu</math>m = 90:10)</b>						
1	2,23	0,94	1,29	0,996232	1,7221685	1,68
2	2,67	1,05	1,62	0,996232	1,6419379	
3	2,76	1,12	1,64	0,996232	1,6765856	
<b>Pelat Bipolar 3 (Komposisi CB 44 <math>\mu</math>m : 37 <math>\mu</math>m = 80:20)</b>						
1	2,99	1,24	1,75	0,996232	1,7021335	1,70
2	2,96	1,23	1,73	0,996232	1,7045357	
3	2,59	1,07	1,52	0,996232	1,6975269	
<b>Pelat Bipolar 4 (Komposisi CB 44 <math>\mu</math>m : 37 <math>\mu</math>m = 70:30)</b>						
1	2,74	1,07	1,67	0,996232	1,6345363	1,64
2	2,80	1,11	1,69	0,996232	1,6505619	
3	3,05	1,18	1,87	0,996232	1,6248704	

Contoh perhitungan data pada pelat bipolar 1 (sampel 1):

$$\rho = \frac{A}{A-B} \times \rho_{air} = \frac{2,33}{2,33 - 0,95} \times 0,996232 = 1,68 \text{ gr/cm}^3$$

## Lampiran 2. Pengujian Porositas

Sampel	Berat kering D (gr)	Berat jenuh Sw (gr)	Suspended Weight S (gr)	Sw-D (gr)	D-S (gr)	Porositas (%)	Porositas Rata-rata (%)
<b>Pelat Bipolar 1 (Perbandingan CB 44 µm : 37 µm = 100:0)</b>							
1	3,45	3,48	1,4	0,03	2,05	1,463414634	1,41
2	3,63	3,66	1,48	0,03	2,15	1,395348837	
3	3,68	3,71	1,51	0,03	2,17	1,382488479	
<b>Pelat Bipolar 2 (Perbandingan CB 44 µm : 37 µm = 90:10)</b>							
1	2,22	2,24	0,9	0,02	1,32	1,515151515	1,59
2	2,32	2,34	0,94	0,02	1,38	1,449275362	
3	2,74	2,77	1,07	0,03	1,67	1,796407186	
<b>Pelat Bipolar 3 (Perbandingan CB 44 µm : 37 µm = 80:20)</b>							
1	2,78	2,81	1,15	0,03	1,63	1,840490798	1,78
2	2,96	2,99	1,23	0,03	1,73	1,734104046	
3	2,9	2,93	1,21	0,03	1,69	1,775147929	
<b>Pelat Bipolar 4 (Perbandingan CB 44 µm : 37 µm = 70:30)</b>							
1	2,7	2,73	1,06	0,03	1,64	1,829268293	1,92
2	3,09	3,13	1,22	0,04	1,87	2,139037433	
3	2,75	2,78	1,07	0,03	1,68	1,785714286	

Contoh perhitungan data pada pelat bipolar 1 (sampel 1):

$$\% \text{porositas} = \frac{S_w - D}{D - S} \times 100\% = \frac{3,48 - 3,45}{3,45 - 1,4} \times 100\% = 1,46 \%$$

## Lampiran 3. Hasil Pengujian Fleksural

Sampel	Lebar b (mm)	Tebal d (mm)	Panjang L (mm)	Load P (N)	Kekuatan Fleksural $\sigma_f$ (MPa)	Kekuatan Fleksural $\sigma_f$ Rata-rata (MPa)
<b>Pelat Bipolar 1 (Perbandingan CB 44 <math>\mu\text{m}</math> : 37 <math>\mu\text{m}</math> = 100:0)</b>						
1	12,9	4,4	64	35,2	13,53065539	14,17
2	12,7	4,8	64	48	15,7480315	
3	12	4,4	64	32	13,2231405	
<b>Pelat Bipolar 2 (Perbandingan CB 44 <math>\mu\text{m}</math> : 37 <math>\mu\text{m}</math> = 90:10)</b>						
1	12,9	3,4	64	43,2	27,81041281	24,66
2	13,15	3,7	64	44,8	23,89021433	
3	13,3	3,6	64	40	22,27791701	
<b>Pelat Bipolar 3 (Perbandingan CB 44 <math>\mu\text{m}</math> : 37 <math>\mu\text{m}</math> = 80:20)</b>						
1	14,6	3,4	64	28,8	16,38147604	18,25
2	14	3,4	64	33,6	19,93079585	
3	15,3	3,3	64	32	18,43749437	
<b>Pelat Bipolar 4 (Perbandingan CB 44 <math>\mu\text{m}</math> : 37 <math>\mu\text{m}</math> = 70:30)</b>						
1	13,1	4	64	28,8	13,19083969	12,77
2	14,7	4,2	64	30,4	11,25456986	
3	13,8	3,8	64	28,8	13,87450319	

