



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH VARIASI WAKTU *MIXING* 15-75 MENIT  
TERHADAP KARAKTERISTIK PELAT BIPOLAR PEMFC**

**SKRIPSI**

**SUCI APRILIA DIMYATI  
0706268884**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
UNIVERSITAS INDONESIA  
JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH VARIASI WAKTU *MIXING* 15-75 MENIT  
TERHADAP KARAKTERISTIK PELAT BIPOLAR PEMFC**

**SKRIPSI**

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

**SUCI APRILIA DIMYATI  
0706268884**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
UNIVERSITAS INDONESIA  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Suci Aprilia Dimiyati**

**NPM : 0706268884**

**Tanda Tangan : **

**Tanggal : 30 Juni 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Suci Aprilia Dimiyati  
NPM : 0706268884  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengaruh Variasi Waktu *Mixing* 15-75 Menit  
terhadap Karakteristik Pelat Bipolar PEMFC

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada program studi Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Ir. Yunita Sadeli, M.Sc.  
Pembimbing 2 : Dr. Ir. Bambang Prihandoko, MT  
Penguji 1 : Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil.Eng  
Penguji 2 : Dr. Ir. Sri Harjanto

(*Yunita*)  
(*Bambang*)  
(*Akhmad Herman Yuwono*)  
(*Sri Harjanto*)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Juni 2011

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Waktu *Mixing* 15-75 Menit terhadap Karakteristik Pelat Bipolar PEMFC”** yang merupakan salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

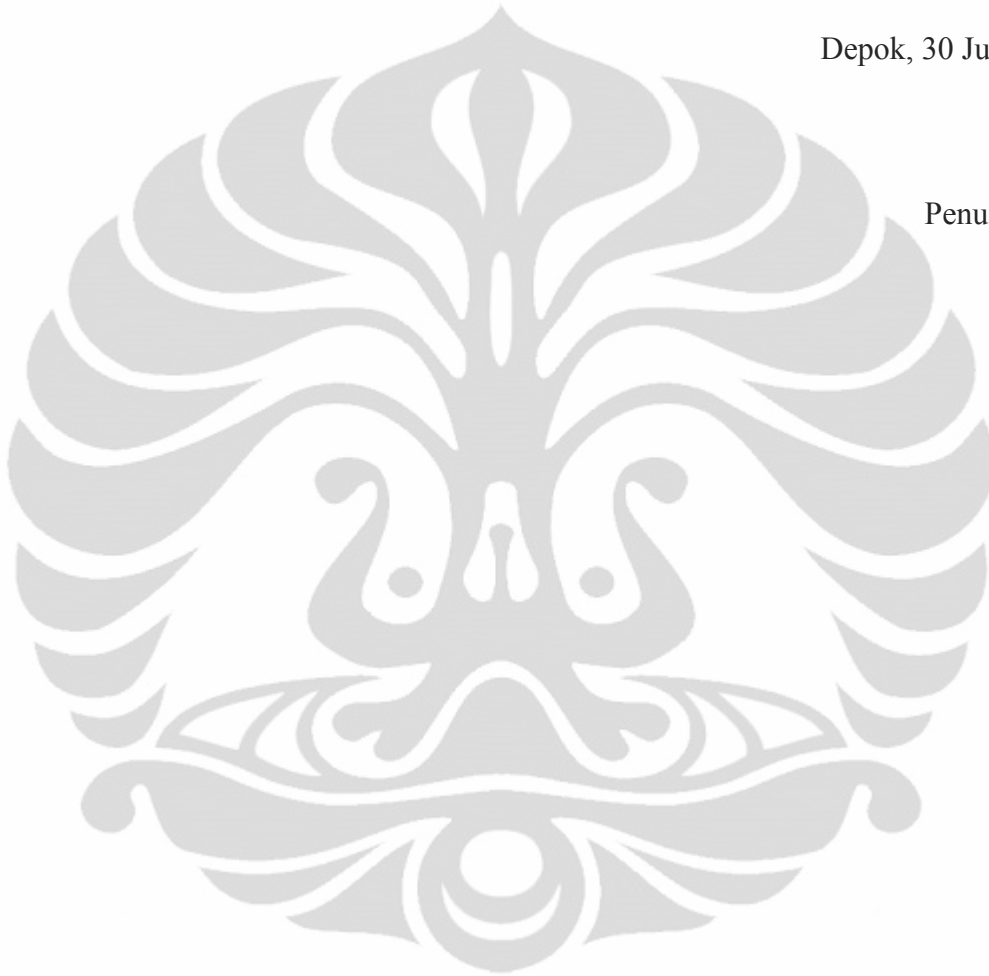
Dalam rangka menyelesaikan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa bantuan, bimbingan, dorongan, dan petunjuk dari berbagai pihak sangat diperlukan dalam menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan dan terima kasih kepada :

1. Ir. Yunita Sadeli, M.Sc selaku dosen pembimbing dari Departemen Metalurgi dan Material yang telah menyediakan waktu, tenaga, pikiran, serta bantuan lain baik dalam bentuk moril maupun materil,
2. Dr. Ir. Bambang Prihandoko, MT sebagai pembimbing dari Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang telah membantu dan membimbing dalam penulisan skripsi ini,
3. Seluruh staf pengajar serta karyawan Departemen Metalurgi dan Material atas segala dukungan dari masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan,
4. Staf laboratorium serta karyawan di Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia yang telah menyediakan waktu, tempat, serta arahan selama penelitian yang dilakukan oleh penulis,
5. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral dan
6. Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini terdapat banyak kekurangan dan kesalahan dikarenakan keterbatasan ilmu yang dimiliki penulis. Oleh karena itu, penulis menerima kritik dan saran yang dapat dijadikan perbaikan di masa depan. Akhir kata semoga apa yang sudah diberikan dan dihasilkan dari skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan di Indonesia.

Depok, 30 Juni 2011

Penulis



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

---

---

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

Nama : Suci Aprilia Dimiyati  
NPM : 0706268884  
Program Studi : Metalurgi & Material  
Departemen : Metalurgi & Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**PENGARUH VARIASI WAKTU *MIXING* 15-75 MENIT TERHADAP  
KARAKTERISTIK PELAT BIPOLAR PEMFC**

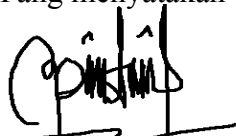
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak bebas Royalti Noeksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 30 Juni 2011

Yang menyatakan



(Suci Aprilia Dimiyati)

## ABSTRAK

Nama : Suci Aprilia Dimiyati  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Pengaruh Variasi Waktu Mixing 15-75 Menit Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar PEMFC

Sel Tunam adalah suatu alat konversi energi elektrokimia yang mengubah energi kimia (gas  $H^2$  dan  $O^2$ ) menjadi energi listrik sebagai hasil utama. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) merupakan salah satu jenis sel tunam yang sedang banyak dikembangkan karena memiliki banyak keunggulan seperti, temperatur operasi yang relatif rendah, *power density* yang tinggi, emisi gas buang yang rendah, serta energi yang efisien. Bagian penting dari sistem PEMFC adalah pelat bipolar yang merupakan komponen yang memberikan kontribusi berat dan volume yang tinggi mencapai 80% dari berat sel tunam secara keseluruhan. Oleh karena itu, sangat perlu dilakukan suatu rekayasa dengan material komposit yang massa jenisnya ringan namun juga memiliki sifat mekanis dan konduktivitas yang baik.

Penelitian ini bertujuan untuk merekayasa pelat bipolar tersebut dengan menggunakan bahan utama grafit, polimer termoset *epoxy*, serta penambahan *carbon black* dengan komposisi 5% berukuran kurang dari 44  $\mu m$ . Pelat bipolar difabrikasi dengan melakukan variasi waktu *mixing* antara grafit EAF dan *carbon black* selama 15, 30, 45, 60, dan 75 menit. Pembuatan pelat bipolar ini dilakukan dengan proses *hot press* sebesar 55 MPa dan temperatur 100°C selama 4 jam dengan cetakan yang berukuran panjang 15 cm, lebar 15 cm, dan tebal 3-4 mm. Setelah dilakukan karakterisasi, maka pelat bipolar ini menghasilkan sifat-sifat yang optimal pada waktu campur 15 menit, yaitu kekuatan fleksural 49,23 MPa, konduktivitas 6,71 S/cm, densitas 1,62  $gr/cm^3$ , serta porositas 0,75%. Hasil ini masih bisa ditingkatkan terutama nilai konduktivitas pada pelat bipolar tersebut, sehingga diharapkan mampu digunakan sebagai pelat bipolar pada sistem sel tunam untuk sumber energi masa depan.

Kata kunci:

Pelat bipolar, PEMFC, epoksi resin, grafit EAF, *carbon black*, variasi waktu *mixing*, densitas, porositas, kekuatan fleksural, konduktivitas listrik.



## ABSTRACT

Name : Suci Aprilia Dimiyati  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : The Effect of Mixing Time Variation from 15-75 Minutes on The Characteristic of PEMFC Bipolar Plate.

Fuel cell is an electrochemical energy conversion device that changes chemical energy ( $H^2$  and  $O^2$  gas) to electrical energy as the primary outcome. Polymer electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) is one type of fuel cell being developed because it has many advantages such as operating temperature is relatively low, high power density, emissions are low, and energy efficient. An important part of the PEMFC system is the bipolar plate is a component that contributes to weight and high volume reaches 80% of the weight of the fuel cell as a whole. Therefore, is very necessary to an engineering with composite materials with a minor density but also has good mechanical properties and conductivity.

This research aims to reverse the bipolar plate by using the main material of graphite, thermosetting epoxy polymers, and the addition of carbon black with variable composition of 5% wt. That graphite EAF and carbon black particle size are less than 44  $\mu m$ . Bipolar plate was fabricated by various of mixing time between graphite and carbon black for 15, 30, 75, 60, and 75 minutes. Bipolar plate manufacturing is done by hot press process with 55 MPa pressure and temperature of 100°C for 4 hours by using a mold measuring 15 cm long, 15 cm wide, and 3-4 mm thick. After a characterization, the bipolar plate has the properties of the optimal with mixing time at 15 minute, i.e flexural strength 49,23 MPa, conductivity 6,71 S/cm, density 1,62  $gr/cm^3$ , and porosity 0,75%. These results could still be improved, especially the value of conductivity of the bipolar plate, so that was expected to be used as bipolar plates in fuel cell systems for future energy sources.

Keywords:

Bipolar plate, PEMFC, epoxy resin, graphite EAF, carbon black, mixing time variation, density, porosity, flexural strength, electrical conductivity.

## DAFTAR ISI

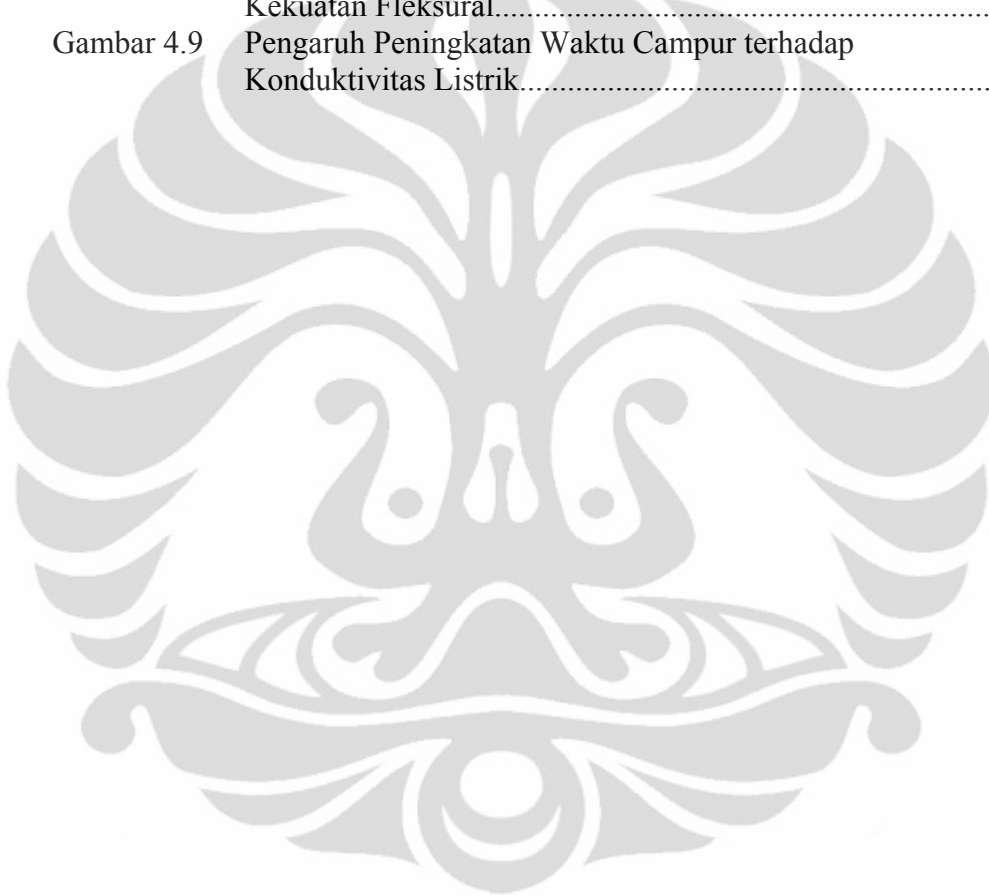
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i> .....	viii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
<b>1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	5
1.5 Sistematika Penulisan.....	6
<b>2. DASAR TEORI.....</b>	<b>8</b>
2.1 Sel Tunam.....	8
2.1.1 Jenis-Jenis Sel Tunam.....	10
2.2 <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i> (PEMFC).....	11
2.2.1 Prinsip Dasar PEMFC.....	13
2.2.2 Pelat Bipolar.....	14
2.2.2.1 Pelat Bipolar Berbasis Grafit.....	17
2.2.2.2 Pelat Bipolar Berbasis Komposit.....	18
2.3. Material Penyusun Pelat Bipolar.....	20
2.3.1 Resin Epoksi.....	20
2.3.1.1 Umum.....	20
2.3.1.2 Sifat dan Struktur.....	20
2.3.2 Grafit EAF.....	22
2.3.2.1 Umum.....	22
2.3.2.2 Sifat dan Struktur.....	25
2.3.3 <i>Carbon Black</i> .....	26
2.3.3.1 Umum.....	26
2.3.3.2 Sifat/Struktur.....	26
2.3.4 Metanol.....	28
2.4 Metode Fabrikasi: <i>Mixing</i> .....	30
2.5 Metode Fabrikasi: <i>Compression Moulding (Hot Pressing)</i> .....	31
<b>3. METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>34</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	34
3.1.1 Diagram Alir Fabrikasi Pembuatan Pelat Bipolar.....	34
3.1.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel.....	35

3.2 Alat dan Bahan.....	35
3.2.1 Peralatan.....	35
3.2.2 Bahan.....	36
3.2.2.1 Epoksi Resin.....	37
3.2.2.2 Epoksi <i>Hardener</i> .....	37
3.2.2.2 Grafit EAF.....	37
3.2.2.3 <i>Carbon Black</i> .....	38
3.2.2.4 Metanol.....	39
3.3 Preparasi Sampel.....	39
3.3.1 <i>Crushing</i> dan <i>milling</i> grafit.....	39
3.3.2 Penimbangan.....	39
3.3.3 Pencampuran.....	40
3.3.4 Pencetakan Pelat.....	42
3.3.5 Pembuatan Spesimen Uji.....	43
3.3.5 Proses Karakterisasi Material Pelat Bipolar.....	44
3.3.5.1 Pengujian Konduktivitas.....	44
3.3.5.2 Pengujian Densitas (Rapat Massa).....	45
3.3.5.3 Pengujian Porositas.....	46
3.3.5.4 Pengujian Fleksural (Tekuk).....	47
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>49</b>
4.1 Hasil Preparasi Sampel.....	49
4.1.1 Hasil <i>Crushing</i> dan <i>Milling</i> .....	49
4.1.1.1 Hasil Preparasi Grafit EAF.....	49
4.1.1.2 Hasil Preparasi <i>Carbon Black</i> .....	49
4.1.2 Hasil Pencampuran Bahan ( <i>Mixing</i> ).....	50
4.1.3 Hasil Pencetakan Pelat Bipolar.....	51
4.1.4 Hasil Pembuatan Sampel uji.....	53
4.2 Hasil Pengujian Karakterisasi Spesimen Uji.....	54
4.2.1 Pengujian Densitas.....	54
4.2.2 Pengujian Porositas.....	56
4.2.3 Pengujian Fleksural.....	59
4.2.4 Pengujian Konduktivitas.....	61
4.3 Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar dengan Kenaikan Waktu Campur Grafit EAF dan <i>Carbon Black</i> .....	64
<b>5. KESIMPULAN.....</b>	<b>66</b>
<b>DAFTAR REFERENSI.....</b>	<b>67</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>71</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Proses Reaksi elektrokimia Pada Sel Tunam.....	2
Gambar 1.2	Skema Proses Peleburan Baja.....	4
Gambar 2.1	Operasi Dasar Sel Bahan Bakar.....	8
Gambar 2.2	Komponen Penyusun PEMFC.....	12
Gambar 2.3	Mekanisme <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i> .....	14
Gambar 2.4	Material Penyusun Pelat Bipolar Pada Umumnya.....	16
Gambar 2.5	Pengaruh jumlah grafit terhadap (a) densitas, (b) kekuatan tekan dan (c) porositas.....	19
Gambar 2.6	Struktur <i>Epichlorhydrin</i> dan <i>Bisphenol A</i> .....	21
Gambar 2.7	Reaksi Pembentukan Epoksi.....	21
Gambar 2.8	Proses Peleburan Bahan Baku Pembuatan Baja pada Dapur Busur Listrik.....	23
Gambar 2.9	Pengaruh Penambahan Grafit terhadap Resistansi Listrik.....	24
Gambar 2.10	Struktur Kristal Grafik.....	25
Gambar 2.11	Ilustrasi dari Struktur <i>Carbon Black</i> .....	27
Gambar 2.12	<i>Carbon Black</i> pada : Elektroda (a), Polimer (b).....	28
Gambar 2.13	Ilustrasi Skematik dari (a) Bagaimana Beragam Resistansi Terjadi yang Didefinisikan dengan Keseluruhan Resistansi, R; (b) Partikel <i>Carbon Black</i> Ditempatkan di antara Lapisan Grafrit untuk Mengurangi Nilai Re.....	29
Gambar 2.14	Struktur dari Metanol.....	29
Gambar 2.15	Komponen dalam Proses Pencampuran: (a) <i>Planetary Ball Mil</i> ; (b) <i>Jar</i> ; dan (c) Bola Penggiling.....	30
Gambar 2.16	Ilustrasi Pembuatan Pelat Bipolar dengan Metode <i>Compression Moulding</i> .....	32
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian (Fabrikasi Pelat Bipolar).....	34
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian (Karakterisasi Sampel).....	35
Gambar 3.3	Epoksi Resin dan <i>Hardener</i> .....	37
Gambar 3.4	Grafrit.....	38
Gambar 3.5	<i>Carbon black</i> .....	38
Gambar 3.6	Proses Penimbangan.....	40
Gambar 3.7	(a) Proses Pencampuran dan (b) hasil pencampuran.....	41
Gambar 3.8	(a) Cetakan yang Digunakan dan (b) Penempatan Cetakan pada Mesin <i>Hydraulic Pressure Machine</i> .....	42
Gambar 3.9	Sampel Uji Konduktivitas, Densitas, dan Porositas.....	43
Gambar 3.10	Sampel Uji Fleksural.....	43
Gambar 3.11	Skema Uji Konduktivitas.....	44
Gambar 3.12	Penimbangan Sampel di Air.....	45
Gambar 3.13	Perendaman Sampel di Air.....	46
Gambar 3.14	Skema Uji Fleksural.....	48
Gambar 4.1	Grafrit EAF (a) Sebelum di <i>Crushing</i> dan <i>Milling</i> ; (b) setelah di <i>Crushing</i> dan <i>Milling</i> .....	49
Gambar 4.2	<i>Carbon Black</i> (a) Hasil Pirolisis ; (b) Hasil Pengayakan.....	50

Gambar 4.3	Hasil Pencampuran (a) Sebelum <i>Mixing</i> pada <i>Hot Plate</i> ; (b) Hasil Akhir <i>Hot Mixing</i> .....	51
Gambar 4.4	Pelat Bipolar yang Dihasilkan pada Variasi Waktu Campur Grafrit EAF dan <i>Carbon Black</i> : a.) 15 menit, b.) 30 menit, c.) 45 menit, d.) 60 menit, dan e.) 75 menit.....	52
Gambar 4.5	Spesimen Uji (a) Konduktivitas, Densitas, dan Porositas; (b) Fleksural.....	54
Gambar 4.6	Pengaruh Peningkatan Waktu Campur terhadap Densitas.....	55
Gambar 4.7	Pengaruh Peningkatan Waktu Campur terhadap Porositas.....	57
Gambar 4.8	Pengaruh Peningkatan Waktu Campur terhadap Kekuatan Fleksural.....	60
Gambar 4.9	Pengaruh Peningkatan Waktu Campur terhadap Konduktivitas Listrik.....	62