Contoh perhitungan data pada pelat bipolar 1 (sampel 1):

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} = \frac{3 \times 35,2 \times 64}{2 \times 12,9 \times 4,4^2} = 13,53 \text{ MPa}$$

## Lampiran 4. Hasil Pengujian Konduktivitas

Sampel	Resistansi $\rho$ ( $\Omega/\text{cm}$ )	Konduktivitas $\sigma$ (S/cm)	Konduktivitas Rata-rata (S/cm)
<b>Pelat Bipolar 1 (Perbandingan CB 44 <math>\mu\text{m}</math> : 37 <math>\mu\text{m}</math> = 100:0)</b>			
1	1589,5	0,000629129	8,07.10 <sup>-4</sup>
2	891	0,001122334	
3	1492,5	0,000670017	
<b>Pelat Bipolar 2 (Perbandingan CB 44 <math>\mu\text{m}</math> : 37 <math>\mu\text{m}</math> = 90:10)</b>			
1	0,354	2,824858757	1,11
2	3,38	0,295857988	
3	4,83	0,207039337	
<b>Pelat Bipolar 3 (Perbandingan CB 44 <math>\mu\text{m}</math> : 37 <math>\mu\text{m}</math> = 80:20)</b>			
1	1,611	0,620732464	0,34
2	4,67	0,214132762	
3	5,79	0,172711572	
<b>Pelat Bipolar 4 (Perbandingan CB 44 <math>\mu\text{m}</math> : 37 <math>\mu\text{m}</math> = 80:20)</b>			
1	1052	0,00095057	0,06
2	639,5	0,001563722	
3	5,46	0,183150183	

Contoh perhitungan data pada pelat bipolar 1 (sampel 1):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1589,5} = 6,29 \cdot 10^{-4} \text{ S/cm}$$

Lampiran 5. Tabel Densitas Air (simetri.co.uk)

Densitas air ( $\text{g/cm}^3$ ) di berbagai temperatur mulai dari  $0^\circ\text{C}$  (*liquid state*) sampai  $30,9^\circ\text{C}$  dengan peningkatan  $0,1^\circ\text{C}$

	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,999841	0,999847	0,999854	0,999860	0,999866	0,999872	0,999878	0,999884	0,999889	0,999895
1	0,999900	0,999905	0,999909	0,999914	0,999918	0,999923	0,999927	0,999930	0,999934	0,999938
2	0,999941	0,999944	0,999947	0,999950	0,999953	0,999955	0,999958	0,999960	0,999962	0,999964
3	0,999965	0,999967	0,999968	0,999969	0,999970	0,999971	0,999972	0,999972	0,999973	0,999973
4	0,999973	0,999973	0,999973	0,999972	0,999972	0,999972	0,999970	0,999969	0,999968	0,999966
5	0,999965	0,999963	0,999961	0,999959	0,999957	0,999955	0,999952	0,999950	0,999947	0,999944
6	0,999941	0,999938	0,999935	0,999931	0,999927	0,999924	0,999920	0,999916	0,999911	0,999907
7	0,999902	0,999898	0,999893	0,999888	0,999883	0,999877	0,999872	0,999866	0,999861	0,999855
8	0,999849	0,999843	0,999837	0,999830	0,999824	0,999817	0,999810	0,999803	0,999796	0,999789
9	0,999781	0,999774	0,999766	0,999758	0,999751	0,999742	0,999734	0,999726	0,999717	0,999709
10	0,999700	0,999691	0,999682	0,999673	0,999664	0,999654	0,999645	0,999635	0,999625	0,999615
11	0,999605	0,999595	0,999585	0,999574	0,999564	0,999553	0,999542	0,999531	0,999520	0,999509
12	0,999498	0,999486	0,999475	0,999463	0,999451	0,999439	0,999427	0,999415	0,999402	0,999390
13	0,999377	0,999364	0,999352	0,999339	0,999326	0,999312	0,999299	0,999285	0,999272	0,999258
14	0,999244	0,999230	0,999216	0,999202	0,999188	0,999173	0,999159	0,999144	0,999129	0,999114
15	0,999099	0,999084	0,999069	0,999054	0,999038	0,999023	0,999007	0,998991	0,998975	0,998959
16	0,998943	0,998926	0,998910	0,998893	0,998877	0,998860	0,998843	0,998826	0,998809	0,998792
17	0,998774	0,998757	0,998739	0,998722	0,998704	0,998686	0,998668	0,998650	0,998632	0,998613
18	0,998595	0,998576	0,998558	0,998539	0,998520	0,998501	0,998482	0,998463	0,998444	0,998424
19	0,998405	0,998385	0,998365	0,998345	0,998325	0,998305	0,998285	0,998265	0,998244	0,998224
20	0,998203	0,998183	0,998162	0,998141	0,998120	0,998099	0,998078	0,998056	0,998035	0,998013
21	0,997992	0,997970	0,997948	0,997926	0,997904	0,997882	0,997860	0,997837	0,997815	0,997792
22	0,997770	0,997747	0,997724	0,997701	0,997678	0,997655	0,997632	0,997608	0,997585	0,997561
23	0,997538	0,997514	0,997490	0,997466	0,997442	0,997418	0,997394	0,997369	0,997345	0,997320
24	0,997296	0,997271	0,997246	0,997221	0,997196	0,997171	0,997146	0,997120	0,997095	0,997069
25	0,997044	0,997018	0,996992	0,996967	0,996941	0,996914	0,996888	0,996862	0,996836	0,996809

26	0,996783	0,996756	0,996729	0,996703	0,996676	0,996649	0,996621	0,996594	0,996567	0,996540
27	0,996512	0,996485	0,996457	0,996429	0,996401	0,996373	0,996345	0,996317	0,996289	0,996261
28	0,996232	0,996204	0,996175	0,996147	0,996118	0,996089	0,996060	0,996031	0,996002	0,995973
29	0,995944	0,995914	0,995885	0,995855	0,995826	0,995796	0,995766	0,995736	0,995706	0,995676
30	0,995646	0,995616	0,995586	0,995555	0,995525	0,995494	0,995464	0,995433	0,995402	0,995371
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9



## Lampiran 6. Spesifikasi Resin Epoksi

EP

**Bakelite** *Technical Information*

---

**Bakelite® EPR 174**  
 Unmodified, liquid standard epoxy resin based on Bisphenol-A

<u>Properties</u>	Unit	Value
Viscosity at 25°C	mPa.s	1300 ± 200
Epoxy equivalent	g/eq.	189 ± 5
Hydrolyzable chlorine content	%	< 0.05
Colour according to the Gardner scale		< 1

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

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

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

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

P.T. JUSTUS KIMARAYA  
 JAKARTA

## Lampiran 7. Spesifikasi *Hardener* Epoksi

### TECHNICAL DATA SHEET

#### EPOXY HARDENER V-140

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

#### SPECIFICATION :

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

#### TYPICAL PROPERTIES :

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

#### TYPICAL PROPERTIES IN A CURED COATING :

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

#### TYPICAL CURED RESIN PROPERTIES :

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

#### CHEMICAL RESISTANCE PROPERTIES :

(weight change after 10 days immersion, %)

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

*Dr. Darius Kimiatoga*  
JAKARTA

## Lampiran 8. Spesifikasi Grafit EAF

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

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

MANUFACTURE :  
 -----  
 NCK ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA  
 SDK ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA  
 SEC ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA  
 SGL ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA  
 TOKAI ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA.  
 UCAR ELECTRODE-ARC-D610X2700MM-60-66KA.

(Lanjutan)

WED, 29-JUL-09 12:21      DIV SSP II PTKS CLG      62 0254 371184      P. 8

CILEGON

INVENTORY CONTROL SYSTEM      Item No : 00908011

DATE : 04.12.2007

GROUP/CLASS : 443019132

Name-name : ELECTRODE.

Material Code	Material Unit	BOH	Min	Max
C0908011	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 CONTENTS: 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