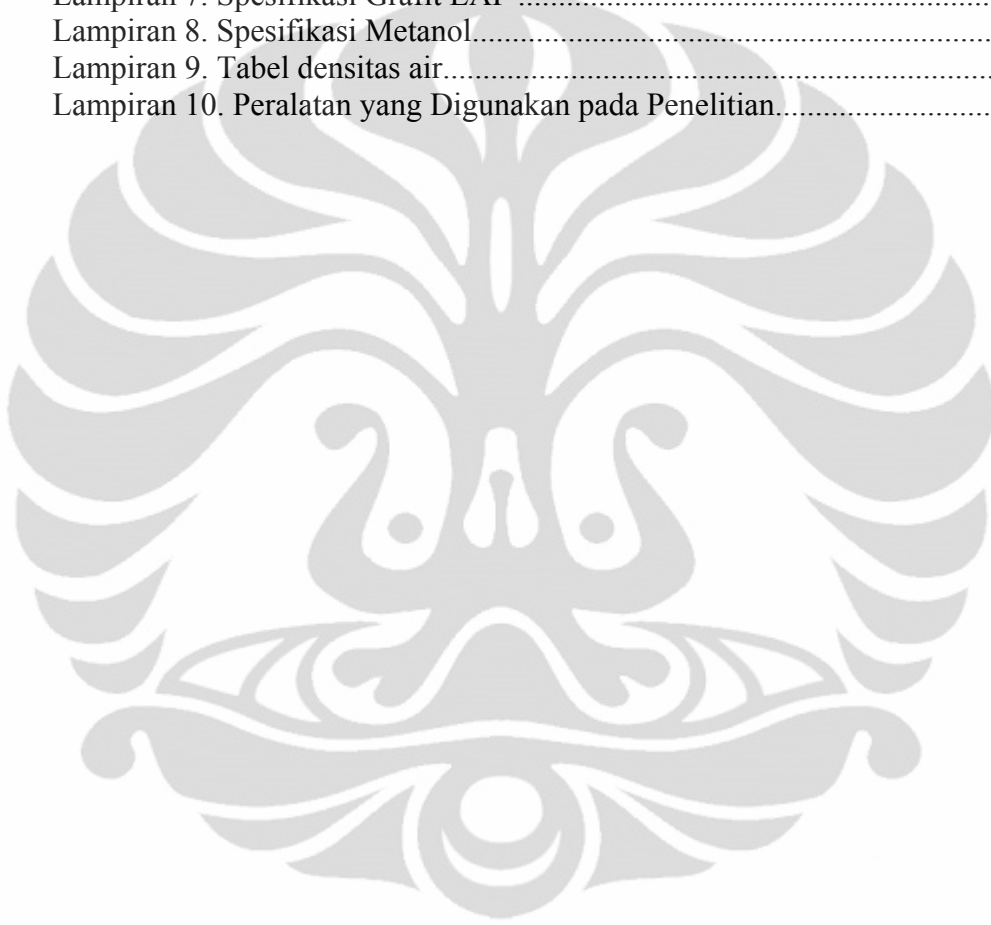


## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kelebihan dan Kelemahan dari <i>Fuel Cell</i> .....	9
Tabel 2.2	Jenis-jenis <i>Fuel Cell</i> dan Karakteristiknya.....	10
Tabel 2.3	Fungsi dan Material Komponen dalam PEMFC.....	12
Tabel 2.4	Kriteria Pelat Bipolar yang ideal.....	15
Tabel 2.5	Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Beberapa Material sebagai Pelat Bipolar.....	17
Tabel 2.6	Perbandingan nilai konduktivitas dari material pelat bipolar.....	19
Tabel 2.7	Keunggulan dan Kelemahan Epoksi Resin.....	22
Tabel 2.8	Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel dari Grafit.....	24
Tabel 2.9	Spesifikasi <i>Plaetary Ball Mill</i> .....	31
Tabel 3.1	Komposisi Pelat Bipolar dan Variasi waktu pencampuran.....	40
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Densitas.....	55
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Porositas.....	57
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Fleksural.....	59
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik.....	62
Tabel 4.5	Perbandingan Karakteristik Pelat dengan Variasi Kenaikan Waktu Campur Grafit EAF dan <i>Carbon Black</i> .....	64

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Pengujian Densitas.....	71
Lampiran 2. Hasil Pengujian Porositas.....	73
Lampiran 3. Hasil Pengujian Fleksural.....	74
Lampiran 4. Hasil Pengujian Konduktivitas.....	75
Lampiran 5. Spesifikasi Resin Epoksi.....	77
Lampiran 6. Spesifikasi Epoksi <i>Hardener</i> .....	78
Lampiran 7. Spesifikasi Grafit EAF .....	79
Lampiran 8. Spesifikasi Metanol.....	80
Lampiran 9. Tabel densitas air.....	81
Lampiran 10. Peralatan yang Digunakan pada Penelitian.....	83



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada zaman modern dan serba berkembang ini, permintaan akan sumber energi terutama energi bahan bakar fosil terus meningkat. Penggunaan energi yang terus meningkat ini tidak diimbangi dengan sumber daya alam yang memadai, sehingga untuk beberapa dekade mendatang dapat diprediksi bahwa energi bahan bakar fosil tersebut tidak mampu memenuhi lagi seluruh kebutuhan konsumsi hidup penduduk dunia.

Ketergantungan akan bahan bakar fosil ini memiliki dampak yang signifikan, dimana akan terjadi penipisan cadangan minyak bumi, ketidakstabilan harga akan laju permintaan yang lebih besar dari produksi minyak, dan permasalahan lingkungan karena menghasilkan karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dari hasil pembakaran. Seperti yang telah diketahui, peningkatan zat hasil dari pembakaran fosil (CO dan CO<sub>2</sub>) menjadi penyebab utama polusi gas rumah kaca. Hal ini dapat menjadi ancaman yang serius bagi kehidupan makhluk hidup di bumi.

Pencarian akan sumber energi alternatif baru terus dilakukan di negara-negara maju. Sumber energi alternatif memang sudah lama diperbincangkan untuk segera digunakan. Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menargetkan pada tahun 2020 mendatang penggunaan akan energi alternatif sudah mencapai lima persen<sup>[1]</sup>. Kebijakan mengenai energi alternatif pun tidak kalah banyak. Dari sisi teknologi dan ketersediaan bahan baku juga sudah tidak diragukan lagi.

Namun yang menjadi persoalannya adalah terdapat kesulitan dalam teknologi proses, biaya yang mahal, belum cukupnya kuantitas yang bisa diperoleh dari energi alternatif tersebut untuk memenuhi kebutuhan dari total energi yang diperlukan, serta energi yang tidak ramah lingkungan.

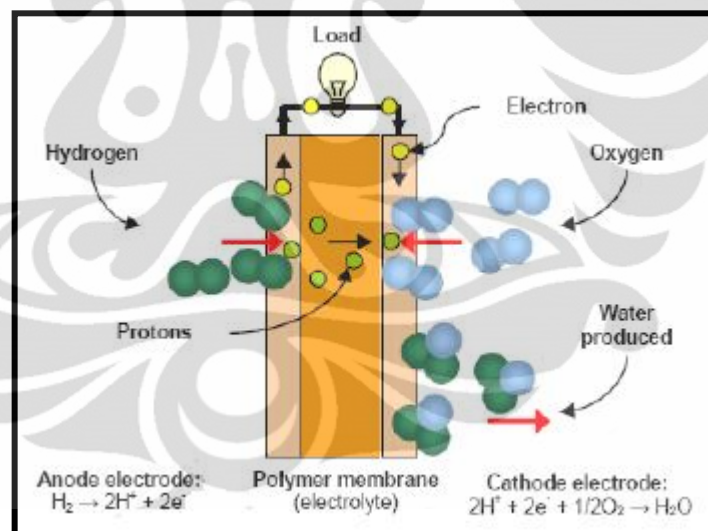
Parameter yang digunakan untuk mengukur tingkat keberhasilan sumber energi alternatif yang baru adalah energi tersebut dapat diperbaharui, teknologi



energi dengan biaya yang efektif, dan ramah lingkungan. Salah satu energi alternatif yang sedang marak dikembangkan adalah sel tunam.

Sel tunam adalah sel bahan bakar yang memiliki efisiensi tinggi, dimana menghasilkan listrik melalui proses elektrokimia dengan mengkombinasikan gas hidrogen ( $H_2$ ) dan oksigen ( $O_2$ ). Hasil sampingan dari proses ini adalah air ( $H_2O$ ) dan panas, dimana tidak terjadi pembakaran dari bahan bakarnya sendiri. Hal inilah yang menjadi alasan kenapa energi alternatif ini sangat ramah lingkungan.

Proses konversi energi kimia menjadi energi listrik dapat terjadi karena adanya proses oksidasi bahan bakar dan reduksi oksigen sehingga terbentuk proton dan elektron sebagai partikel bermuatan listrik (ion). Melalui sebuah elektrolit proton berpindah dari anoda (elektroda negatif) ke katoda (elektroda positif), sementara elektron akan mengalir melalui suatu beban eksternal memberikan kerja arus listrik seperti terlihat pada Gambar 1.1.



**Gambar 1.1** Proses Reaksi elektrokimia Pada Sel Tunam<sup>[2]</sup>.

**Sumber:** Pengembangan Model Matematis untuk Disain dan Analisis Sel Tunam Membran Pertukaran Proton (PEMFC). (Pujowidodo, Hariyotejo 2009).

Jenis sel tunam yang sedang marak dikembangkan saat ini adalah sel tunam berbasis polimer yaitu *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC). PEMFC merupakan salah satu jenis sel tunam yang sangat menjanjikan dikarenakan PEMFC memiliki efisiensi yang tinggi, kerapatan arus yang tinggi,

temperatur aplikasi yang relatif rendah, waktu pakai yang panjang mencapai 11.000 jam<sup>[3]</sup>, masalah korosi minimal karena hanya terdapat hasil sampingan berupa air (H<sub>2</sub>O) yang memiliki pH netral.

Pada PEMFC menggunakan material berupa membran polimer, katalis elektroda, dan pelat bipolar. Membran polimer merupakan konduktor proton yang sangat baik, karena hanya menggunakan air sebagai *liquid*. Penggunaan air ini dapat meminimalisasi masalah korosi<sup>[4]</sup>. Pengelolaan air di membran merupakan suatu hal yang kritis bagi performa sel tunam. Sel tunam harus beroperasi pada kondisi, dimana air tidak boleh terevaporasi lebih cepat untuk menjaga agar membran tidak terhidrasi. Karena keterbatasannya itu, temperatur operasi polimer umumnya tidak melebihi 100°C (sekitar 60-80°C).

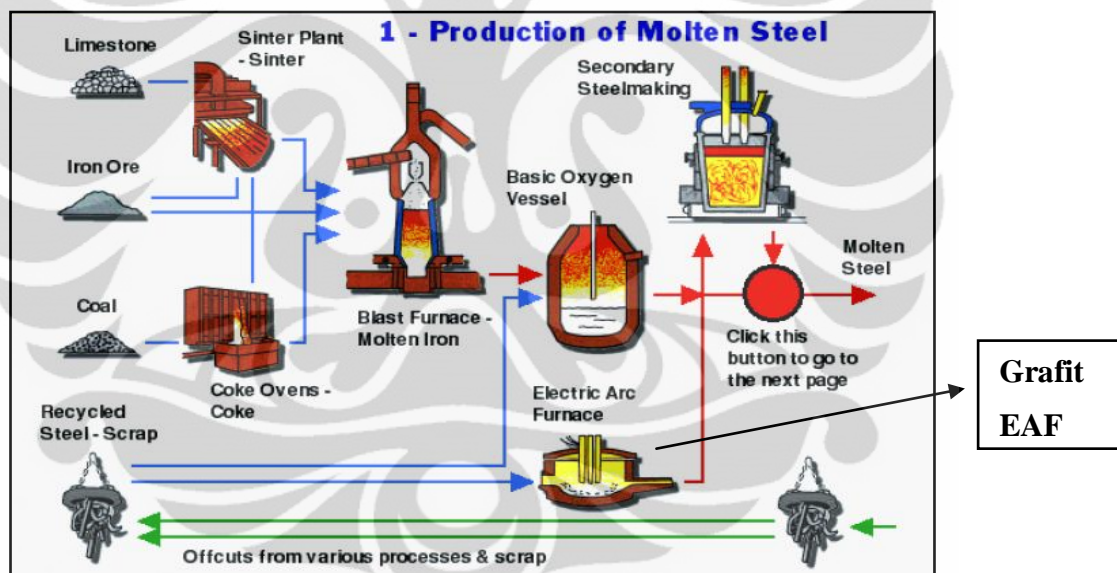
Katalis elektroda yang digunakan adalah platina yang berfungsi untuk mempercepat terjadinya reaksi sel baik pada anoda maupun katoda. Pelat bipolar grafit merupakan bagian dari struktur sistem sel tunam yang memiliki fungsi ganda, yaitu sebagai pengatur pendistribusian bahan bakar sel tunam yang menghantar elektron dari anoda ke katoda dan pengumpul arus listrik yang dihasilkan sistem sel tunam. Fungsi lain dari pelat bipolar ini adalah sebagai struktur penguat (*integrity*) susunan sel tunam<sup>[5]</sup>. Pada umumnya pelat bipolar ini terbuat dari material grafit dan logam seperti aluminium, baja, titanium, nikel dan lainnya dimana proses pencetakannya sangat rumit dan mahal.

PEMFC masih belum banyak digunakan dikarenakan memiliki banyak kendala, diantaranya adalah dalam proses menghasilkan hidrogen. Walaupun hidrogen merupakan unsur yang paling banyak terdapat di alam semesta namun keberadaannya terikat sebagai senyawa oksida. Maka untuk menghasilkan gas hidrogen murni diperlukan tenaga listrik yang sebagian besar dihasilkan dari sumber energi penyebab polusi.

Masalah lain yang akan timbul jika hidrogen digunakan sebagai bahan bakar adalah kebutuhan infrastruktur untuk pendistribusian hidrogen ke tempat penggunaannya. Sebagai alternatifnya yaitu dengan membangun tempat pengisian ulang bahan bakar beserta pembangkitnya sekaligus dan hal ini membutuhkan dana yang sangat besar. Kekurangan dalam hal biaya produksi juga masih menjadi

kendala. Seperti yang diketahui bahwa tinggi dan rendahnya biaya produksi juga dipengaruhi oleh penggunaan material dan proses fabrikasi dari produk tersebut. Oleh karena itu, pengurangan biaya produksi dari PEMFC dapat dilakukan dengan cara mengembangkan suatu material berupa komposit berbasis polimer untuk pelat bipolar.

Dalam penelitian ini, digunakan epoksi resin sebagai matriks, sedangkan grafit dan *carbon black* sebagai *reinforcement* atau penguat. Grafit yang digunakan berasal dari *Electric Arc Furnace* (EAF) atau elektroda dapur listrik limbah proses peleburan baja (Gambar 1.2). Grafit EAF ini dipilih dikarenakan harganya yang relatif murah dan mudah didapat. Selain itu dapat mengurangi limbah dari penggunaan grafit sebagai limbah sisa hasil produksi.



Gambar 1.2 Skema Proses Peleburan Baja<sup>[6]</sup>.

Sumber: <http://www.materials.qmul.ac.uk/indvisit/2003/>

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang muncul dari proses pembuatan pelat bipolar ini adalah sulitnya membuat pelat bipolar yang menghasilkan konduktivitas tinggi dan sifat mekanis yang baik. Penelitian ini dirancang untuk mendapatkan karakteristik pelat bipolar yang dapat dipakai dalam perangkat sel tunam dan diaplikasikan untuk

pemenuhan berbagai kebutuhan energi listrik. Agar pelat bipolar menghasilkan konduktivitas tinggi dan sifat mekanis yang baik, perlu diketahui komposisi yang tepat dari bahan dan modifikasi dalam proses pencampuran bahan tersebut.

Untuk mendapatkan sifat maksimum dari pembuatan pelat bipolar dengan menggunakan polimer matriks komposit, maka pertama kali harus diketahui komposisi yang tepat dari material yang digunakan. Baik epoksi sebagai matriks, maupun grafit EAF sebagai penguat harus diketahui komposisinya sehingga dapat memiliki interaksi yang baik. Dari interaksi yang baik ini memungkinkan dihasilkannya sifat mekanik yang baik. Penambahan *carbon black* (CB) sebagai *reinforcement* dalam penelitian ini juga dapat membantu tercapainya sifat konduktivitas yang baik.

Proses pencampuran dari setiap material harus dilakukan dengan baik. Untuk itu dilakukan variasi dalam waktu pencampuran selama 15-75 menit. Waktu pencampuran yang tepat akan menghasilkan campuran yang homogen dan distribusi merata. Sehingga nantinya dapat menghasilkan sifat mekanis yang baik dari pelat bipolar ini.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini secara khusus, antara lain:

1. Mengetahui pengaruh waktu pencampuran terhadap karakteristik pelat bipolar yang dihasilkan, setelah dilakukan beberapa pengujian, seperti konduktivitas listrik, densitas, porositas, dan fleksural.
2. Mendapatkan waktu yang optimum pada proses pencampuran grafit EAF dan *carbon black* terhadap karakteristik pelat bipolar.
3. Mengembangkan komposit material untuk pelat bipolar PEMFC yang memiliki nilai ekonomis yang tinggi dan karakteristik yang optimum.

### **1.4 Ruang Lingkup Penelitian**

Pada penelitian ini, perbandingan komposisi bahan penyusun yang digunakan dalam pembuatan pelat bipolar komposit, antara lain:

1. Polimer termoset (epoksi resin) yang digunakan sebesar 20% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit, dengan perbandingan resin epoksi:*hardener*, yaitu 1:1 (50%:50%).
2. Kandungan bahan penguat (*reinforcement*), berupa grafit EAF dan *carbon black* yang digunakan sebesar 80% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit, dengan perbandingan komposisi grafit EAF:*carbon black*, yaitu 19:1 (95%:5%).
3. Total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit adalah 144 gram.
4. Dalam penelitian ini besar partikel *carbon black* sebesar  $\leq 44 \mu\text{m}$  (325#) yang dicampurkan dengan grafit EAF dengan besar partikel  $\leq 44 \mu\text{m}$  (325#).
5. Pencampuran grafit EAF dan *carbon black*, dilakukan pada mesin *planetary ball mill* dengan variasi waktu selama 15, 30, 45, 60 dan 75 menit.
6. Pada proses *compression moulding* tekanan yang digunakan sebesar 55 MPa, pada temperatur 100°C selama 4 jam sehingga menghasilkan pelat bipolar yang siap uji.
7. Pengujian terhadap sampel yang telah dibuat dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan, antara lain pengujian konduktivitas listrik (ASTM B193), porositas (ASTM C20), densitas (ASTM D792), dan fleksural (ASTM D790).

## 1.5 Sistematika Penulisan

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

### **BAB 1: PENDAHULUAN**

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

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

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

**Universitas Indonesia**

**BAB 3: METODOLOGI PENELITIAN**

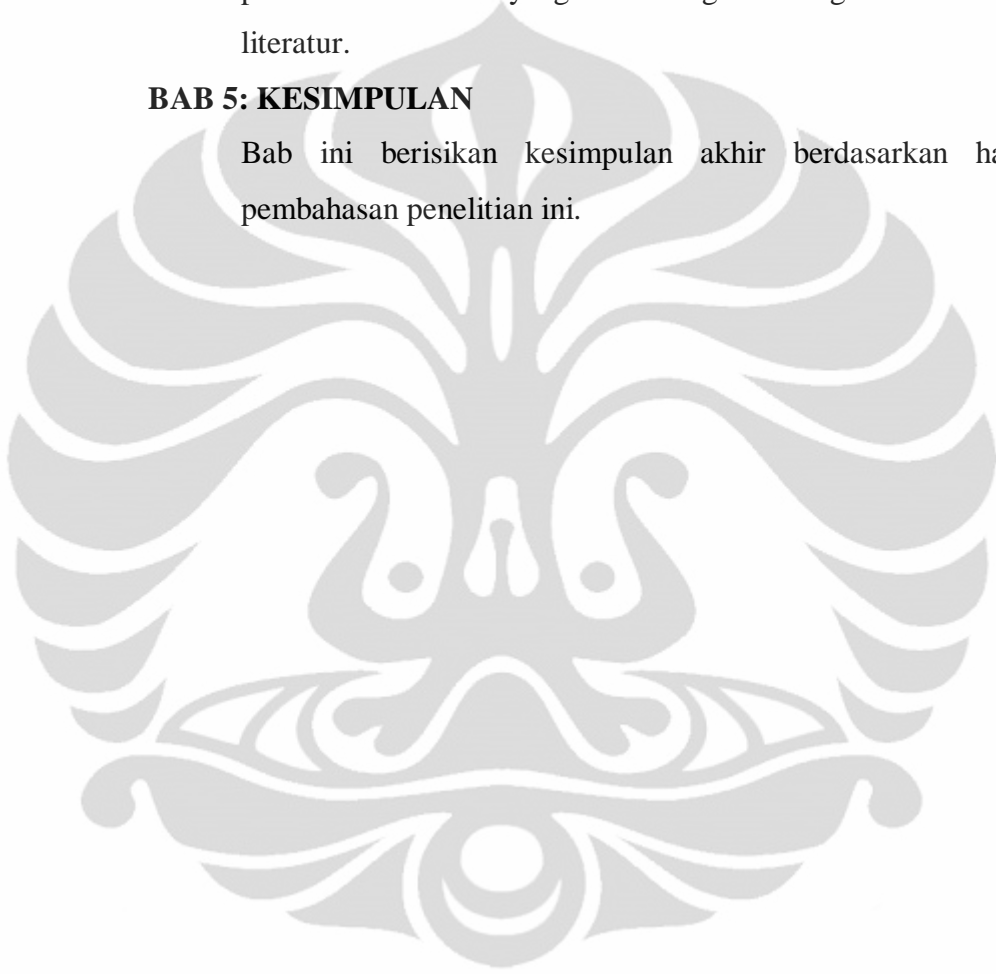
Bab ini berisi prosedur penelitian, serta daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

**BAB 4: HASIL DAN PEMBAHASAN**

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

**BAB 5: KESIMPULAN**

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



## BAB 2

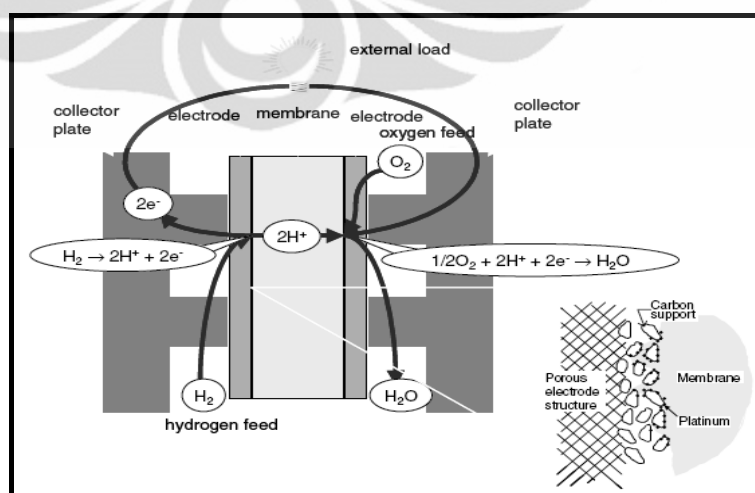
### TEORI PENUNJANG

#### 2.1 Sel Tunam

Sel Tunam adalah suatu alat yang mampu menghasilkan listrik arus searah, dimana alat ini mengkonversi energi secara elektrokimia dengan mengubah energi kimia (gas H<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub>) menjadi energi listrik sebagai hasil utama. Selain itu juga dihasilkan air (H<sub>2</sub>O) dan panas di dalam prosesnya sebagai hasil sampingan.

Pada prinsipnya, sel tunam hampir sama dengan baterai, dimana di dalam sistemnya sel tunam memiliki elektroda positif dan negatif atau disebut juga katoda dan anoda. Reaksi kimia yang menghasilkan listrik terjadi pada elektroda. Selain elektroda, pada satu unit sel tunam terdapat elektrolit yang akan membawa muatan-muatan listrik dari satu elektroda ke elektroda lain, serta katalis yang akan mempercepat reaksi di elektroda. Namun, dalam sel tunam tidak memerlukan sistem pengisian ulang, seperti yang dilakukan pada teknologi baterai dimana energi akan dihasilkan apabila bahan bakar terus diberikan<sup>[7]</sup>.

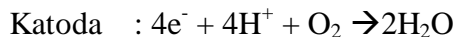
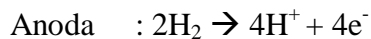
Umumnya yang membedakan jenis-jenis sel tunam adalah material elektrolit yang digunakan. Air serta panas yang dihasilkan setiap jenis sel tunam merupakan produk samping reaksi kimia yang terjadi di katoda dan anoda. Untuk memperjelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.1 di bawah ini.



Gambar 2.1 Operasi Dasar Sel Bahan Bakar<sup>[8]</sup>.

Sumber: *Fuel Cell Materials and Components*. (Sossina 2003)

Reaksi kimia yang terjadi pada sel tunam adalah sebagai berikut:



Pada sel tunam, bahan gas oksigen didapat dari udara sedang gas hidrogen dapat diperoleh dari reaksi *reformer* dari hidrokarbon. Gas hidrogen mempunyai kesulitan untuk disimpan dan ditransport karena molekul yang kecil sehingga sulit untuk dicairkan dan mudah terbakar. Usaha memperoleh hidrogen dengan mudah sedang diusahakan dengan berbagai cara misalnya memperkecil reaktor *reformer* dengan bahan baku LPG atau gas metana, menguraikan metanol yang dibuat dari pabrik besar tetapi dalam bentuk cair sehingga mudah untuk ditransport. Gas hidrogen dapat juga diperoleh dari metanol setelah diuraikan menjadi gas CO dan hidrogen, kemudian gas CO dioksidasi menjadi CO<sub>2</sub> dan air<sup>[9]</sup>.

Ion yang bermigrasi dapat sebagai hidrogen, oksigen atau hidroksida. Sedang elektrolit dapat berupa membran polimer, garam karbonat cair, lapisan oksida keramik, larutan alkali dan asam phospat. Elektroda biasanya terbuat dari logam platina atau nikel<sup>[10]</sup>.

Konversi energi sel tunam biasanya lebih efisien dari pada jenis pengubah energi lainnya. Berikut adalah beberapa kelemahan dan keunggulan dari Sel tunam yang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Kelebihan dan Kelemahan dari Sel tunam<sup>[11]</sup>.

Kelebihan	Kekurangan
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Efisiensi dapat mencapai 80%</li> <li>2. Mampu menyuplai energi listrik dalam waktu yang lama</li> <li>3. Dapat secara kontinu diisi bahan bakar (hidrogen) dan oksigen dari sumber luar, tidak seperti baterai yang hanya mampu mengandung material bahan bakar yang terbatas</li> <li>4. Ramah lingkungan karena tidak menimbulkan polutan</li> <li>5. Tidak bising</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Jika digunakan bahan bakar hidrogen, maka dibutuhkan tanki pengaman yang berdinding tebal dan memiliki katup pengaman. Selain itu diperlukan kompresor untuk memasukan ke dalam tanki.</li> <li>2. Jika yang dibawa adalah hidrogen cair, maka akan timbul kesulitan karena harus dipertahankan pada temperatur -253,15°C pada tekanan 10<sup>5</sup>Pa.</li> <li>3. Jika digunakan metanol sebagai pengganti hidrogen, maka dibutuhkan reformer. Tetapi efisiensi menjadi menurun.</li> <li>4. Temperatur yang cukup tinggi saat pengoperasian antara 60°-120°C.</li> </ol>

**Sumber:** [http://www.chem-is-try.org/artikel\\_kimia/kimia\\_fisika/sel-bahan-bakar-solusi-energi-masa-depan](http://www.chem-is-try.org/artikel_kimia/kimia_fisika/sel-bahan-bakar-solusi-energi-masa-depan).



### 2.1.1 Jenis-jenis Sel tunam

Sel tunam terbagi atas beberapa kategori berdasarkan kombinasi tipe bahan bakar dan oksidan, tipe elektrolit yang digunakan, temperatur operasi, dan lain-lain. Para peneliti terus mengembangkan teknologi sel tunam agar lebih efisien, ekonomis, dan mudah digunakan. Sampai saat ini, sel tunam telah dikelompokkan menjadi lima jenis sel berdasarkan elektrolit yang digunakan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2.** Jenis-jenis Sel tunam dan Karakteristiknya<sup>[9]</sup>.

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
<b>Elektrolit</b>	<i>Hydrated Polymeric Ion Exchange Membranes</i>	<i>Mobilized or Immobilized Potassium Hydroxide in asbestos matrix</i>	<i>Immobilized Liquid phosphoric Acid in SiC</i>	<i>Immobilized Liquid Molten Carbonate in LiAlO<sub>2</sub></i>	<i>Perovskites (Ceramics)</i>
<b>Elektroda</b>	Karbon	Logam transisi	Karbon	Nikel dan 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 polimer	Berbasis karbon	Berbasis grafit	Berbasis baja tahan karat	Keramik
<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>

**Sumber:** *Introduction to Fuel Cell Technology*. (Christ Raymen 2003).

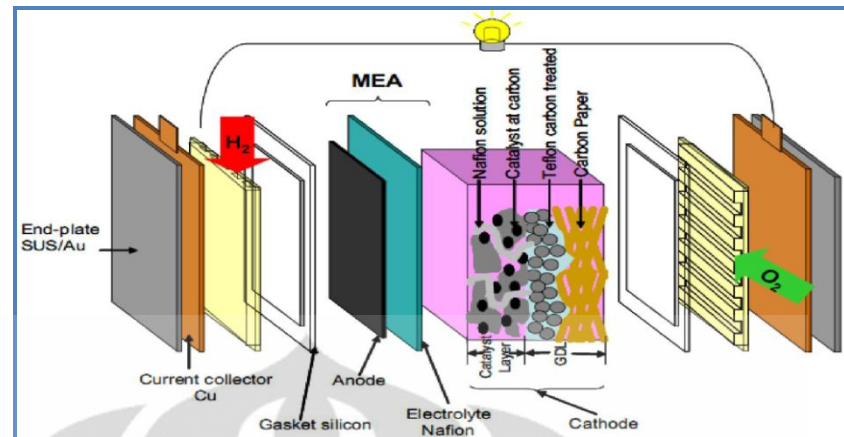
Adapun jenis sel tunam terbaru yang sudah cukup dikembangkan yaitu *Regenerative Fuel Cell*. Dengan menggunakan elektrolisa tenaga *solar cell*, maka bahan-bahan yang diperlukan oleh Sel tunam diambil dari air dengan cara mengubahnya menjadi hidrogen dan oksigen, yang selanjutnya dapat menghasilkan tenaga listrik, panas dan air. Air ini didaur ulang dengan proses yang sama<sup>[12]</sup>.

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

*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)* merupakan salah satu jenis sel tunam yang memiliki bahan dasar berupa polimer dengan fungsi sebagai alat konversi kimia yang mengubah gas hidrogen dan oksigen menjadi sumber energi listrik, panas, dan air. PEMFC ini menghasilkan energi listrik dengan nilai efisiensi yang sangat tinggi (> 50%) dan 100% bebas polusi<sup>[13]</sup>.

Penggunaan polimer sebagai membran padat pada komponen sel tunam, menyebabkan PEMFC digunakan untuk aplikasi yang relatif rendah ( $60^0 - 80^0$  C) dan memiliki ketahanan terhadap korosi yang lebih baik. Rendahnya suhu operasi ini menyebabkan rendahnya waktu pemanasan (*warm-up time*). Selain itu, PEMFC dapat memberikan densitas daya yang tinggi dan mempunyai kelebihan dalam hal berat dan volume dibandingkan dengan sel bahan bakar jenis lain. Dengan bobot yang ringan tersebut, PEMFC merupakan teknologi sel tunam yang memiliki prospek yang baik untuk aplikasi transportasi atau alat *portable* yang membutuhkan bobot yang ringan untuk meningkatkan efisiensinya.

Pengembangannya sebagai perangkat sistem energi alternatif dan terbarukan untuk menggantikan sumber energi fosil, fabrikasi PEMFC terdapat beberapa kendala seperti biaya tinggi dalam fabrikasinya, serta ukuran volum dan berat yang besar<sup>[14,15]</sup>. Satu perangkat PEMFC terdiri dari susunan pelat-pelat atau *fuel cell stack*<sup>[16]</sup>. Satu *fuel cell stack* tersebut terdiri dari gabungan antara dua pelat penutup monopolar (katoda dan anoda) dan pelat-pelat bipolar yang mengalirkan tunam berupa hidrogen dan oksigen untuk dialirkan ke sisi lain pelat seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Komponen Penyusun PEMFC<sup>[17]</sup>.

**Sumber:** <http://aulia09.myblogrepublika.com/pengembangan-nanokatalis-dan-nanokomposit-material-dalam-energi-alternatif-polymer-electrolyte-fuel-cell/>

Pada satu sisi pelat bipolar berperan sebagai tempat terjadinya reaksi anoda dan di sisi lain berperan sebagai tempat terjadinya reaksi katoda untuk sel berikutnya. Di antara pelat bipolar tersebut juga terdapat *Polymer Electrolyte Membrane* (PEM) yang dihubungkan oleh masing-masing pelat bipolar. Pada PEM tersebut terdapat *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang terdiri dari elektroda (anoda & katoda) serta satu elektrolit, *bipolar plate*, dan *end plate* pada bagian ujung. Fungsi dari masing-masing komponen tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3 dibawah ini.

**Tabel 2.3** Fungsi dan Material Komponen dalam PEMFC<sup>[18]</sup>.

Komponen	Material	Fungsi
<i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	Polimer solid terimpregnasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda. Kertas atau kain carbon berpori untuk lapisan difusi gas (GDL)	Terdiri dari 2 elektroda, 1 membran elektrolit, dan 2 GDL. Membran memisahkan (dengan pembatas gas) dan melepas proton dari anoda ke katoda. Lapisan katalis yang terdispersi pada elektroda memacu setiap setengah reaksi. GDL mendistribusikan gas secara merata ke katalis dimembran.
Pelat Bipolar	Grafit, SS, atau komposit polimer termoplastik	Mendistribusikan gas di bagian area aktif membran. Mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda, membuang air keluar sel
Pelat penutup	Material dengan kekuatan mekanik yang baik	Menyatukan rangkaian sel tunam
Penyimpanan arus	Logam dengan kontak elektrik dan konduktivitas yang baik	Menyimpan dan mentransfer arus listrik dari dalam ke luar sirkuit sel tunam

**Sumber:** *Bipolar plates for PEM Fuel Cells: A review.* (A.Herman Pages: 1297 – 1302). 2005.

Tegangan yang dihasilkan pada *single* sel tunam adalah 0.6 sampai 0.7 Volt<sup>[16]</sup>. Sehingga pada aplikasinya sel tunam dikombinasikan hingga terdiri dari beberapa *single* sel tunam menjadi sebuah tumpukan sel tunam yang membentuk struktur. Sehingga pelat bipolar mensuplai bahan bakar ke MEA pada setiap sel dan menghubungkan antar satu sel ke sel lainnya dalam satu struktur.

### 2.2.1 Prinsip Dasar PEMFC

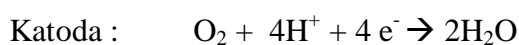
Prinsip dasar dari sistem PEMFC sangat sederhana, yaitu terjadinya reaksi oksidasi-reduksi dari dua sumber gas yang digunakan, hidrogen dan oksigen, yang akan bereaksi menghasilkan air dan pada saat yang bersamaan juga membangkitkan energi listrik dan panas<sup>[19]</sup>.

Reaksi terjadi di dalam struktur sel tunam (sel elektrokimia sederhana), yang terdiri dari dua elektroda (anoda dan katoda), yang dipisahkan oleh elektrolit, yakni material yang membolehkan ion untuk melaluinya. Pada prosesnya, gas hidrogen yang bertekanan masuk melalui sisi anoda. Molekul H<sub>2</sub> akan terpecah menjadi proton H<sup>+</sup> dan elektron (e<sup>-</sup>) setelah bersentuhan dengan kandungan platina pada katalis<sup>[20]</sup>. Reaksi elektrokimia setengah selnya sebagai berikut :



Proton H<sup>+</sup> tersebut bergerak menuju katoda dengan menembus membran tipis berpori yang dibantu oleh adanya medan listrik pada membran, sedangkan elektron yang terkonduksi di anoda akan keluar melalui *external wire* karena terhalang oleh membran menuju sisi katoda dari sel dan dipergunakan untuk menghasilkan energi listrik<sup>[21]</sup>.

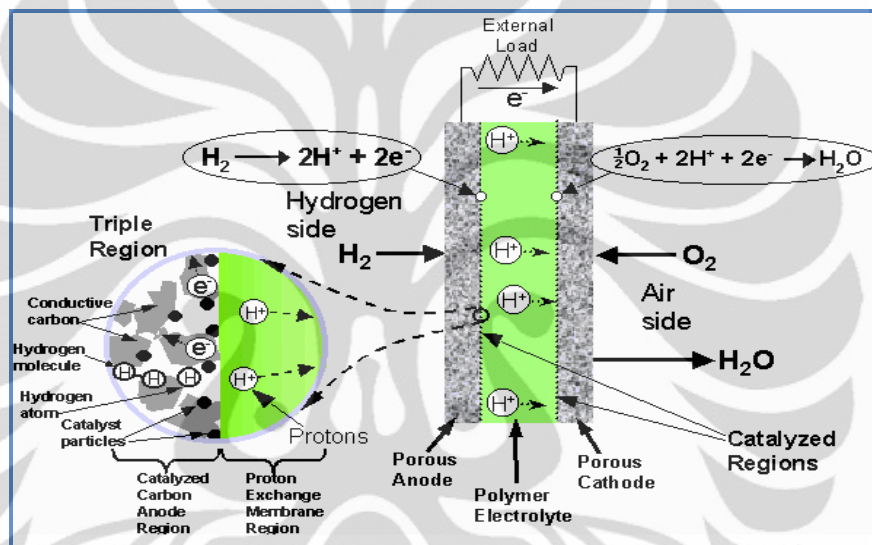
Sementara di sisi katoda, gas oksigen merupakan oksidan yang paling umum digunakan karena tingkat ketersediaan dan nilai keekonomian yang cukup baik. Gas tersebut akan dialirkan melalui katoda, masing-masing dari dua atom oksigen mempunyai sepasang elektron dan menarik dua ion H<sup>+</sup> melalui membran, sehingga akan bereaksi menghasilkan molekul air (H<sub>2</sub>O)<sup>[21]</sup>. Reaksi setengah selnya sebagai berikut :



Sehingga reaksi secara keseluruhan yang terjadi pada anoda dan katoda adalah sebagai berikut :



Reaksi ini dalam sel tunam tunggal hanya menghasilkan 0,6 – 0,7 V dari energi listrik dengan rapat arus 0,6 – 0,8 A/cm<sup>2</sup>, sehingga perlu dilakukan peningkatan dengan mengkombinasikan komponen-komponen sel membentuk suatu tumpukan sel tunam<sup>[16,20]</sup>. Mekanisme prosesnya dapat dilihat pada Gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Mekanisme *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*<sup>[22]</sup>.

Sumber: [http://www.thirdorbitpower.com/PEM\\_mechanism.html](http://www.thirdorbitpower.com/PEM_mechanism.html).

### 2.2.2 Pelat Bipolar

Pelat bipolar adalah komponen kunci dari PEMFC dengan sifat yang multifungsional<sup>[18]</sup>. Hal tersebut dikarenakan pelat bipolar memiliki fungsi ganda, yakni mengalirkan gas dan udara secara seragam ke lapisan difusi gas melalui *flow channel* dan mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda<sup>[7]</sup>. Selain itu, pelat ini berfungsi menghilangkan panas dari daerah aktif dan mencegah kebocoran dari gas dan pendingin<sup>[18]</sup>. Pelat ini juga seringkali dilengkapi dengan saluran pendingin sebagai penjaga temperatur. Pelat bipolar dibuat dari material yang memiliki konduktivitas listrik baik dan tidak dapat dilewati oleh gas. Dapat berlaku sebagai pengumpul arus, dan mampu menopang struktur dari PEMFC.

Material pelat bipolar yang mampu mengurangi berat sel tunam serta memiliki nilai konduktivitas dan sifat mekanik yang baik yang sangat diperlukan pada saat ini. Komposit bermatriks polimer sudah banyak diteliti oleh berbagai pihak untuk digunakan. Penelitian ini mengacu kepada kriteria pelat bipolar yang sesuai standar DOE yaitu :

**Tabel 2.4** Kriteria Pelat Bipolar Sesuai Standar DOE <sup>[23]</sup>.

Parameter	Nilai standar
Resistivitas	$< 0.01\Omega\text{cm}^2$
Konduktivitas	Setinggi mungkin ( $> 100 \text{ S/cm}$ )
<i>Permeability gas</i>	$< 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s cm}^2$
Ketahanan Korosi	$0.016\text{mA}/\text{cm}^2$
Densitas	$< 5 \text{ gr}/\text{cm}^3$
Kekuatan Flexural	$> 22 \text{ lb}/\text{in}^2$
Material Cost	\$4/kW
<i>Manufactured Cost</i>	$< \$ 10 /\text{kW}$
<i>Interfaceial Contact Resistant (ICR)</i>	$140 \text{ N}/\text{cm}^2 = 20\text{m}\Omega \text{ cm}^2$

**Sumber:** *Review and Analysis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing*. (V.Metha 2003: page 114,32-53).

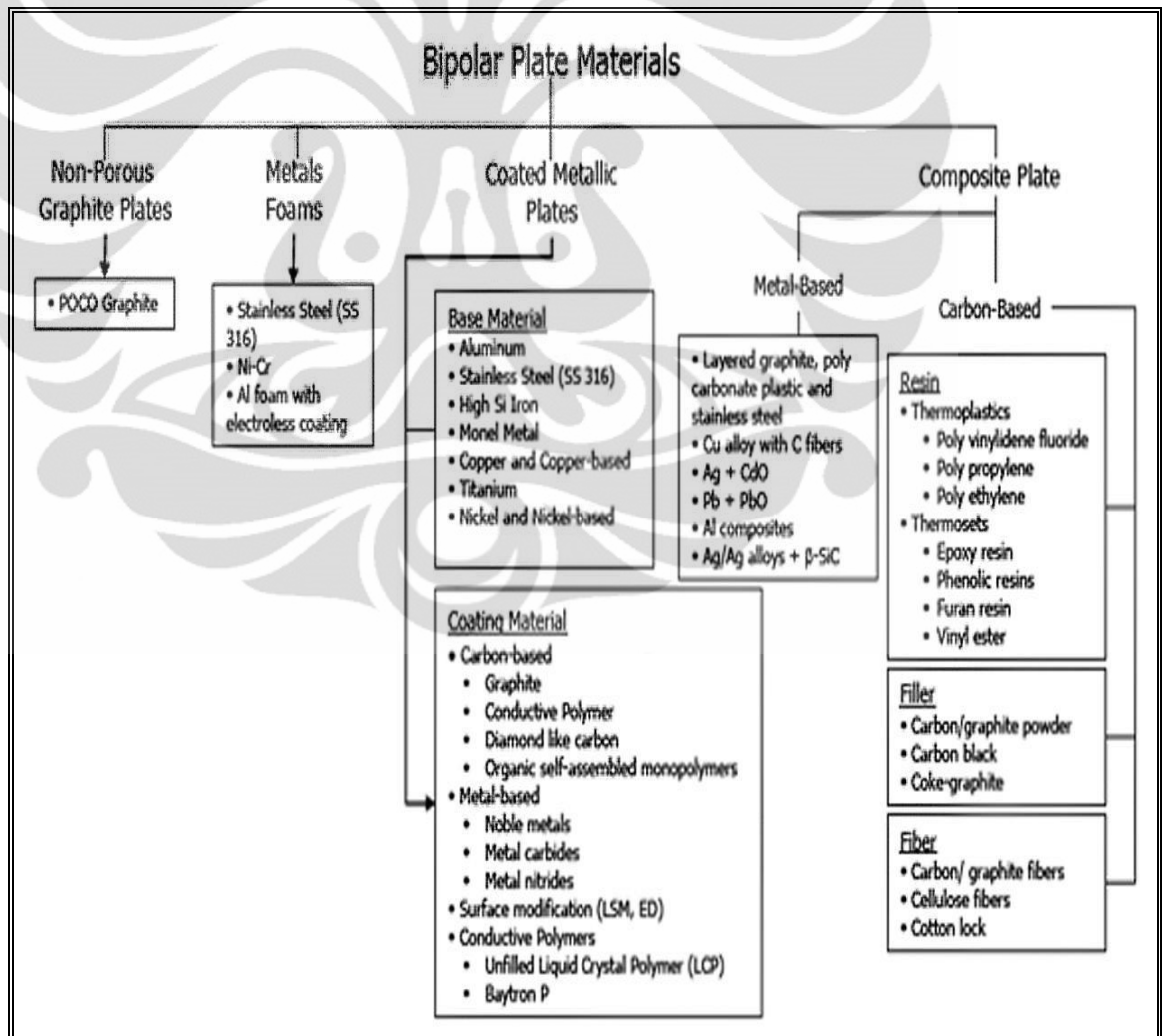
Pelat Bipolar merupakan komponen utama dalam satu unit PEMFC dengan berbagai macam fungsi. Pelat Bipolar harus dibuat setipis dan seringan mungkin, ekonomis, dan mudah dibentuk serta di-*machining*<sup>[24]</sup>. Juga harus mempunyai kestabilan thermal dan sifat mekanis yang baik, karena fungsi utamanya untuk menghubungkan sel-sel secara elektrik dan menyalurkan gas pada sel tunam.

Pada permukaan pelat bipolar terdapat saluran-saluran yang dibuat sebagai jalur untuk gas reaktan (*gas flow channels*), dimana jalur-jalur tersebut dapat mempengaruhi karakteristik akhir dari sel tunam yang digunakan<sup>[25]</sup>. Berdasarkan penjelasan mengenai pelat bipolar sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa pelat bipolar didalam PEMFC memiliki fungsi sebagai berikut <sup>[23,26]</sup>:

- a) Mengumpulkan dan mentransport elektron dari anoda dan katoda
- b) Memisahkan gas oksidan dan bahan bakar

- c) Menyediakan kekuatan mekanik dan kekakuan pada membran dan elektroda pada saat pembebanan ketika proses fabrikasi
- d) Mempunyai konduktivitas panas untuk membantu mengurangi panas dari elektroda ke bagian pendingin
- e) Menghubungkan masing-masing individual sel tunam membentuk suatu kesatuan
- f) Menyediakan aliran transport gas diseluruh area elektroda

Seperti pada skematik dibawah ini, pelat bipolar dapat dibuat dengan beberapa macam bahan dasar diantaranya adalah non-logam, logam dan komposit. Berikut ini adalah penjelasan mengenai bahan dasar penyusun pelat bipolar tersebut :



**Gambar 2.4** Material Penyusun Pelat Bipolar Pada Umumnya<sup>[23]</sup>.

**Sumber:** *Review and Analysis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing.* (V.Metha 2003: page 114,32-53).

Masing-masing material yang digunakan sebagai pelat bipolar didasarkan atas aplikasi apa yang akan digunakan. Setiap material memiliki keuntungan dan kerugian masing-masing, maka dari itu penggunaan material yang tepat sebagai pelat bipolar perlu diperhatikan agar penggunaan sel tunam sebagai energi penghasil listrik alternatif dapat lebih ekonomis dan efisien. Berikut adalah keuntungan dan kerugian dari masing-masing material pada pelat bipolar:

**Tabel 2.5** Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Beberapa Material sebagai Pelat Bipolar<sup>[27]</sup>.

Material	Keuntungan	Kerugian
Grafit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ketahanan terhadap korosi yang sangat baik</li> <li>- Resistivitas yang tinggi</li> <li>- Resistansi kontak rendah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sifat mekanik yang buruk (getas)</li> <li>- Porositas</li> <li>- Volume dan berat besar</li> <li>- Biaya produksi mahal</li> </ul>
Komposit karbon – karbon	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Densitas rendah</li> <li>- Ketahanan terhadap korosi baik</li> <li>- Resistansi kontak rendah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kekuatan mekanik rendah</li> <li>- Konduktivitas listrik rendah</li> <li>- Harga tinggi</li> </ul>
Komposit karbon – polimer	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biaya rendah</li> <li>- Ketahanan terhadap korosi cukup baik</li> <li>- Bobotnya ringan</li> <li>- Tidak menggunakan proses permesinan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kekuatan mekanik rendah</li> <li>- Konduktivitas listrik rendah</li> </ul>
Logam	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konduktivitas listrik baik</li> <li>- Konduktivitas panas baik</li> <li>- Biaya produksi cukup rendah</li> <li>- Memiliki sifat mekanik yang baik</li> <li>- Proses fabrikasi yang mudah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Terjadi korosi pada membran yang menghasilkan oksida pada permukaan</li> </ul>

**Sumber:** *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells - From Materials to Processing*. (Xiao zi yuan, 2006)

### 2.2.2.1 Pelat Bipolar Berbasis Grafit

Pelat bipolar yang banyak digunakan pada sistem PEMFC adalah pelat dengan material utama grafit yang dapat menghasilkan konduktivitas listrik yang baik, tahan terhadap korosi dan memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan pelat logam<sup>[20]</sup>. Namun, sifat mekanik yang dihasilkan buruk, karena pelat ini sangat getas dan berpori. Akibatnya, pelat ini membutuhkan suatu proses pengerjaan lebih lanjut sehingga akan menaikkan biaya produksi.

Selain itu, karena sifatnya yang getas, pelat bipolar harus lebih tebal agar menghasilkan kekuatan mekanis yang cukup ketika dilakukan proses pengerjaan



pelat dan perakitan sel bahan bakar. Maka dari itu, berat dan volume dari pelat bipolar grafit menjadi lebih besar sehingga susunan sel yang dihasilkan pun menjadi lebih berat. Hal ini akan meningkatkan biaya produksi dari pelat (sekitar > US\$10/pelat) sehingga menjadi pertimbangan dalam penggunaannya pada transportasi<sup>[7]</sup>.

#### 2.2.2.2 Pelat Bipolar Berbasis Komposit

Jenis pelat ini dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu komposit berbasis logam dan karbon. Biasanya, pelat bipolar dengan material komposit logam menggunakan grafit berpori, plastik polikarbonat, dan *stainless steel*. Sedangkan pada komposit berbasis karbon biasa digunakan penguat berupa polimer baik *thermoplastic* seperti *polypropylene*, maupun *polyethylene* maupun *thermoset* seperti *epoxy resin*, *phenolic resin*, maupun vinil ester. Selain itu, pada komposit karbon biasa ditambahkan bahan pengisi (*filler*) maupun fiber guna meningkatkan sifat dari pelat bipolar ini<sup>[7]</sup>.

Dalam penggunaannya di berbagai aplikasi, pelat bipolar sangat banyak diminati karena pelat ini mampu menggabungkan kelebihan dari dua sifat material yang berbeda dan meminimalkan kerugian dari material tersebut sehingga sampai saat ini pengembangan material komposit untuk komponen pelat bipolar terus dilakukan guna untuk mendapatkan sifat material yang baik dan memenuhi persyaratan dari pelat bipolar. Adapun sifat-sifat yang dihasilkan dari pelat bipolar komposit, antara lain :

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

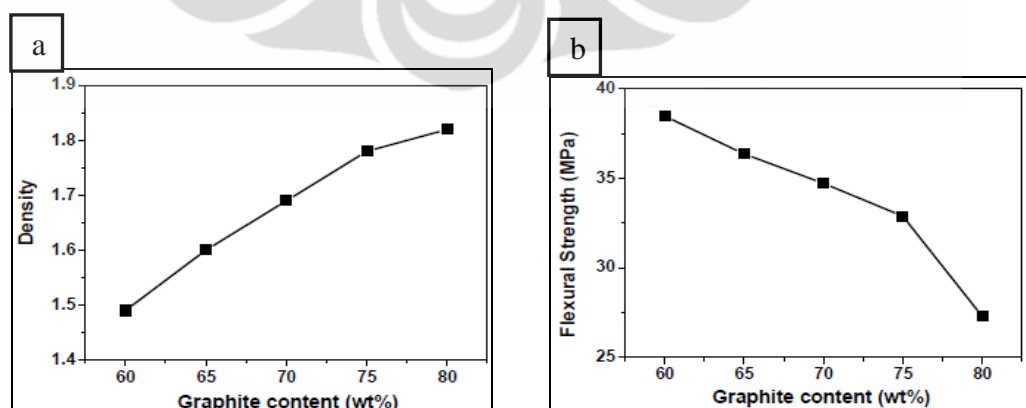
Meskipun, pelat bipolar komposit karbon memiliki banyak kelebihan dibandingkan pelat bipolar berbahan dasar grafit atau logam, namun material komposit polimer memiliki kendala, yaitu konduktivitas yang dihasilkan tidak mencapai standar pelat bipolar (sekitar 10 S/cm), karena kebanyakan polimer memiliki konduktivitas yang rendah<sup>[7]</sup>. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu bahan tambahan guna meningkatkan konduktivitas dari pelat dan biasanya adalah karbon, baik yang berbentuk grafit, serat karbon, maupun *carbon black*. Perbandingan nilai konduktivitas dari material pelat bipolar dapat dilihat pada Tabel 2.6 di bawah ini.

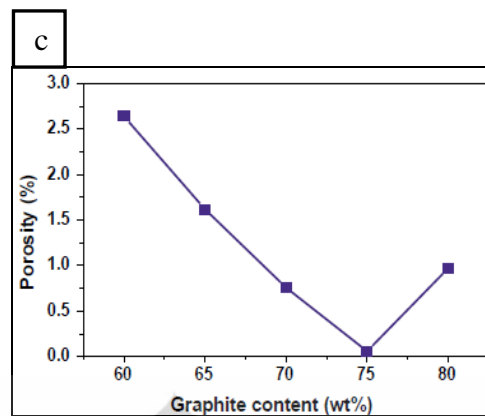
**Tabel 2.6.** Perbandingan nilai konduktivitas dari material pelat bipolar<sup>[28]</sup>.

Material	Konduktivitas (S/cm)
Polimer	~1
Grafit	10 <sup>3</sup>
Komposit polimer/grafit	10

**Sumber:** *Fuel Cells Fundamentals The Materials Science of Renewable Energy*. Parsons Corporation . 2006. “Telah diolah kembali”

Namun, penambahan dari karbon ini harus dibatasi, sekitar 50 – 80% karena apabila kandungannya terlalu banyak, maka akan menurunkan sifat mekanis dari pelat bipolar, baik kekuatan fleksural, densitas maupun prositas, dan juga akan mempersulit ketika dilakukan proses pencetakan<sup>[28,29]</sup>. Dapat dilihat pada Gambar 2.5 di bawah ini.





**Gambar 2.5** Pengaruh jumlah grafit terhadap (a) densitas, (b) kekuatan tekan dan (c) porositas<sup>[29]</sup>.

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

### 2.3 Material Penyusun Pelat Bipolar Polimer-karbon komposit

Material penyusun pelat bipolar perlu banyak mendapat perhatian karena sifat dan karakteristik dari pelat bipolar yang dihasilkan bergantung pada material yang digunakan. Dalam penelitian ini, material utama yang digunakan adalah resin epoksi, grafit EAF, dan *carbon black*.

#### 2.3.1 Resin Epoksi

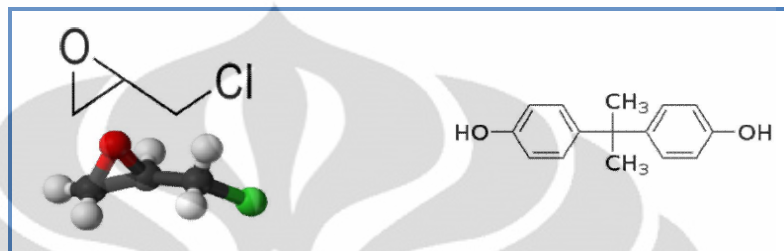
##### 2.3.1.1 Umum

Epoksi merupakan salah satu jenis termoset yang tidak dapat menerima siklus pemanasan dan pendinginan secara kontinu, seperti jenis termoplastik. Ketika dipanaskan pada tahap awal, polimer ini akan melunak dan mampu mengalir di dalam cetakan. Tapi pada temperatur yang tinggi, epoksi akan mengalami reaksi kimia sehingga menjadi keras dan tidak mampu kembali ke bentuk semula dan jika dipanaskan ulang, epoksi tidak mampu melunak kembali melainkan akan terdegradasi<sup>[30]</sup>.

##### 2.3.1.2 Sifat dan Struktur

Polimer termoset umumnya terdiri dari dua konstituen penyusun yaitu resin dan *curing agent (hardener)* yang jika dicampurkan akan terjadi reaksi polimerisasi pada temperatur ruang. Hasil reaksi ini akan membentuk matriks *cross-linked* dengan kekuatan tinggi dan kekuatan adhesi yang baik. Sementara *hardener* adalah suatu senyawa reaktif *aliphatic amine* yang mempunyai sifat

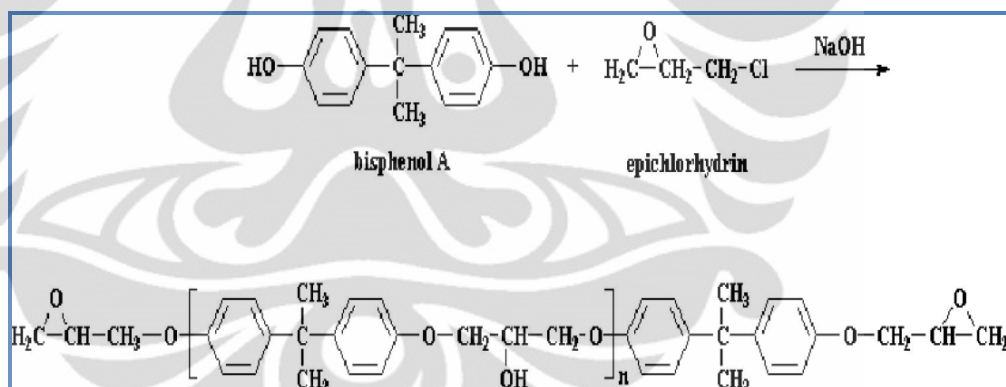
*curing time* yang cepat bila direaksikan pada temperatur ruang. Resin epoksi yang paling umum digunakan adalah hasil reaksi antara *epichlorhydrin* dan *bisphenol A* (Gambar 2.6). Aplikasi yang paling umum untuk material epoksi adalah untuk *coating*, *adhesive* dan material komposit dengan penguat *carbon fiber* dan fiberglass.



**Gambar 2.6** Struktur *Epichlorhydrin* dan *Bisphenol A*<sup>[31]</sup>.

Sumber: <http://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy>

Reaksi pembentukan epoksi dapat dilihat pada Gambar 2.7 di bawah ini.



**Gambar 2.7** Reaksi Pembentukan Epoksi<sup>[22]</sup>.

Sumber: [http://www.thirdorbitpower.com/PEM\\_mechanism.html](http://www.thirdorbitpower.com/PEM_mechanism.html)

Disamping kelebihan-kelebihan yang disebutkan diatas, resin epoksi juga mempunyai kekurangan. Walaupun sifat mekanik cukup baik pada saat reaksi *curing*, tetapi akan memberikan nilai elongasi yang buruk (kurang tangguh), serta umur dan daya pakai yang cukup pendek jika digunakan pada temperatur ruang. Berikut ini merupakan beberapa keunggulan dan kekurangan polimer jenis resin epoksi ini dapat dilihat pada Tabel 2.7 di bawah ini dibawah ini:

**Tabel 2.7** Keunggulan dan Kelemahan Epoksi Resin<sup>[32]</sup>.

Keunggulan	Kelemahan
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mampu mengikat dengan gaya adhesi antara karbon dengan resin secara baik</li> <li>2. Kemungkinan terjadinya penyusutan selama polimerisasi sangat kecil</li> <li>3. Ketahanan terhadap reaksi kimia sangat baik.</li> <li>4. Kekuatan tinggi dan fleksibilitas yang rendah</li> <li>5. Ketahanan terhadap creep dan fatigue bagus</li> <li>6. Sifat elektriknya baik</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Berbahaya karena mengandung racun kimia</li> <li>2. Daya penyerapan terhadap air sangat tinggi</li> <li>3. Sulit untuk menggabungkan antara kekuatan dan ketahanan terhadap suhu tinggi</li> <li>4. Polimerisasinya lambat</li> </ol>

**Sumber:** *Modern plastics handbook 200 modern plastics handbook 2000*. USA. 2000.

Pada pembuatan pelat bipolar dengan material komposit berbasis karbon, epoksi dapat digunakan sebagai matriks. Hal ini dikarenakan epoksi memiliki daya isi dan menjadi penguat yang baik pada sistem komposit. Selain itu reaksi yang terjadi antara epoksi resin dengan unsur lain tidak memerlukan daya pembasahaan yang besar sehingga proses pencampuran menjadi lebih sederhana.

Pada komponen pelat bipolar, resin epoksi dicampurkan dengan dengan tujuan untuk menghasilkan reaksi kuat dan mempunyai sifat mekanis yang baik, dengan reaksi yang dapat dilihat pada Gambar 2.6. Umumnya, panas akan menghasilkan polimer kimia yang baik dibandingkan dengan *curing* sehingga diperoleh polimer yang proses *curing* yang dilakukan dengan pemberian dengan ketahanan terhadap panas proses *curing* pada temperatur ruang *hardener* dan bahan<sup>[22]</sup>.

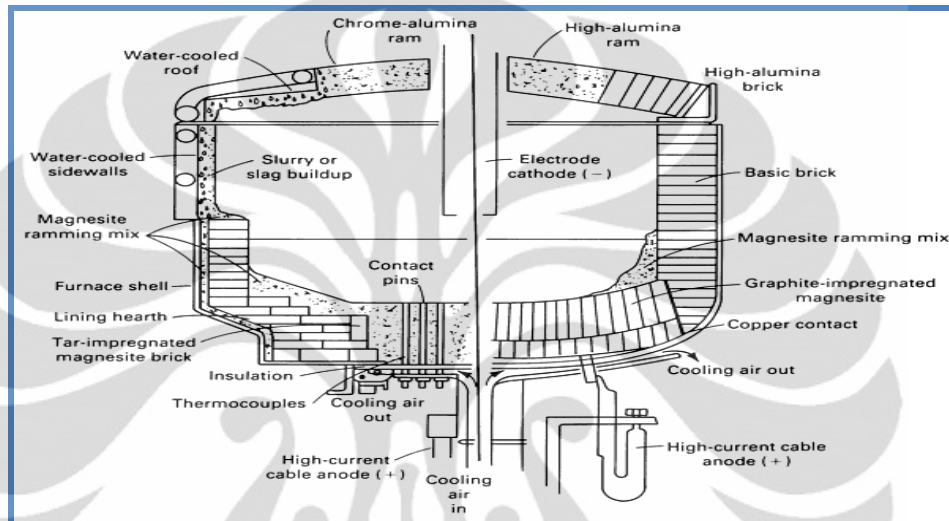
### 2.3.2 Grafit EAF

#### 2.3.2.1 Umum

Grafit adalah mineral yang dapat berasal dari batuan beku, sedimen, dan metamorf. Secara kimia, grafit sama dengan intan karena keduanya berkomposisi karbon, yang membedakannya adalah sifat fisik. Intan dikenal sangat keras, langka, dan transparan, sedangkan grafit agak lunak, mudah ditemukan, dan opak. Grafit alami terbentuk akibat tekanan dan panas yang tinggi dari dalam bumi, sedangkan grafit sintesis terbentuk secara mekanis, dimana grafit ini memiliki kekuatan mekanik yang tinggi dan mengandung sedikit abu.

Pada proses peleburan bahan baku pembuatan baja, khususnya dengan menggunakan dapur busur listrik seperti yang terlihat pada Gambar 2.8,

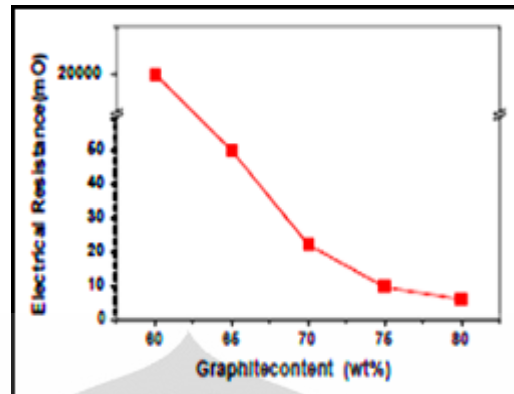
dibutuhkan suatu elektroda yang berfungsi untuk mengalirkan arus yang besar, sehingga dapat melebur besi spons (*sponge iron*) dan besi tua (*scrap*) sebagai bahan baku utama pembuatan besi dan baja. Oleh karena itu, grafit yang memiliki nilai konduktivitas listrik yang tinggi dipilih sebagai material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



**Gambar 2.8.** Proses Peleburan Bahan Baku Pembuatan Baja pada Dapur Busur Listrik<sup>[33]</sup>.

**Sumber:** *Casting*. ASM Metals Handbook Vol. 15. 9<sup>th</sup> ed.2001.

Selain sebagai elektroda, grafit EAF dapat pula difungsikan sebagai konstituen dalam pembuatan material komposit. Salah satunya adalah sebagai bahan penguat pada pelat bipolar polimer-karbon komposit. Grafit EAF dapat mengurangi resistansi listrik dari pelat bipolar komposit, selain itu grafit EAF dapat meningkatkan koefisien friksi, serta meningkatkan konduktivitas termal<sup>[34]</sup>. Pengaruh penambahan grafit terhadap resistansi listrik dari pelat bipolar dapat dilihat pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9.** Pengaruh Penambahan Grafit terhadap Resistansi Listrik<sup>[24]</sup>.

**Sumber:** *Preparation, Electrical, Mechanical, and Thermal Properties of Composite Bipolar plate for a Fuel Cell.* (Hsu-Chiang Kuan, 2004).

Selain itu, penambahan grafit akan mampu meningkatkan *machinability* dari material komposit karena fungsinya yang baik sebagai pelumas padat. Kesemuanya dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk partikel grafit yang digunakan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.8 berikut ini.

**Tabel 2.8.** Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel dari Grafit<sup>[35]</sup>.

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

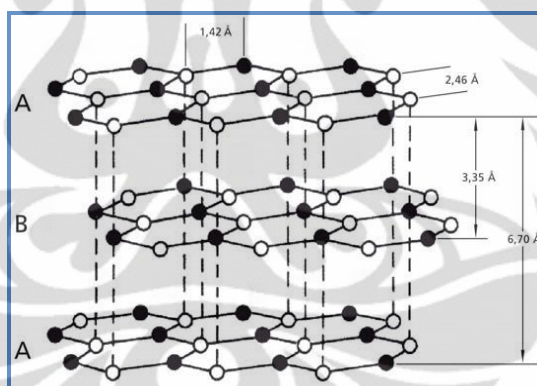
**Sumber:** *Influence of Graphite Particle Size and Its Shape on Performance of Carbon Composite Bipolar Plate.* (zhang-jie, 2005).

Ukuran, arah, dan bentuk dari partikel grafit yang digunakan akan mempengaruhi sifat dari komposit yang dihasilkan, terutama konduktivitas listrik. Grafit yang memiliki arah orientasi partikel yang tegak lurus terhadap arah penekanan pada saat pencetakan akan memiliki nilai konduktivitas yang lebih baik dibandingkan dengan arah orientasi yang sejajar dengan arah penekanan. Selain itu, kekuatan fleksural dari grafit yang berbentuk partikel lebih baik daripada grafit dengan bentuk serpih (*flake*), karena tegangan yang diterima oleh

grafit akan tersebar merata di seluruh permukaannya, sehingga regangan yang terjadi akan semakin kecil.

### 2.3.2.2 Sifat dan Struktur

Grafrit berstruktur lapisan yang terdiri atas cincin atom karbon beranggotakan 6 yang mirip cincin benzen yang terkondensasi tanpa atom hidrogen (Gambar 2.10). Jarak karbon-karbon dalam lapisan adalah 142 pm dan ikatannya memiliki karakter ikatan rangkap analog dengan senyawa aromatik. Karena jarak antar lapisan adalah 335 pm dan lapis-lapis tersebut diikat oleh ikatan yang relatif lemah yakni gaya van der Waals, lapisan-lapisan ini dengan mudah akan saling menggelincir bila dikenai gaya. Hal inilah yang merupakan asal mula sifat pelumasan grafit. Berbagai molekul, seperti logam alkali, halogen, halida logam, dan senyawa organik dapat menginterkalasi lapisan grafit dan membentuk senyawa interkalasi<sup>[36]</sup>.



Gambar 2.10 Struktur Kristal Grafit<sup>[37]</sup>.

Sumber: <http://seftianandriasandi.wordpress.com/2011/03/08/unsur-golongan-utama-periode-2-dan-3-dan-senyawanya/>

Grafrit memiliki sifat yang unik, dimana sifatnya merupakan gabungan sifat material logam dan nonlogam. Grafrit bersifat fleksibel, tetapi tidak elastis, grafit juga memiliki konduktivitas termal dan listrik yang baik, serta dapat bersifat refraktori dan tidak mudah bereaksi secara kimia. Grafrit memiliki kemampuan adsorpsi yang rendah terhadap *x-ray* dan *neutron*, sehingga dapat digunakan dalam aplikasi nuklir.

Pada aplikasinya sebagai pelat bipolar, grafit mampu memberikan konduktivitas listrik yang baik dan juga dapat meningkatkan sifat mekanis dari



komposit tersebut. Selain itu, penambahan grafit juga mampu meningkatkan kemampuprosesan dari material komposit karena sifatnya yang baik sebagai pelumas padat<sup>[38]</sup>. Hal tersebut mampu memberikan performa yang baik dan stabil dalam aplikasi sebagai pelat bipolar. Beberapa sifat umum dari grafit dapat dilihat pada Lampiran 7.

Dengan penggunaan grafit limbah hasil proses peleburan baja ini, dapat mengurangi biaya produksi dari pelat bipolar dan sebagai langkah untuk pemanfaatan limbah.

### **2.3.3 Carbon Black**

#### **2.3.3.1 Umum**

*Carbon black* adalah bahan yang dihasilkan oleh pembakaran tidak sempurna dari produk berat minyak bumi seperti FCC tar, *coal tar*, *ethylene cracking tar*, dan sejumlah kecil dari minyak sayur. *Carbon black* memiliki struktur molekul amorphous dan memiliki rasio luas permukaan dan volume yang tinggi, meskipun rasionya masih lebih rendah dibandingkan dengan karbon aktif. *Carbon black* biasanya digunakan sebagai pigmen dan penguat pada karet atau produk plastik.

Penggunaan *carbon black* secara umum adalah sebagai bahan pengisi yang bertujuan untuk meningkatkan stabilitas dimensi, menaikkan konduktivitas, penstabil terhadap radiasi sinar ultraviolet, sebagai zat antioksidan untuk meningkatkan umur pakai dari suatu polimer, dan sebagai pigmen pewarna.

#### **2.3.3.2 Sifat/Struktur**

*Carbon black* dikarakterisasi berdasarkan sifat utama, yakni ukuran partikel (luas permukaan), dan struktur dari *carbon black*. Umumnya, sifat *carbon black* berhubungan dengan proses pelarutan yang bergantung pada ukuran dan struktur partikel<sup>[39]</sup>.

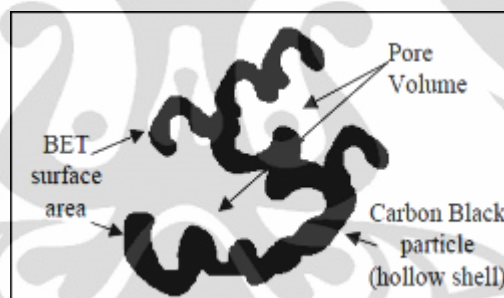
##### **a. Ukuran Partikel/Luas permukaan**

Ukuran dan komposisi dari partikel *carbon black* perlu diperhatikan. Ukuran partikel utama dari *carbon black* akan menentukan derajat

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

#### b. Struktur

Struktur *carbon black* mirip dengan struktur grafit yang acak. Ikatan antar atom didalam strukturnya dibentuk oleh ikatan van der Waals. Dimana, setiap atom karbon dan radikal bebas bereaksi membentuk suatu lapisan dan tersusun menjadi struktur kristal heksagonal. *Carbon black* memiliki pori dapat dilihat pada Gambar 2.11 di bawah ini.

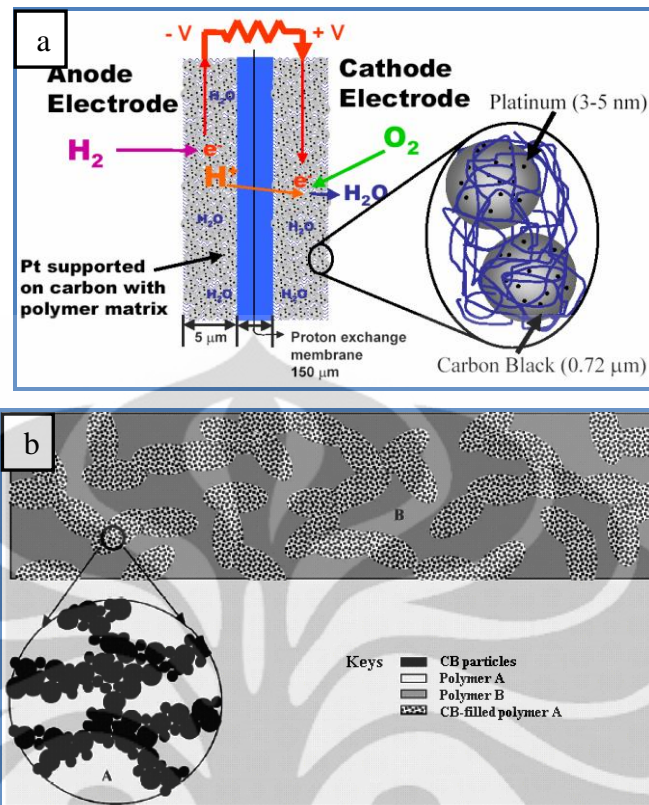


Gambar 2.11. Ilustrasi dari Struktur *Carbon Black* <sup>[40]</sup>.

**Sumber:** *Dissertation: Development and Modeling of Thermally Conductive Polymer/Carbon Composites*. Bachelor of Science, Michigan Technological University, 1999.

Struktur *carbon black* yang besar akan lebih mudah terdispersi daripada struktur yang kecil. Struktur yang lebih besar menunjukkan bidang terpadat yang rendah, sehingga akan menyediakan ruang yang lebih besar bagi resin polimer ketika dicampurkan untuk mengisi bidang kosong dari karbon dan membentuk ikatan kimia yang baik. Struktur partikel yang lebih besar juga penting dalam pencapaian konduktivitas listrik yang tinggi<sup>[41]</sup>.

Pada sistem komposit, *carbon black* akan mengikat polimer dan membentuk jaringan antar karbon, seperti terlihat pada Gambar 2.12, sehingga dapat dengan mudah mengalirkan arus listrik dan mengurangi efek isolator dari polimer.

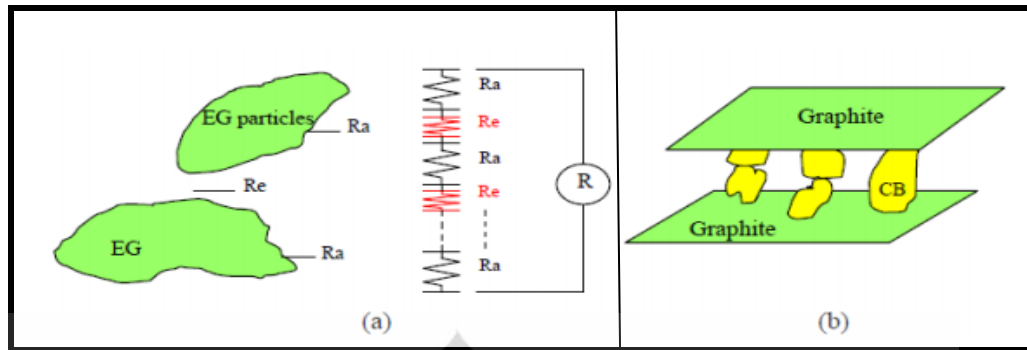


**Gambar 2.12** Carbon Black pada : (a)Elektroda, (b) Polimer<sup>[27]</sup>.

**Sumber:** *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells - From Materials to Processing*. (Xiao zi yuan, 2006)

Penambahan *carbon black* yang terlalu banyak akan menurunkan sifat mekanis dari pelat bipolar, karena *carbon black* memiliki struktur yang berpori sehingga beban yang diterima oleh pelat menjadi berkurang, serta densitas yang dihasilkan juga akan meningkat.

Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.12, resistansi total dari pelat bipolar komposit terutama berasal dari resistansi pada daerah antar agregat,  $R_e^{[20]}$ . Oleh karena itu, kehadiran partikel carbon black memberikan hubungan tambahan antar lapisan grafit, yang kemudian akan mengurangi nilai  $R_e$ . Perlu diperhatikan pula bahwa carbon black dapat secara efisien meningkatkan nilai konduktivitas listrik dengan penambahan yang minimum karena partikel tersebut memiliki struktur yang bulat dan bercabang, dengan luas permukaan yang tinggi dan ukuran partikel yang kecil.

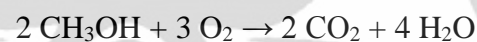


**Gambar 2.13.** Ilustrasi Skematik dari (a) Bagaimana Beragam Resistansi Terjadi yang Didefinisikan dengan Keseluruhan Resistansi, R; (b) Partikel *Carbon Black* Ditempatkan di antara Lapisan Grafit untuk Mengurangi Nilai  $Re$ <sup>[20]</sup>

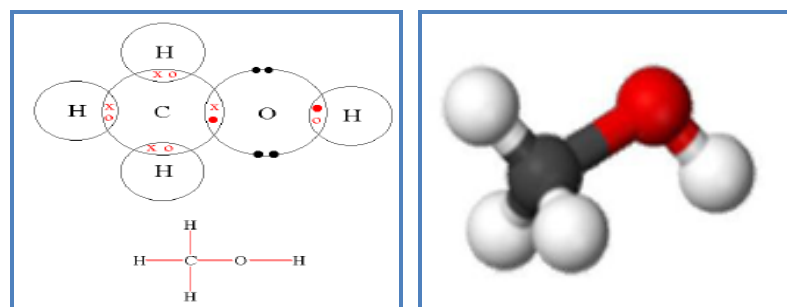
**Sumber:** Thesis : Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells.2008

### 2.3.4 Metanol

Metanol diproduksi secara alami oleh metabolisme anaerobik oleh bakteri. Hasil proses tersebut adalah uap metanol (dalam jumlah kecil) di udara. Setelah beberapa hari, uap metanol tersebut akan teroksidasi oleh oksigen dengan bantuan sinar matahari menjadi karbon dioksida dan air. Reaksi kimia metanol yang terbakar di udara dan membentuk karbon dioksida dan air adalah sebagai berikut:



Metanol yang dikenal sebagai pelarut organik polar, digunakan sebagai pelarut atau pengencer untuk resin dan *hardener* epoksi, sehingga resin epoksi dapat bercampur dengan grafit. Daya pembasahan resin terhadap grafit akan meningkat dan dapat membasahi seluruh permukaan grafit, sehingga ikatan yang terbentuk antara resin dan grafit menjadi lebih kuat. Adapun struktur dan sifat dari metanol secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.14 dan Lampiran 8.



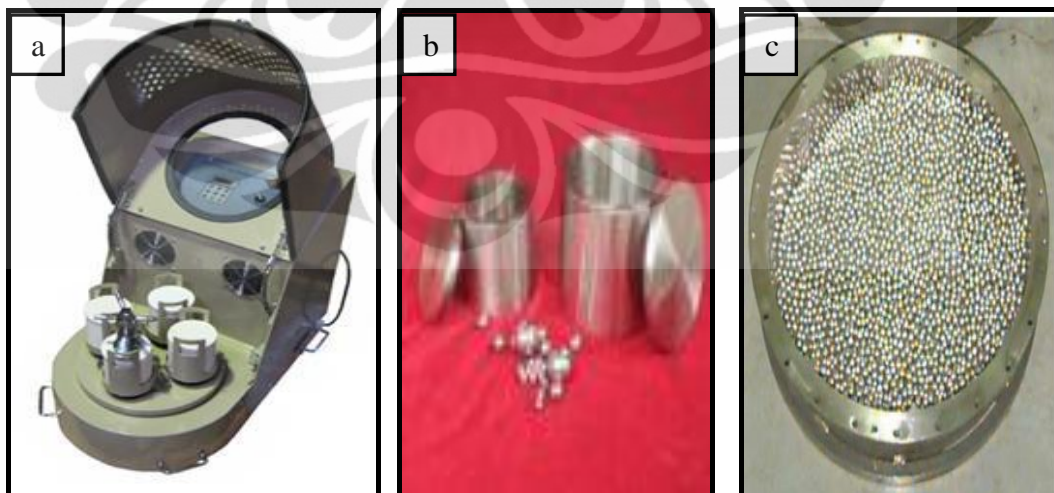
**Gambar 2.14.** Struktur dari Metanol<sup>[42]</sup>

**Sumber:** <http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol>

## 2.4 Metode Fabrikasi: *Mixing*

Proses pencampuran adalah sebuah teknik yang dilakukan agar suatu campuran menjadi homogen atau terdistribusi merata. Dimana dalam hal ini, dilakukan pencampuran antara *reinforcement* berupa grafit dan *carbon black*. Pencampuran ini dimaksud agar partikel CB terdistribusi merata dalam grafit.

Proses pencampuran ini dilakukan di sebuah alat penggiling bola. Alat penggiling bola yang digunakan adalah *planetary ball mill* yang dapat meningkatkan keefektifan dan efisiensi dalam proses pencampuran. Kemudian campuran serbuk tersebut ditempatkan dalam suatu wadah pencampuran atau *jar* yang digunakan untuk menahan gerakan bola-bola giling dan campuran serbuk ketika proses pencampuran berlangsung. Bola giling digunakan sebagai penghancur dan pepadu campuran serbuk sehingga terbentuk suatu campuran yang homogen. Oleh karena itu, material pembentuk bola giling harus memiliki kekerasan yang tinggi agar tidak terjadi kontaminasi saat terjadi benturan dan gesekan antara serbuk, bola dan wadah penggiling. Material yang dapat digunakan untuk bola giling adalah baja taha karat, baja karbon, baja perkakas, dan baja kromium<sup>[43]</sup>. Komponen yang digunakan dalam proses pencampuran ini dapat dilihat pada Gambar 2.15 di bawah ini:



**Gambar 2.15.** Komponen dalam Proses Pencampuran: (a) *Planetary Ball Mil*; (b) *Jar*; dan (c) Bola Penggiling<sup>[43]</sup>.

. Sumber:[http://www.mtixtl.com/sfm-1bench\\_topplanetaryautomaticballmills\\_with\\_4\\_aluminajars500ml.aspx](http://www.mtixtl.com/sfm-1bench_topplanetaryautomaticballmills_with_4_aluminajars500ml.aspx)

*Planetary ball mill* didesain untuk proses pencampuran, penggilingan, pengembangan produk baru, dan memproduksi material berteknologi tinggi dengan

volume kecil<sup>[43]</sup>. Alat ini mempunyai volume yang kecil, fungsi yang komplit, efisiensi tinggi, dan suara yang tidak bising. Berikut ini merupakan spesifikasi dari *planetary ball mill* pada Tabel 2.9.

**Tabel 2.9.** Spesifikasi *Planetary Ball Mill*<sup>[43]</sup>

<i>Voltage</i>	AC 208-240V , 50 / 60Hz, <i>single phase</i>
<i>Power</i>	500W
<i>Speed Adjustment</i>	<i>Variable by changing frequency of AC motor</i>
<i>Rotary Rate</i>	<i>Main plate rotation in cycle:</i> 30-350 rpm <i>Mixing tank rotation in its selves:</i> 60-700 rpm
<i>Digital display</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Digital display the speed in RPM</i></li> <li>• <i>Timer controls major platen's running time from 1 to 999 minutes</i></li> <li>• <i>Timer control tank rotation time from clockwise to anticlockwise direction: 1- 99 minutes</i></li> </ul>
<i>Dimension</i>	450 x 490 x 530 mm
<i>Net Weight</i>	55 kg
<i>Tank (Jar)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Four 500 ml Alumina jars are included</i></li> <li>• <i>32 ZrO2(YSZ) balls with various size are included ( 8 balls per jar)</i></li> <li>• <i>Alumina jars and vacuum stainless steel jar without vacuum are available up to 500 ml at extra cost ( click above picture to enlarge)</i></li> </ul>
<i>Shipment Dimension</i>	45" x30" x 38"
<i>Shipment weight</i>	180 Lbs

**Sumber:**[http://www.mtixtl.com/sfm-1bench\\_topplanetaryautomaticballmills\\_with\\_4\\_aluminajars500ml.aspx](http://www.mtixtl.com/sfm-1bench_topplanetaryautomaticballmills_with_4_aluminajars500ml.aspx)

Campuran yang terbentuk melalui proses ini sangat bergantung pada komposisi bahan dan parameter prosesnya, seperti kecepatan perputaran alat dan waktu pencampuran.

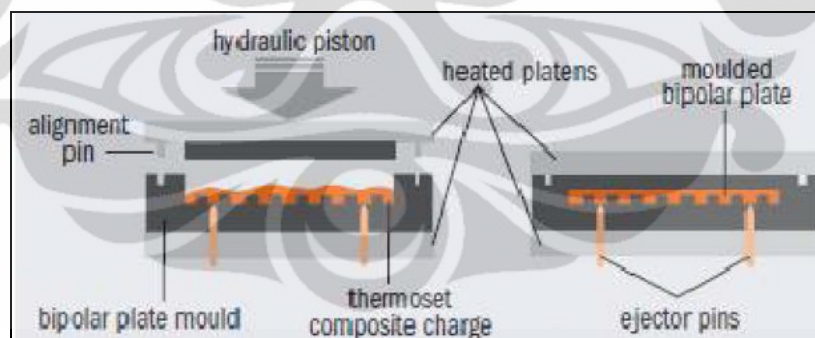
Waktu pencampuran adalah salah satu parameter penting dalam proses *mixing*. Waktu *mixing* ditentukan untuk mencapai keadaan homogen dalam suatu campuran, sehingga partikel dalam campuran tersebut terdistribusi merata. Dengan meratanya distribusi partikel dapat memperbaiki sifat mekanik dari komposit<sup>[44]</sup>.

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

Metode yang dapat digunakan untuk produksi massal dari pelat bipolar komposit adalah dengan metode *compression moulding*. Pembuatan pelat bipolar komposit dengan menggunakan matriks berupa polimer termoset maupun *thermoplastic* yang sulit untuk diproses dapat dilakukan dengan metode *compression moulding*. *Compression moulding* merupakan cara yang sederhana

dan efektif dikarenakan komposit polimer dengan komposisi bahan pengisi tinggi tidak dapat mengalir dengan mudah. Oleh karena itu, campuran serbuk tidak perlu dibuat menjadi sangat cair sehingga komposisi bahan pengisi berbasis polimer dapat menjadi lebih tinggi dalam komposit menyebabkan konduktivitas listrik yang memadai dapat tercapai<sup>[45]</sup>.

*Compression moulding* menggunakan panas untuk membentuk part secara permanen. Ketika resin mengalami *curing*, part tidak dapat diubah bentuk sehingga membuat proses yang terjadi bersifat *irreversible*<sup>[20]</sup>. Tahap awal proses *compression moulding*, yaitu massa tertentu dari material diletakkan dalam cetakan dimana volum material cukup untuk mengisi cetakan ketika material ditekan bersama-sama. Awalnya, luas permukaan pelat mungkin telah tertutup sempurna atau hanya sebagian yang tertutupi oleh material. Meskipun demikian, ketika cetakan ditekan untuk jangka waktu tertentu, material bergabung bersama-sama membentuk pelat dan material dipaksa untuk menutupi sisa permukaan cetakan yang belum terisi secara sempurna (Gambar 2.16). Tekanan yang diberikan berpengaruh terhadap bentuk, kompaksi, dan ikatan dari pelat yang dihasilkan<sup>[20]</sup>.



**Gambar 2.16** Ilustrasi Pembuatan Pelat Bipolar dengan Metode *Compression Moulding*<sup>[45]</sup>

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

Temperatur proses bagi resin polimer pada umumnya untuk terjadinya proses *curing* sekitar 20-40<sup>0</sup>C diatas temperatur leleh, yaitu berkisar antara 60–140<sup>0</sup>C<sup>[20]</sup>. Temperatur yang digunakan, sesuai dengan jenis polimer atau resin yang digunakan untuk terjadinya curing. Temperatur *curing*, tekanan, dan waktu perlu dioptimalkan karena kondisi *curing* tersebut berpengaruh terhadap sifat dari pelat bipolar komposit (komposit epoksi) yang dihasilkan<sup>[20]</sup>. Tekanan secara

signifikan berpengaruh terhadap konduktivitas listrik dan sifat mekanis dari komposit. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.16, semakin tinggi tekanan yang digunakan, maka porositas dari komposit akan berkurang, densitas akan meningkat, serta menghasilkan nilai konduktivitas listrik dan sifat mekanis yang semakin meningkat<sup>[20,45]</sup>. Hal tersebut terjadi karena jarak antar partikel yang semakin kecil dari sistem komposit<sup>[45]</sup>.



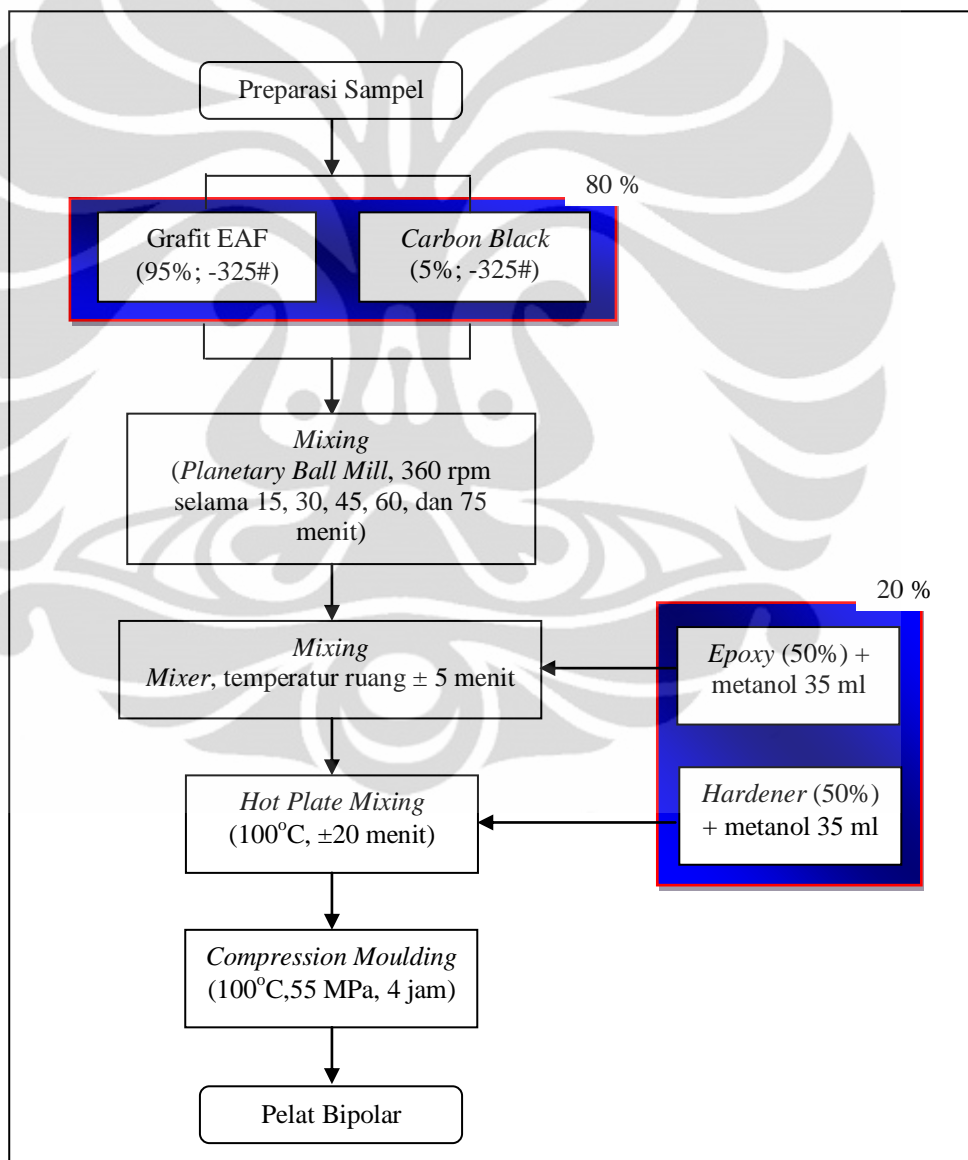


## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

#### 3.1.1 Diagram Alir Fabrikasi Pembuatan Pelat Bipolar

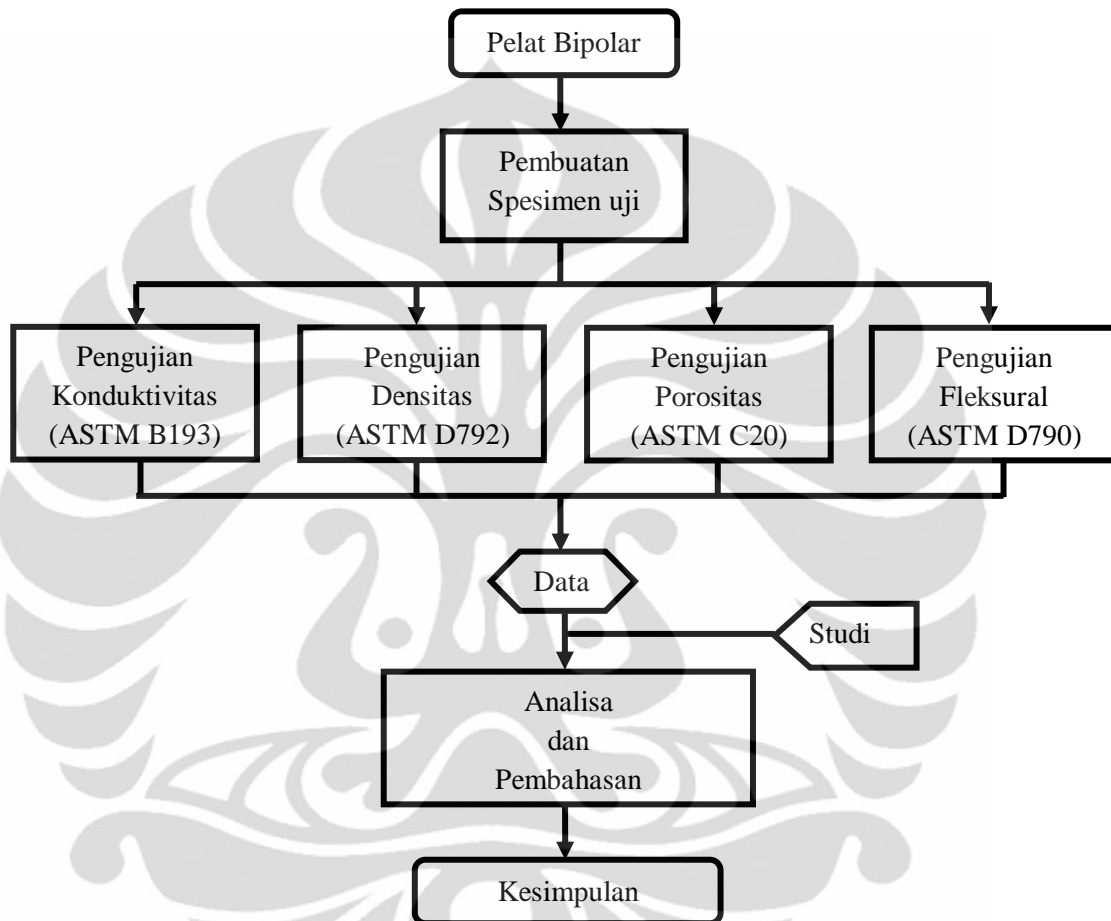
Metode penelitian yang dilakukan terdiri dari proses fabrikasi sampel dan karakterisasi sampel. Pada Gambar 3.1 berikut ini menunjukkan diagram alir penelitian dari pembuatan pelat bipolar karbon komposit.



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian (Fabrikasi Pelat Bipolar)

### 3.1.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel

Pada Gambar 3.2 berikut ini menunjukkan diagram alir penelitian dari pengujian pelat bipolar karbon komposit.



Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian (Karakterisasi Sampel)

## 3.2 Alat dan Bahan

### 3.2.1 Peralatan

Berikut ini adalah peralatan yang digunakan pada penelitian untuk menghasilkan pelat bipolar serta pengujian karakterisasi terhadap pelat bipolar tersebut:

1. *Planetary Ball Milling*
2. *Hydraulic Pressure Machine*
3. Mesin ayak

4. Timbangan digital
5. Oven
6. *Mixer*
7. *Hot Plate*
8. Cetakan Pelat ukuran 15 cm x 15 cm
9. Kertas Amplas 200#, 500#, dan 1000#
10. Alat tumbuk (Mortar)
11. Gergaji
12. Pahat
13. Pipet Volum
14. Gelas Ukur
15. Termometer
16. *Beaker glass* 1000 ml
17. Masker
18. Spatula
19. Penggaris
20. Alat Uji Konduktivitas *Veeco FPP 5000- four point probe detector*
21. Alat Uji Porositas (BET – ASTM C20)
22. Alat Uji Densitas (ASTM D792)
23. Alat Uji Kekuatan lentur, *UTM T22K JJ-Loyd Instument* (Bending 3 titik – ASTM D790)

### 3.2.2 Bahan

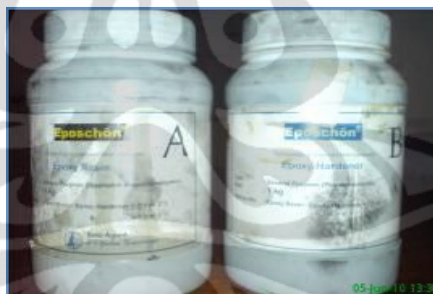
Pada penelitian ini, digunakan epoksi sebagai matriks, grafit EAF dan *carbon black* sebagai penguat. Adapun jumlah dari massa bahan baku yang digunakan sesuai dengan persentase tiap bahan pada masing-masing komposisi dan jumlah spesimen yang dibutuhkan untuk pengujian. Untuk setiap komposisi dibutuhkan 144 gram/sampel.

### 3.2.2.1 Epoksi Resin

Dalam penelitian ini, polimer termoset berupa *epoxy* digunakan sebagai matriks pada sistem pelat bipolar dengan merek dagang Eposchon (Bhispenol A-epichlorohydrin) yang memiliki spesifikasi dapat dilihat pada Lampiran 5.

### 3.2.2.2 Epoksi Hardener

Polimer *epoxy* memerlukan sebuah *coupling agent* sebagai stimulant terjadinya proses polimerisasi dengan baik pada suhu ruang. Oleh karena itu digunakan *epoxy hardener* dengan merek dagang Eposchon (Polyaminoamide). Pada penelitian ini digunakan resin dan *hardener* dengan rasio berat 1:1. Secara keseluruhan resin epoksi yang digunakan adalah 20% dari total berat bahan-bahan yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar. Spesifikasi Epoksi *Hardener* dapat dilihat pada Lampiran 6. Epoksi resin dan hardener dapat dilihat pada Gambar 3.3 di bawah ini.



Gambar 3.3 Epoksi Resin dan *Hardener*

### 3.2.2.3 Grafit Limbah *Electric Arc Furnace* (EAF)

Dalam penelitian ini digunakan grafit elektroda busur listrik (*electric arc furnace*) sisa dari proses peleburan baja. Grafit akan digunakan dengan ukuran partikel  $\leq 44 \mu\text{m}$  (-325 mesh) sebanyak 95% dari keseluruhan 80% total berat bahan *reinforcement* yang digunakan. Ukuran tersebut diperoleh setelah bongkahan grafit elektroda EAF ditumbuk dan digerus menggunakan alat tumbuk (mortar) dan *planetary ball mill* untuk kemudian diayak dengan mesin

pengguncang hingga mendapatkan ukuran yang diinginkan. Spesifikasi grafit EAF dapat dilihat pada Lampiran 7.

Bongkahan grafit dapat dilihat pada Gambar 3.4 di bawah ini.



Gambar 3.4 Grafit EAF

#### 3.2.2.4 Carbon Black

Pada penelitian ini, *carbon black* (CB) digunakan sebagai material semi konduktif. *Carbon black* dengan permukaan yang luas akan mampu menghantarkan arus listrik dan membentuk jaringan karbon yang konduktif. Namun, struktur *carbon black* yang berporos akan mengurangi sifat mekanis dari komposit. *Carbon black* yang dipakai pada penelitian ini dihasilkan dari pirolisis serat alami (serabut kelapa) pada temperatur  $\pm 900^{\circ}\text{C}$  selama  $\pm 10$  jam. Struktur amorf yang berfungsi sebagai *reinforcement* dengan ukuran partikel sebesar 325 mesh atau  $\leq 44 \mu\text{m}$ . Berat *carbon black* yang digunakan adalah 5% dari keseluruhan 80% total berat bahan *reinforcement* yang digunakan. *Carbon black* dapat dilihat pada Gambar 3.5 di bawah ini.



Gambar 3.5 Carbon Black

### 3.2.2.5 Metanol

Penggunaan metanol 0,1 M pada penelitian ini berfungsi sebagai pengencer resin epoksi dan *hardener*, sebelum dicampurkan dengan bahan-bahan penguat. Pengenceran membantu homogenisasi pembasahan matriks terhadap bahan penguat. Metanol digunakan karena sifatnya yang mudah menguap sehingga tidak akan menyisakan senyawa pengotor yang dapat mengganggu keseimbangan reaksi pada saat proses pencampuran. Penambahan metanol yang diperlukan untuk pembuatan komposit pelat bipolar ini adalah 35 ml untuk masing-masing resin epoksi dan *hardener*. Spesifikasi metanol yang dipakai dapat dilihat pada lampiran 8.

## 3.3 Preparasi Sampel

### 3.3.1 *Crushing* dan *milling* grafit

Pada awalnya bongkahan elektroda grafit yang digunakan sebagai hasil limbah dihancurkan dengan gergaji dan pahat kemudian dilakukan proses *milling* dengan menggunakan alat tumbuk (mortar) dan *Planetary Ball Milling* untuk menghasilkan ukuran partikel yang homogen. Untuk mendapatkan partikel homogen dilakukan pengayakan dengan mesin ayak, sehingga didapat partikel grafit sebesar -325# atau ukuran partikelnya sekitar  $\leq 44 \mu\text{m}$ .

### 3.3.2 Penimbangan

Bahan-bahan yang akan digunakan dalam penelitian adalah grafit EAF (325#) dan CB (325#) sebagai penguat dan epoksi ditambah *hardener* sebagai matriksnya. Kemudian ditimbang untuk mendapatkan takaran sesuai formulasi pada Tabel 3.1. Hasil penimbangan dimasukkan ke dalam *beaker glass* untuk proses selanjutnya.

**Tabel 3.1.** Komposisi Pelat Bipolar dan Variasi Waktu Pencampuran

Kode Sampel	Pelat Bipolar Komposit (100%wt = 144 gr)				
	Reinforcement (80%wt = 115.2 gr)		Variasi waktu mixing grafit dan CB [menit]	Matriks Polimer (20%wt = 28.8 gr)	
	Grafit EAF (95%wt, 325#)	CB (5%wt, 325#)		Epoksi (50%wt)	Hardener (50%wt)
	gr	gr	gr	gr	
A	109.44	5.76	15	14.4	14.4
B			30		
C			45		
D			60		
E			75		

Proses penimbangan dengan timbangan digital dapat dilihat ada Gambar 3.6 di bawah ini.

**Gambar 3.6** Proses Penimbangan

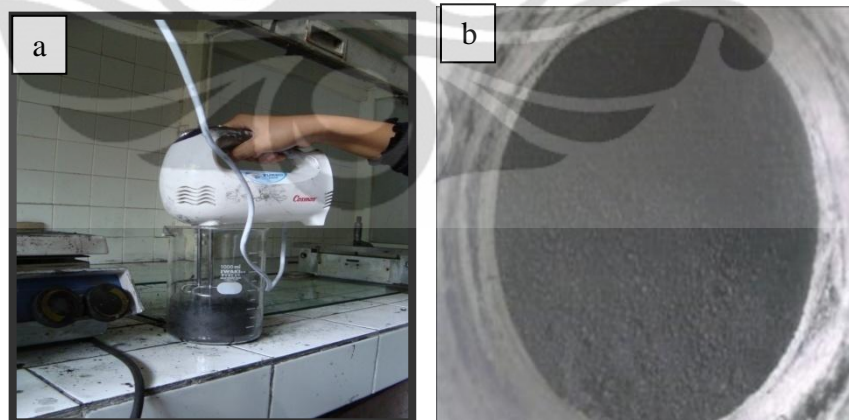
### 3.3.3 Pencampuran

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

1. Masukkan grafit EAF dan *carbon black* ke dalam *jar*, kemudian pencampurannya dilakukan dengan mesin *Planetary Ball Milling*.

2. Variasi waktu pencampuran yang digunakan selama 15 menit, 30 menit, 45 menit, 60 menit, dan 75 menit.
3. Epoksi diencerkan dengan metanol sebanyak 35 mL.
4. Masukkan epoksi yang telah tercampur rata dengan metanol ke dalam *beaker glass* 1 L yang telah berisi grafit EAF dan *carbon black*, kemudian *mixing* selama  $\pm 5$  menit.
5. *Hardener* diencerkan dengan metanol 35 mL.
6. Masukkan *hardener* yang telah tercampur merata dengan metanol ke dalam *beaker glass* 1 L yang telah berisi bahan penguat dan resin epoksi, kemudian *mixing* selama  $\pm 5$  menit
7. *Mixing* diatas *hot plate* ( $T = 100^{\circ}\text{C}$ ) selama  $\pm 15$  menit dan dihasilkan bakalan yang siap dicetak. Proses ini juga bertujuan untuk menguapkan metanol yang ada pada bakalan, sehingga dapat menghindari penguapan metanol yang terjadi pada saat pencetakan, dan pelat yang dihasilkan memiliki permukaan dan struktur yang tidak berpori.

Proses dan hasil dari pencampuran dapat dilihat pada Gambar 3.7 di bawah ini. Gambar 3.7 a menunjukkan bakalan yang sedang dicampur dengan menggunakan *mixer*, sedangkan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 3.7 b.



**Gambar 3.7** (a) Proses Pencampuran dan (b) hasil pencampuran

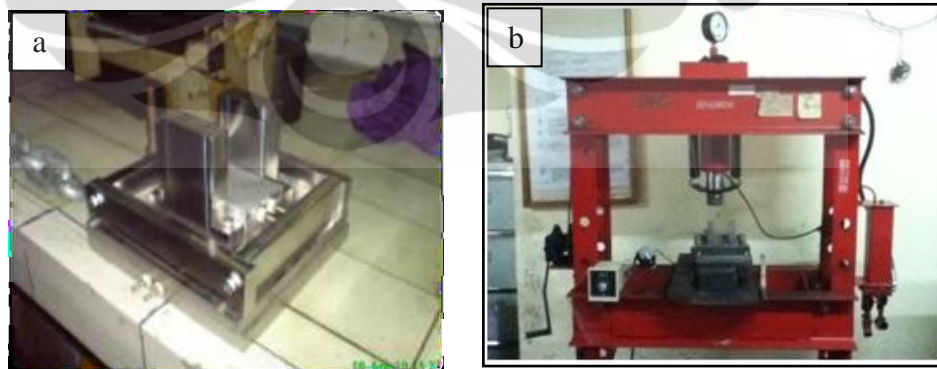


### 3.3.4 Pencetakan pelat

Bakalan yang telah dicampur lalu dimasukkan ke dalam cetakan yang terbuat dari baja tahan karat dengan ukuran 15 x 15 x 0.42 cm, lalu diratakan. Lalu tutup cetakan dan masukkan ke dalam mesin *hot press* dilakukan proses *setting* selama 4 jam. Tekanan yang digunakan sebesar 55 MPa, tekanan ini harus dijaga konstan. Suhu yang digunakan sebesar 100 °C. Prosedur pencetakan adalah sebagai berikut:

1. Bersihkan cetakan dari kotoran (debu) yang menempel dan oleskan dengan oli bersih secara merata pada bagian dalam cetakan
2. Masukkan bakalan hasil pencampuran ke dalam cetakan hingga merata.
3. Tutup cetakan dan masukkan ke dalam *hydraulic pressure machine*
4. Atur tekanan pada mesin *hydraulic* sebesar 55 MPa dengan temperatur 100°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

Di bawah ini merupakan cetakan (Gambar 3.8 a) dan mesin *Hydraulic Pressure Machine* (Gambar 3.8 b).



**Gambar 3.8** (a) Cetakan yang Digunakan dan (b) Penempatan Cetakan pada Mesin *Hydraulic Pressure Machine*

Setelah proses *compress* selesai, pelat bipolar yang telah jadi didiamkan dalam cetakan selama 24 jam karena pelat bipolar akan mengalami perubahan

dimensi serta pelengkungan bila langsung dikeluarkan dari cetakan. Kemudian setelah didiamkan, pelat bipolar dapat dikeluarkan dari cetakan untuk dilakukan proses selanjutnya.

### 3.3.5 Pembuatan Spesimen Uji

Pelat yang sudah dihasilkan kemudian dilanjutkan dengan pembuatan sampel uji, dimana dalam proses ini pelat akan dibagi menjadi 3 bagian, yaitu :

1. Untuk pengujian konduktivitas, sampel dibuat dengan ukuran 2cm x 2cm sebanyak 6 buah untuk satu variabel. Masing – masing sampel diampelas hingga rata agar arus yang ditembakkan pada permukaan sampel, dapat ditangkap sehingga menghasilkan nilai konduktivitas yang akurat.
2. Untuk pengujian densitas, dan porositas dibuat sampel kecil dengan ukuran 2cm x 2cm sebanyak 6 buah untuk masing – masing variabel.



**Gambar 3.9** Sampel Uji Konduktivitas, Densitas, dan Porositas.

3. Untuk pengujian kekuatan fleksural, sampel yang dibutuhkan berjumlah 4 buah untuk masing – masing variabel dengan ukuran 12cm x 1,3cm x 0,3cm. sampel ini harus diampelas hingga permukaannya rata dengan tujuan agar menghilangkan retak mikro yang dapat menyebabkan terjadinya retak sehingga akan dihasilkan nilai kekuatan fleksural yang lebih akurat.



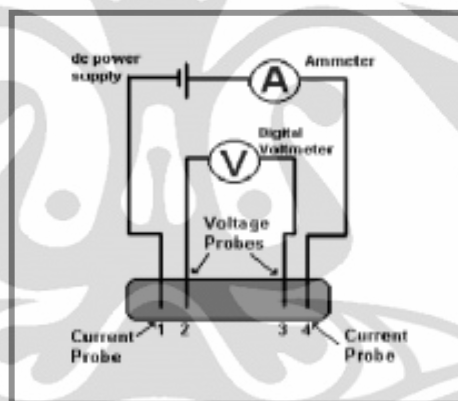
**Gambar 3.10** Sampel Uji Fleksural

### 3.4 Proses Karakterisasi Material Pelat Bipolar

#### 3.4.1 Pengujian Konduktivitas

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

Pengujian ini menggunakan alat *four point probe detector*, akan didapatkan nilai konduktivitas ( $\Omega\text{-cm}$ ) setelah perhitungan nilai resistansi dan resistivitas yang didapat dari pemberian potensial arus oleh 2 *probe* terluar, dimana terlihat pada titik 1 dan 4 pada Gambar 3.11 di bawah ini. dan kemudian 2 *probe* terdalam akan mengukur tegangan yang dihasilkan, terlihat pada titik 2 dan 3.



**Gambar 3.11.** Skema Uji Konduktivitas

Dari pengujian ini akan didapatkan nilai resistivitas sampel dan untuk mendapatkan nilai konduktivitas pada sampel, maka didapat dengan menggunakan persamaan berikut ini:

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

dimana:

$C$  = konduktivitas (S/cm)

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

### 3.4.2 Pengujian densitas (rapat massa)

Pengujian ini mengacu pada ASTM D 792. Prinsip pengujiannya, yaitu dengan membandingkan massa material di udara dengan massa material di dalam air. Massa material di dalam udara akan berbeda dengan massa material di dalam air karena adanya gaya ke atas (gaya Archimedes). Densitas (kerapatan massa) dinyatakan dalam satuan  $\text{kg/m}^3$  dilambangkan dengan  $\rho$ . Adapun prosedur dari pengujian densitas secara bertahap adalah sebagai berikut:

1. Sampel ditimbang pada temperatur ruang dan diperoleh massa kering dari sampel (A).
2. Kemudian sampel dicelupkan dalam *beaker glass* berisi air. Pencelupan ini harus dilakukan hingga seluruh permukaan sampel berada di tengah-tengah *beaker glass*, dan tidak boleh menyentuh dasar dan pinggir dari *beaker glass*, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Penimbangan Sampel di Air

3. Catat temperatur air yang digunakan

Berikut persamaan untuk menentukan densitas sampel:

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

dimana:

A = massa sampel kering (gr)

B = massa sampel tergantung dalam air (gr)

$\rho_{\text{air}}$  = rapat massa air pada suhu tertentu  $28.5^{\circ}\text{C}$  ( $0.996089 \text{ gr/cm}^3$ )

$\rho_{\text{sampel}}$  = *bulk density* ( $\text{gr/cm}^3$ )

### 3.4.3 Pengujian porositas

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

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

1. Keringkan sampel di dalam oven dengan temperatur  $100^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam dan timbang massa sampel setelah dioven dengan timbangan digital dan catat sebagai D.
2. Siapkan air didalam *beaker glass* dan panaskan hingga suhu  $100^{\circ}\text{C}$  pada *hot plate magnetic stirring*.
3. Rendam sampel didalam *beaker glass* yang berisi air selama 2 jam sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.13 di bawah ini.



Gambar 3.13 Perendaman Sampel di Air

4. Diamkan sampel didalam air pada temperatur kamar selama 12 jam.

5. Timbang massa sampel setelah didiamkan didalam air dengan timbangan digital dan catat sebagai S.
6. Keringkan sampel dengan kain katun.
7. Timbang sampel yang telah dikeringkan dengan timbangan digital dan catat sebagai Sw.

Berikut persamaan untuk menentukan nilai porositas pada pelat bipolar :

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

dimana :

D = massa di udara (gr)

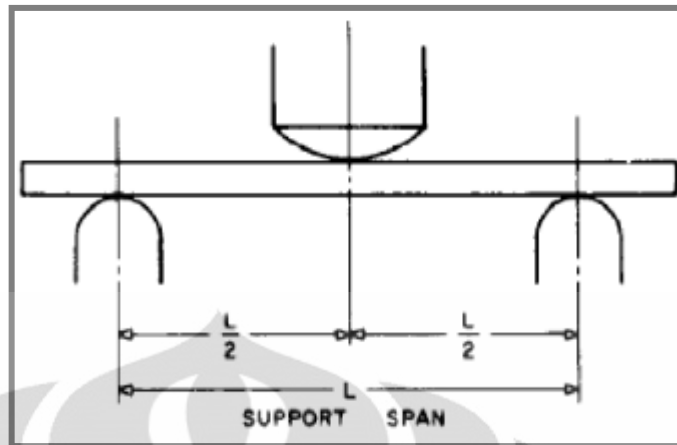
S = massa di dalam air setelah direndam 12 jam (gr)

Sw = massa akhir sampel setelah dikeringkan (gr)

#### 3.4.4 Pengujian Fleksural (Tekuk)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan pelat bipolar terhadap pembebanan tekuk. Pengujian ini mengacu pada ASTM D 790, yaitu "*standars test methods for flexural properties of unreinforced plastics and electrical insulating materials*".

Prinsip dari pengujian ini adalah sampel diletakkan di antara dua penahan, kemudian penekanan dilakukan ketika mesin bergerak ke atas, sehingga sampel uji mengalami pembebanan pada bagian tengah dari sampel tersebut dengan kecepatan pembebanan yang konstan hingga sampel patah. Pengujian dengan melakukan pembebanan pada 3 titik (lihat pada gambar 3.14 di bawah ini). Dengan perincian panjang 130 mm, lebar 13 mm, dan tebal 3 mm.



Gambar 3.14 Skema Uji Fleksural

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

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

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

dimana,

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

P = beban maksimum (N)

L = panjang spesimen (mm)

B = lebar spesimen (mm)

D = tebal spesimen (mm)

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

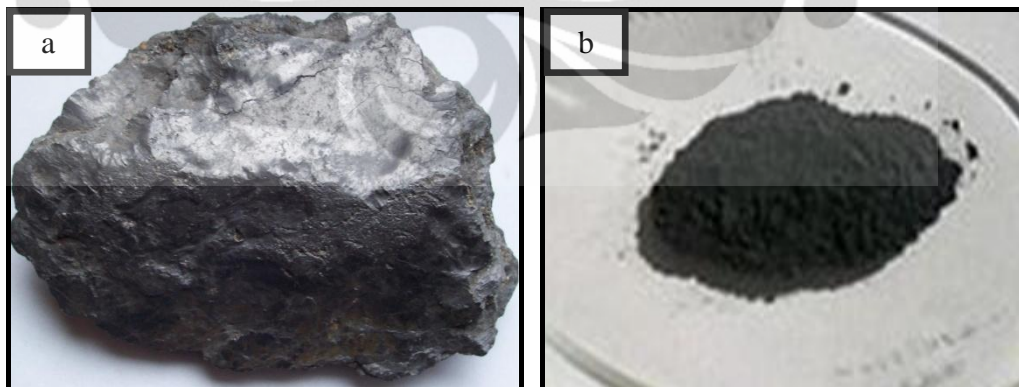
#### 4.1 Hasil Preparasi Sampel

Proses awal sebelum dilakukan pengujian untuk karakterisasi pelat bipolar yaitu dengan melakukan preparasi sampel. Pada proses preparasi sampel ada tiga tahapan utama yaitu *crushing* dan *milling*, pencampuran, pencetakan, dan pembuatan spesimen uji. Setiap tahapan akan menentukan hasil dari preparasi sampel dan karakterisasi. Hasil dari proses tersebut berpengaruh terhadap sifat akhir dari pelat bipolar.

##### 4.1.1 Hasil *Crushing* dan *Milling*

###### 4.1.1.1 Hasil Preparasi Grafit EAF

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  $\leq 44 \mu\text{m}$  (325 mesh). Pada Gambar 4.1 dapat dilihat grafit EAF sebelum dan sesudah dilakukan preparasi.



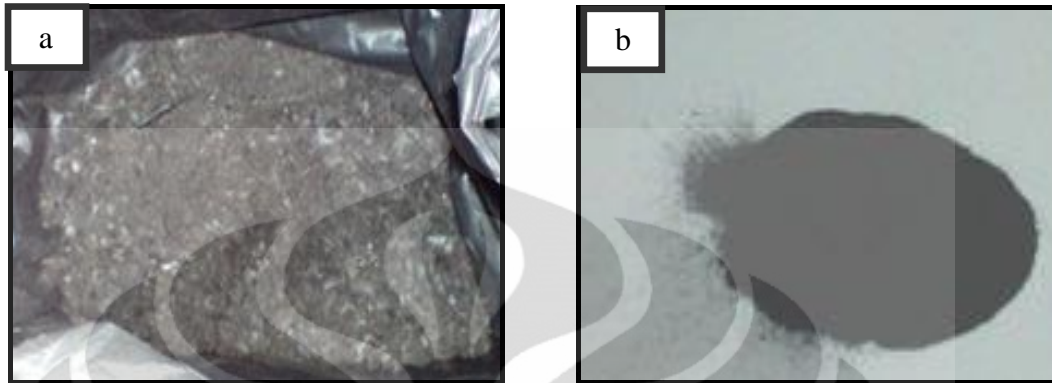
**Gambar 4.1.** Grafit EAF (a) Sebelum di *Crushing* dan *Milling*; (b) setelah di *Crushing* dan *Milling*.

###### 4.1.1.2 Hasil Preparasi *Carbon Black*

Preparasi awal *carbon black* dilakukan dengan proses pirolisis. Hasil proses tersebut kemudian direduksi hingga berukuran  $\leq 44 \mu\text{m}$  (325 mesh) dengan



proses *crushing* dan *milling*. Pada Gambar 4.2 dapat dilihat *carbon black* sebelum dan sesudah dilakukan preparasi.



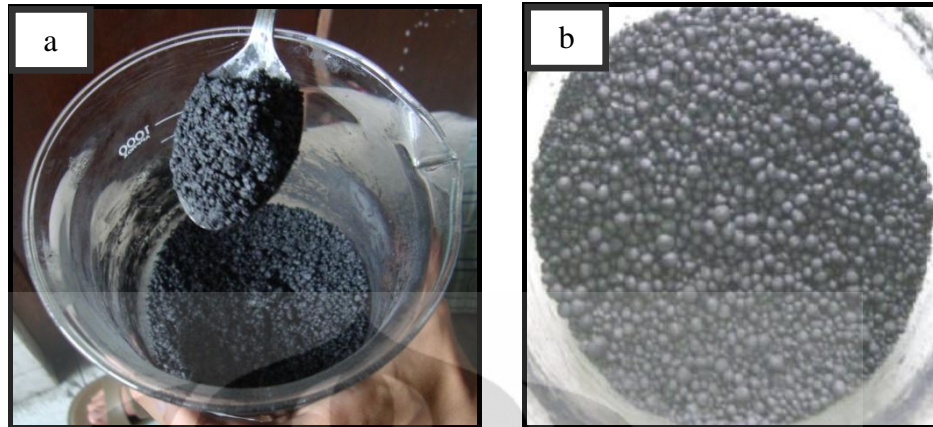
**Gambar 4.2** *Carbon Black* (a) Hasil Pirolisis ; (b) Hasil Pengayakan.

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.

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

Setelah mendapatkan partikel grafit EAF dan *carbon black* dengan ukuran  $\leq 44 \mu\text{m}$ , tahapan selanjutnya dilakukan pencampuran. Pencampuran grafit EAF dan *carbon black* dilakukan di mesin *planetary ball mill*. Setelah grafit EAF dan *carbon black* tercampur, kemudian dilakukan pencampuran dengan resin epoksi dan *hardener*. Pencampuran dilakukan dengan dan tanpa pengaplikasian panas. Pencampuran dengan pengaplikasian panas dilakukan di atas *hot plate* pada temperatur  $100^{\circ}\text{C}$ .

Proses pencampuran ini merupakan proses yang paling menentukan karakterisasi dari pelat bipolar yang akan dihasilkan. Proses pencampuran ini akan didapatkan hasil yang berbentuk gumpalan seperti terlihat pada Gambar 4.3.



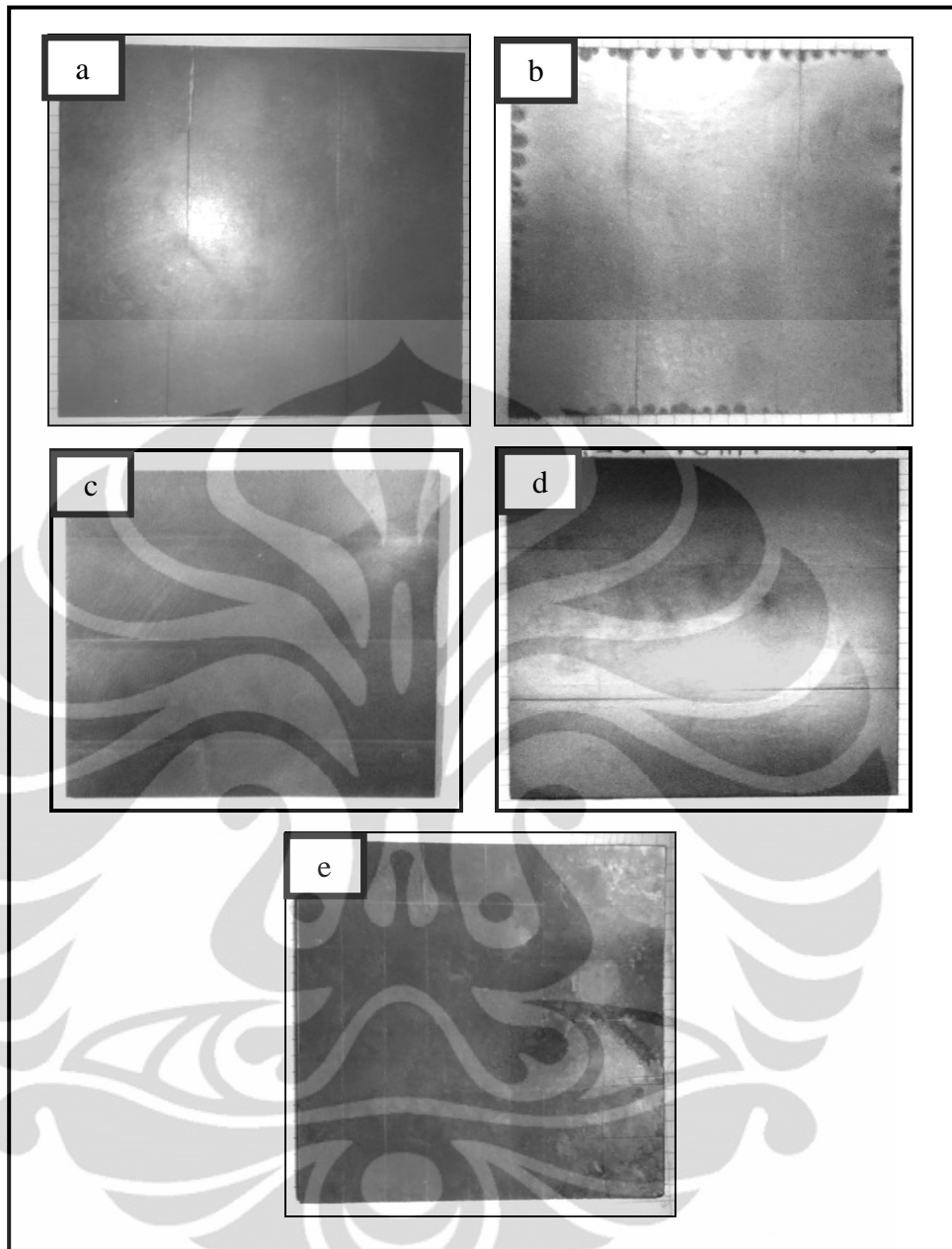
**Gambar 4.3** Hasil Pencampuran (a) Sebelum *Mixing* pada *Hot Plate*; (b) Hasil Akhir *Hot Mixing*

Hasil pencampuran tidak boleh terlalu basah atau terlalu kering karena akan berpengaruh pada hasil spesimen uji. Jika hasil pencampuran terlalu basah maka hasil spesimen uji akan cenderung retak. Namun jika hasil pencampuran terlalu kering maka hasil pencampuran akan cenderung hangus dan terlihat banyak poros.

#### 4.1.3 Hasil Pencetakan Pelat Bipolar

Setelah proses pencampuran selesai, maka tahapan selanjutnya adalah proses pencetakan. Pada penelitian ini, masing-masing pelat bipolar dibuat dengan mencampurkan grafit EAF dan 5% *carbon black* dengan variasi waktu campur sebesar 15, 30, 45, 60, dan 75 menit serta variabel proses lain yang sama untuk masing-masing pelat.

Proses pencetakan dilakukan dengan variabel tekanan 55 MPa pada kondisi temperatur 100°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** Pelat Bipolar yang Dihasilkan pada Variasi Waktu Campur Grafit EAF dan *Carbon Black*: a.) 15 menit, b.) 30 menit, c.) 45 menit, d.) 60 menit, dan e.) 75 menit.

Berdasarkan pengamatan visual terhadap ke lima sampel di atas, dimensi panjang dan lebar dari pelat yang terbentuk sesuai dengan dimensi cetakan. Hal ini menandakan bakalan mengisi rongga cetakan dengan baik. Sedangkan ketebalan pelat yang dihasilkan berbeda antar sisi berlawanan sehingga terlihat memiliki kemiringan. Adanya perbedaan ketebalan yang dihasilkan, dikarenakan penempatan bakalan ke dalam cetakan yang tidak merata. Tetapi, hal tersebut tidak terlalu mempengaruhi karakterisasi pelat secara signifikan.

**Universitas Indonesia**

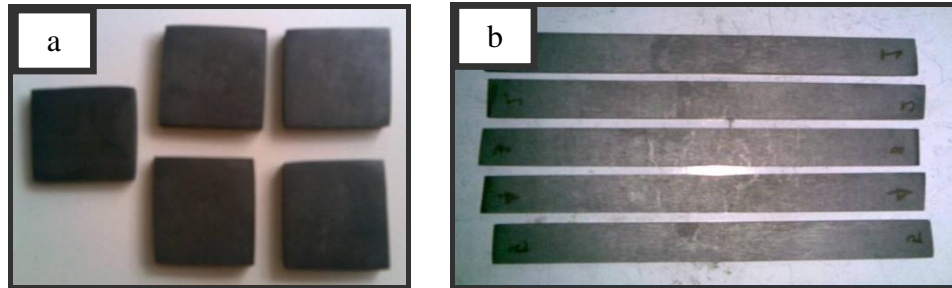
Jika dilihat pada permukaan sampel, pada Gambar 4.1 untuk sampel a (15 menit), c (45 menit), dan d (60 menit) memiliki permukaan yang rata, halus dan tidak terdapat retak. Namun pada sampel b (30 menit) terdapat retak di sekeliling pinggiran sampel dan patah di ujung kanan. Retak yang dihasilkan berukuran sebesar 4-6 mm. Hal ini dikarenakan bakalan yang dibuat untuk sampel ini masih basah sehingga saat di cetak, bakalan keluar dari sekeliling sisi cetakan dan menyebabkan retak yang menjulur dari luar ke arah dalam sampel. Pada sampel e (75 menit) terlihat hangus dan berporos di beberapa bagian. Hal ini dikarenakan bakalan yang dibuat terlalu kering.

Pengaruh yang mungkin dihasilkan akibat adanya retak dan poros ini adalah berupa hasil karakterisasi yang tidak seragam pada masing-masing pelat, sehingga pengambilan sampel pada masing-masing pelat harus diperhatikan karena akan menentukan data yang dihasilkan baik atau tidak.

Selain itu, pada permukaan pelat bipolar terbentuk suatu jejak yang ditimbulkan oleh permukaan dari cetakan yang digunakan. Jejak yang terdapat pada permukaan pelat bipolar yang tidak rata tersebut harus dihilangkan dan dihaluskan ketika dilakukan pengujian karakteristik.

#### **4.1.4 Hasil Pembuatan Sampel uji**

Pelat bipolar yang dihasilkan pada proses pencetakan selanjutnya dipotong untuk pembuatan spesimen uji. Ukuran setiap spesimen berdasarkan standar pada masing-masing pengujian. Setelah proses pemotongan dilakukan pengampelasan pada masing-masing spesimen. Hal ini bertujuan agar permukaan spesimen berbentuk rata dan mulus sehingga tidak terdapat *stress concentration* yang dapat mempengaruhi hasil pengujian. Spesimen uji yang telah melewati tahapan preparasi sebelum dilakukannya karakterisasi dapat ditunjukkan ada Gambar 4.5 di bawah ini.



**Gambar 4.5.** Spesimen Uji (a) Konduktivitas, Densitas, dan Porositas; (b) Fleksural

Spesimen uji untuk konduktivitas, densitas, dan porositas berukuran 2 x 2 cm dengan tebal 0.3 cm. Sedangkan spesimen uji untuk fleksural berukuran 12 x 1.3 cm dengan tebal 0.3 cm. Ukuran sampel yang digunakan sesuai dengan standard pengujian ASTM yang digunakan, yaitu ASTM C20 untuk pengujian porositas dan ASTM D790 untuk pengujian fleksural.

## 4.2 Hasil Pengujian Karakterisasi Spesimen Uji

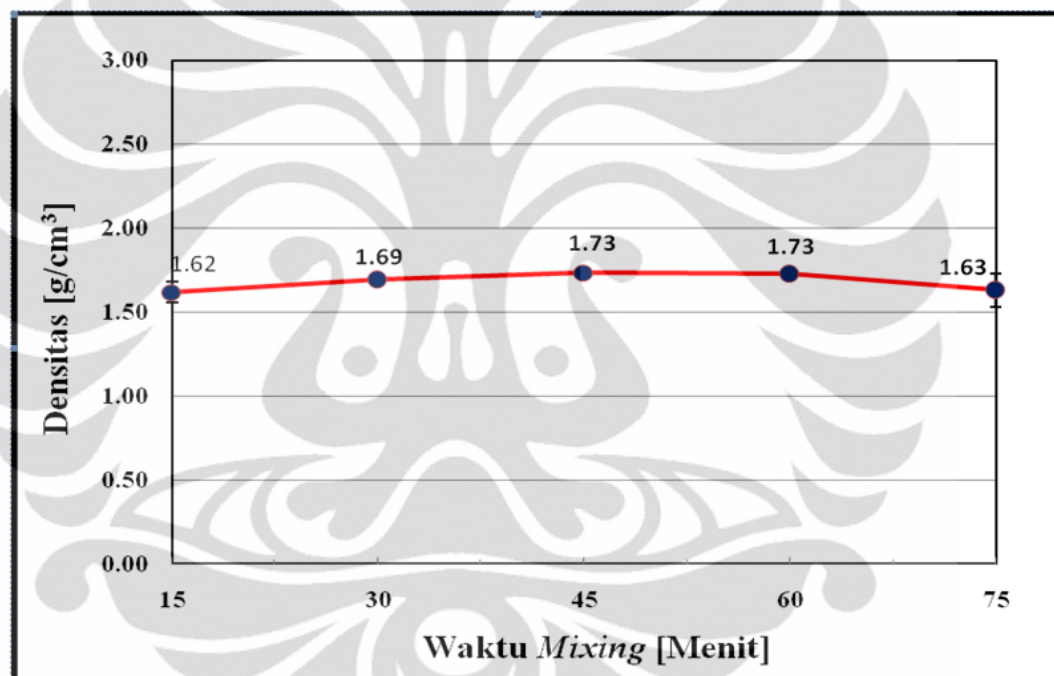
Karakterisasi sampel yang dilakukan dalam pengujian ini bertujuan untuk melihat pengaruh variasi waktu pencampuran antara grafit EAF dan *carbon black* terhadap sifat pelat bipolar yang dihasilkan. Waktu campur yang divariasikan pada masing-masing sampel sebesar 15, 30, 45, 60, dan 75 menit. Melalui karakterisasi sampel uji, akan diketahui variasi yang paling optimum dari ke lima pelat bipolar terhadap sifat yang dihasilkan, seperti densitas, porositas, fleksural dan konduktivitas.

### 4.2.1 Pengujian Densitas

Pengujian densitas dilakukan untuk mengetahui massa jenis dari pelat bipolar. Dengan massa jenis yang rendah, pelat bipolar akan mampu memenuhi tuntutan aplikasi dengan berat yang lebih ringan tanpa mengurangi performa yang diinginkan. Tabel 4.1 memperlihatkan data hasil pengujian densitas pada masing-masing pelat bipolar yang selanjutnya dikonversi dalam bentuk grafik yang terlihat pada Gambar 4.6.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Densitas

Waktu <i>Mixing</i> [menit]	Densitas [gr/cm <sup>3</sup> ]
15	1,62
30	1,69
45	1,73
60	1,73
75	1,63



Gambar 4.6 Pengaruh Peningkatan Waktu Campur terhadap Densitas.

Semakin lama waktu pencampuran antara grafit EAF dan *carbon black* pada proses pembuatan pelat bipolar, terjadi peningkatan terhadap densitas pelat. Hal ini menunjukkan bahwa dengan waktu campur yang lebih lama, *carbon black* yang tersebar semakin merata dan tidak terjadi penggumpalan di satu sisi bagian, sehingga komposit yang dihasilkan juga akan semakin padat (*dense*).

Jika dilihat pada Gambar 4.6, peningkatan waktu campur antara grafit EAF dengan *carbon black* tidak berpengaruh terhadap nilai densitas suatu pelat bipolar. Hal ini dikarenakan persentase bahan grafit EAF dan CB yang digunakan

sama di semua pelat yaitu 95%:5% dari 80% total berat, sehingga nilai densitas yang dihasilkan tidak jauh berbeda.

Pada penelitian<sup>[44]</sup>, yang mengembangkan pelat bipolar komposit berbahan grafit/5% CB/resin epoksi dengan metode *compression moulding* pada tekanan 55 MPa dengan temperatur penekanan sebesar 70°C selama 4 jam, dihasilkan pelat dengan densitas 1,69 g/cm<sup>3</sup>. Jika dibandingkan dengan penelitian ini yang menghasilkan densitas hingga 1,62 g/cm<sup>3</sup> pada tekanan 55 MPa dan temperatur penekanan 100°C, dapat disimpulkan bahwa temperatur penekanan yang rendah, menghasilkan densitas yang lebih rendah meskipun perbedaannya tidak terlalu signifikan. Selain itu, komposisi masing-masing bahan penyusun juga berpengaruh terhadap densitas komposit yang dihasilkan.

Faktor penting yang mempengaruhi perbedaan nilai densitas adalah tekanan dan temperatur pada saat melakukan kompres yang terjadi akibat adanya mekanisme pemadatan oleh tekanan yang disertai temperatur selama pencetakan pelat<sup>[45]</sup>. Pengaplikasian tekanan akan semakin merapatkan jarak ikatan dan mendesak keberadaan pori sehingga ketebalan pelat menurun dan densitas pelat bipolar yang terbentuk meningkat<sup>[20,24]</sup>. Pada saat pencetakan, temperatur yang diberikan akan menguapkan metanol yang berfungsi sebagai pelarut resin epoksi dan *hardener*. Selain itu terjadi juga pembentukan struktur jaring silang (*cross-linked structure*) polimer yang rapat disertai terperangkapnya pori hasil penguapan metanol.

Secara keseluruhan, nilai densitas yang dimiliki oleh masing-masing pelat yang dihasilkan memenuhi standar berat untuk pelat bipolar, yakni kurang dari 5 gr/cm<sup>3</sup><sup>[23]</sup>. Oleh karena itu, nilai densitas komposit ini telah memenuhi syarat ideal sebagai pelat bipolar. Seperti yang diketahui bahwa semakin kecil nilai densitas dari suatu pelat bipolar, maka akan dapat mengurangi berat dan volume dari sel tunam.

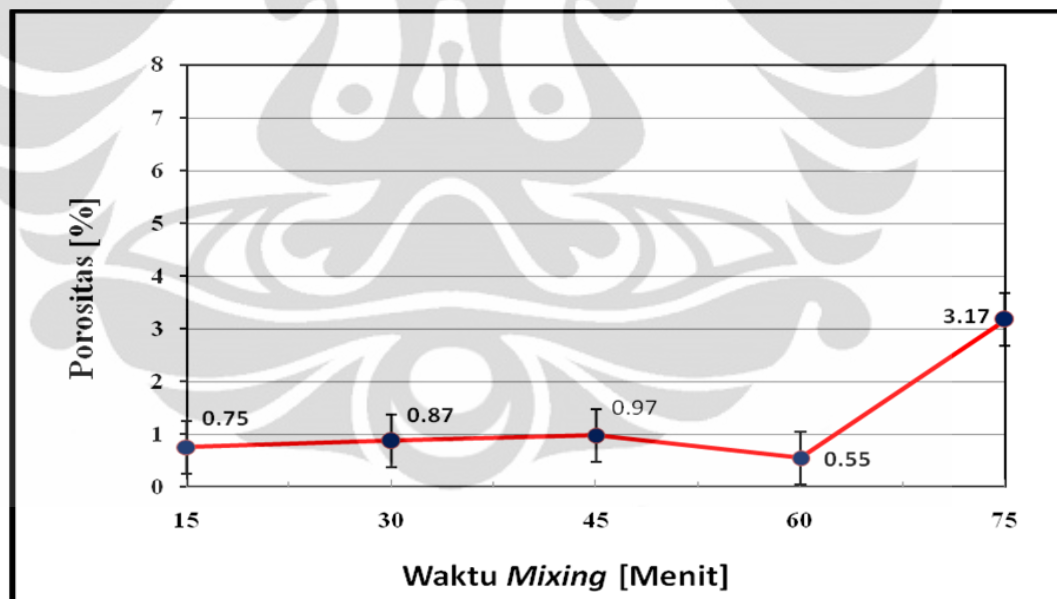
#### 4.2.2 Pengujian Porositas

Porositas merupakan salah satu parameter dalam menentukan kualitas performa suatu pelat bipolar. Diharapkan suatu pelat bipolar memiliki nilai

porositas serendah mungkin agar tidak mengganggu reaksi yang terjadi pada rangkaian sel tunam. Tabel 4.2 memperlihatkan data hasil pengujian porositas pada masing-masing pelat bipolar yang selanjutnya dikonversi dalam bentuk grafik yang terlihat pada Gambar 4.7.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Porositas

Waktu <i>Mixing</i> [menit]	Porositas [%]
15	0,75
30	0,87
45	0,97
60	0,55
75	3,17



Gambar 4.7 Pengaruh Peningkatan Waktu Campur terhadap Porositas.

Pada gambar 4.7, nilai porositas yang didapat sangat fluktuatif. Pada waktu campur 30 menit terjadi peningkatan nilai porositas sebesar 13,79% dari 0,75% menjadi 0,87%. Kemudian mengalami kenaikan kembali, seiring dengan meningkatnya waktu campur yaitu terlihat pada waktu 45 menit. Penurunan porositas kembali terjadi pada waktu campur 60 menit. Setelah itu terjadi



peningkatan nilai porositas yang sangat tajam pada waktu campur 75 menit.

Dengan adanya peningkatan waktu campur grafit EAF dan CB menyebabkan partikel CB semakin lama akan terdistribusi merata pada matriks, sehingga tidak terjadi pengelompokan. Hal ini akan semakin menurunkan porositas karena kerapatan ikatan partikel menjadi optimum akibat berkurangnya jarak antar agregat bahan pengisi.

Porositas juga dapat terbentuk akibat peristiwa pemadatan yang terlalu tinggi oleh tekanan yang tinggi yang menyebabkan epoksi tidak dapat mengisi rongga-rongga yang terbentuk akibat metanol yang menguap. Daerah-daerah yang seharusnya terisi oleh epoksi akan menjadi kosong dan rongga yang terbentuk tersebutlah yang menjadikan pelat berporos.

Penurunan tingkat porositas secara langsung akan berpengaruh terhadap sifat mekanis dan nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan berkaitan dengan berkurangnya jarak antar agregat bahan pengisi untuk menghasilkan penurunan nilai resistivitas pada daerah antar agregat sehingga berkontribusi dalam peningkatan nilai konduktivitas<sup>[20,46]</sup>.

Mengenai pengaruhnya terhadap sifat mekanis, tingkat porositas yang semakin kecil akan menyediakan lebih banyak ikatan yang terjadi antara antarmuka bahan pengisi sehingga diperlukan gaya yang lebih besar untuk memisahkan ikatan tersebut<sup>[47]</sup>.

Namun pada kenyataannya, dari hasil penelitian ini waktu campur yang paling lama sebesar 75 menit, menghasilkan nilai porositas yang paling besar yaitu 8,29%. Hal ini dikarenakan bakalan yang dibuat terlalu kering akibat terlalu lama mencampur grafit dan CB dengan epoksi dan *hardener*, sehingga bukan penguapan metanol yang mengakibatkan terbentuknya banyak poros melainkan oksigen dan gas-gas di udara yang masuk ke dalam bakalan akibat terlalu lama mengaduk di atas *hot plate*.

Hal lain yang juga berhubungan adalah mengenai tingkat porositas yang terkandung dalam sistem komposit, yakni dengan meningkatnya temperatur, meningkat pula ekspansi termal dari epoksi sehingga mobilitas molekular meningkat, maka tingkat porositas dalam sistem komposit yang diakumulasikan dari porositas yang terbentuk baik dari jarak antar partikel bahan penguat maupun

**Universitas Indonesia**

porositas yang terkandung pada struktur bahan penguat, akan menjadi semakin kecil. Kondisi tingkat porositas yang semakin kecil akan menyediakan lebih banyak ikatan yang terjadi antara antarmuka bahan pengisi karbon dengan matriks resin epoksi<sup>[20]</sup>.

Pada penelitian<sup>[44]</sup>, yang mengembangkan pelat bipolar komposit berbahan grafit/5% CB/resin epoksi dengan metode *compression moulding* pada tekanan 55 MPa dengan temperatur penekanan sebesar 70°C selama 4 jam, dihasilkan pelat dengan porositas sebesar 0,70%. Jika dibandingkan dengan penelitian ini yang menghasilkan porositas sebesar 0,75% pada tekanan 55 MPa dan temperatur penekanan 100°C. Temperatur penekanan yang meningkat diiringi dengan peningkatan porositas dikarenakan terjadi pergerakan termal atau mobilitas molekular dari polimer tersebut akibat dari peningkatan energi kinetik sehingga dapat mengurangi jarak antar agregat dan memisahkan agregat tersebut<sup>[48]</sup>.

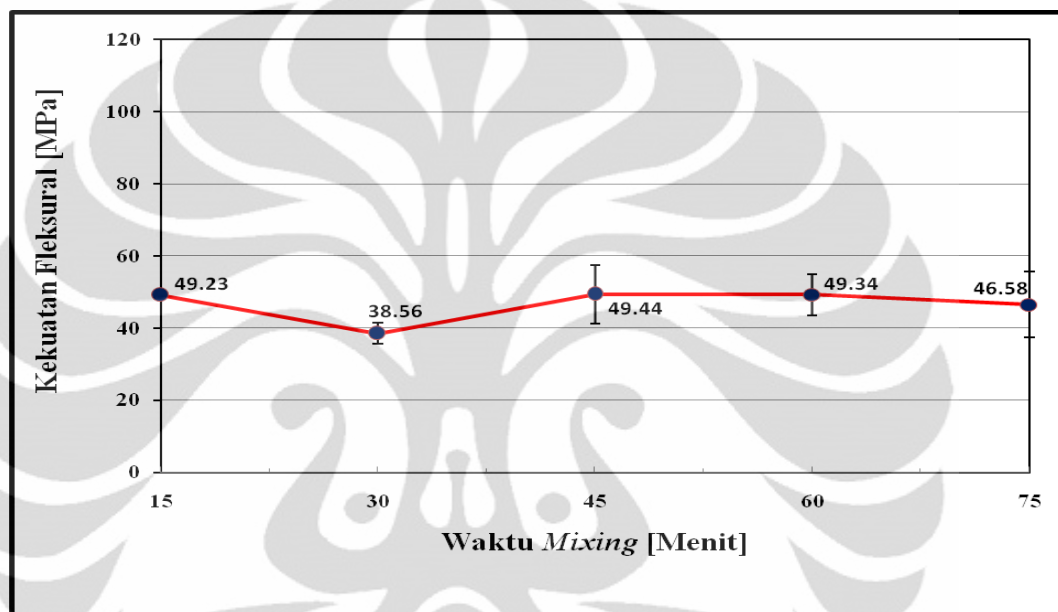
### 4.2.3 Pengujian Fleksural

Pelat bipolar yang baik harus memiliki kekuatan fleksural yaitu lebih besar dari 25 MPa. Hal ini dikarenakan pada saat pengaplikasiannya di dalam PEMFC, pelat bipolar tersebut akan mengalami tegangan fleksural dari setiap *stack* sel tunam serta tekanan dari gas, baik yang masuk maupun keluar dari sistem. Dengan kekuatan fleksural yang tinggi, pelat bipolar tidak mengalami keretakan atau kegagalan ketika mengalami suatu pembebanan fleksural. Tabel 4.3 menjelaskan data hasil uji fleksural yang dilakukan pada setiap sampel pelat bipolar yang selanjutnya dikonversi dalam bentuk grafik yang terlihat pada Gambar 4.8.

**Tabel 4.3.** Hasil Pengujian Fleksural

Waktu <i>Mixing</i> [menit]	Kekuatan Fleksural [MPa]
15	49,23
30	38,56
45	49,44
60	49,34
75	46,58

Peningkatan waktu pencampuran antar grafit EAF dan *carbon black* sampai dengan waktu campur optimum akan meningkatkan kekuatan fleksural. Gambar 4.8 menunjukkan bahwa pada peningkatan waktu campur dari 15 menit sampai 30 menit terjadi penurunan kekuatan fleksural sebesar 21,7%.Kemudian diikuti kenaikan sebesar 28,2% dari sebelumnya saat waktu campur 45 menit. Dan hingga waktu campur 75 menit kekuatan fleksural mengalami penurunan.



**Gambar 4.8** Pengaruh Peningkatan Waktu Campur terhadap Kekuatan Fleksural.

Ketika proses pencampuran tidak maksimal, pengelompokan *carbon black* dapat terjadi dimana partikel-partikel *carbon black* akan berkumpul pada daerah tertentu dan tidak tersebar secara merata sehingga meningkatkan ketidakhomogenan yang menyebabkan penurunan terhadap sifat mekanis pelat bipolar yang dihasilkan. Oleh karena itu dengan meningkatnya waktu pencampuran grafit EAF dengan CB menghasilkan campuran dengan distribusi merata sehingga kekuatan fleksural pun ikut meningkat.

Jika dilihat dari grafik 4.8, data yang didapat tidak sesuai. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan hampir semua pelat memiliki nilai kekuatan fleksural di angka 49 MPa. Namun ada 2 pelat yang memiliki angka rendah, yaitu di pelat dengan waktu campur 30 dan 75 menit. Hal ini dikarenakan pelat dengan waktu campur 30 menit, terdapat retak dengan besar 4-6 mm di sekeliling pelat.

Ini disebabkan karena saat proses *hotpress*, bakalan yang dibuat masih terlalu basah sehingga molekul-molekul metanol mengalami penguapan ketika dipanaskan dan menyumbangkan jumlah porositas dipermukaan pelat bipolar. Pada pelat dengan waktu campur 75 menit, mengalami kehangusan karena bakalan terlalu sering sehingga terbentuk banyak poros. Poros-poros ini membentuk rongga yang menjadi tempat awal terjadinya retakan sebelum pelat patah, sehingga kekuatan fleksural pun menurun. Namun secara keseluruhan, nilai kekuatan fleksural dari kelima pelat bipolar ini telah sesuai persyaratan teknis DOE, USA untuk karakteristik pelat bipolar, yaitu lebih besar dari 25 MPa.

Pada penelitian<sup>[49]</sup>, yang mengembangkan pelat bipolar komposit berbahan grafit/5% CB/resin epoksi dengan metode *compression moulding* pada tekanan 45 MPa dengan temperatur penekanan sebesar 100°C selama 4 jam, dihasilkan pelat dengan kekuatan fleksural sebesar 48,24 MPa. Jika dibandingkan dengan penelitian ini yang menghasilkan kekuatan fleksural sebesar 49,23% pada tekanan 55 MPa dan temperatur penekanan 100°C, dapat disimpulkan bahwa tekanan yang tinggi, menghasilkan nilai kekuatan fleksural yang lebih tinggi dikarenakan dengan meningkatnya tekanan sampai tekanan optimum, maka tingkat porositas dalam sistem komposit semakin kecil<sup>[20]</sup>. Kondisi tingkat porositas yang semakin kecil akan menyediakan lebih banyak ikatan yang terjadi antara antamuka matriks dan bahan pengisi sehingga menyediakan banyak jalur bagi mengalirnya elektron<sup>[20]</sup>.

Secara keseluruhan, nilai kekuatan fleksural yang dimiliki oleh masing-masing pelat yang dihasilkan memenuhi standar DOE untuk pelat bipolar, yakni lebih besar dari 25 MPa<sup>[23]</sup>.

#### 4.2.4 Pengujian Konduktivitas

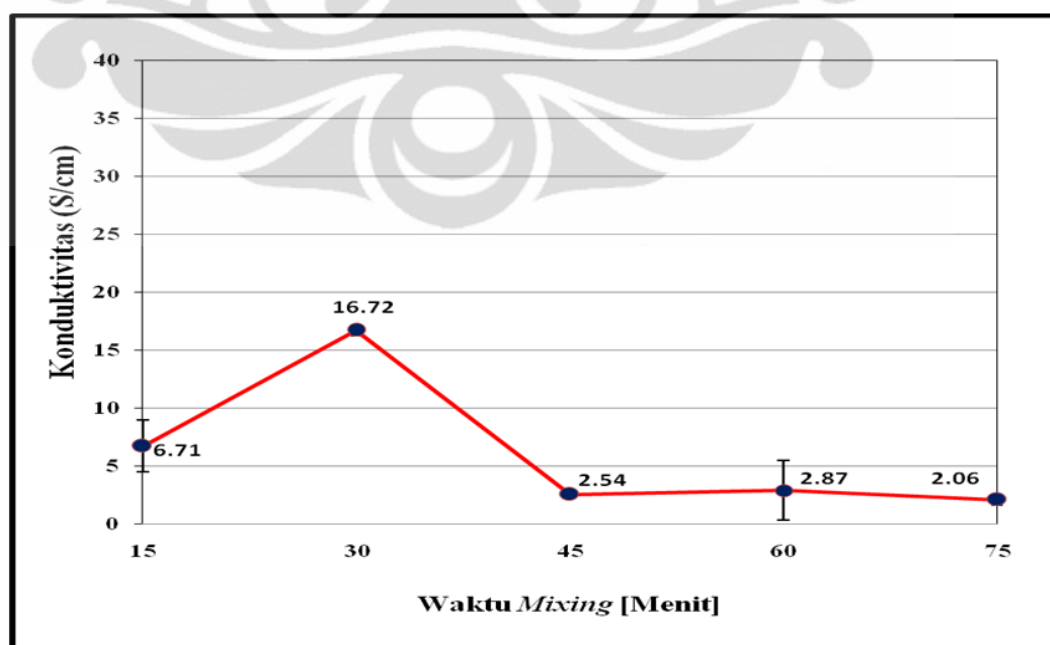
Material pelat bipolar harus memiliki sifat konduktivitas listrik yang baik untuk mengantarkan atau menghasilkan arus listrik karena pelat bipolar sangat berperan penting pada sistem sel tunam. Fungsi utama dari pelat bipolar tersebut adalah mengumpulkan dan mengalirkan arus dari kutub anoda ke kutub katoda.

Dari hasil pengukuran resistivitas atau hambatan yang dilakukan oleh alat *four point probe* akan didapatkan suatu nilai konduktivitas ( $S \cdot cm^{-1}$ ) pelat bipolar yang dapat dilihat pada Tabel 4.4. dan selanjutnya dikonversi dalam bentuk grafik pada Gambar 4.9

**Tabel 4.4.** Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik

Waktu <i>Mixing</i> [menit]	Konduktivitas Listrik [S/cm]
15	6,71
30	16,72
45	2,54
60	2,87
75	2,06

Peningkatan waktu pencampuran antar grafit EAF dan *carbon black* sampai dengan waktu campur optimum akan meningkatkan konduktivitas listrik pelat bipolar. Gambar 4.9 menunjukkan bahwa pada peningkatan waktu campur dari 15 menit sampai 30 menit terjadi peningkatan konduktivitas listrik pelat dan konduktivitas listrik kembali turun sampai waktu campur sebesar 75 menit.



**Gambar 4.9** Pengaruh Peningkatan Waktu Campur terhadap Konduktivitas Listrik.

Universitas Indonesia

Adanya peningkatan waktu pencampuran antara grafit EAF dengan *carbon black* seharusnya diikuti dengan peningkatan konduktivitas. Hal ini dikarenakan semakin meratanya distribusi *carbon black* di dalam grafit, sehingga tidak membentuk pengelompokan atau aglomerisasi yang menyebabkan partikel *carbon black* yang seharusnya mengisi *void* tidak efektif sehingga menyebabkan nilai resistansi meningkat.

Selain itu dengan meningkatnya waktu pencampuran tersebut, jarak antara partikel CB akan semakin dekat. Seperti yang telah dijelaskan bahwa *carbon black* dengan luas permukaan yang tinggi dapat mengumpulkan arus listrik dan membentuk jaringan karbon konduktif<sup>[24]</sup>. *Carbon black* berfungsi sebagai medium dari proses migrasi elektron di dalam grafit, sehingga dengan jarak antar partikel CB yang dekat akan menghasilkan kerapatan massa yang tinggi. Semakin kecil jarak rambatan aliran listrik maka nilai hambatan akan semakin rendah<sup>[50]</sup>.

Namun kenyataannya, waktu pencampuran yang paling rendah yaitu sebesar 15 menit menghasilkan nilai konduktivitas yaitu sebesar 6,71 S/cm. Hal ini dikarenakan terjadinya perbedaan metode dalam pembuatan sampel, dimana saat melakukan pencampuran antara epoksi dan *hardener* dengan campuran grafit dan CB dilakukan di mesin *planetary ball mill* sehingga menghasilkan campuran yang lebih merata dan homogen. Berbeda dengan metode ke empat sampel lainnya yang menggunakan *mixer* saat proses pencampuran antara epoksi dan *hardener* dengan campuran grafit dan CB. Nilai konduktivitas yang didapatkan dari lima pelat bipolar tersebut masih belum memenuhi target *Departement of Energy, USA* yaitu di atas 100 S/cm<sup>[23]</sup>.

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, pada penelitian<sup>[49]</sup>, yang mengembangkan pelat bipolar komposit berbahan grafit/5% CB/resin epoksi dengan metode *compression moulding* pada tekanan 45 MPa dengan temperatur penekanan sebesar 100°C selama 4 jam, dihasilkan pelat dengan konduktivitas sebesar  $2,43 \times 10^{-1}$  S/cm. Jika dibandingkan dengan penelitian ini yang menghasilkan konduktivitas sebesar 6,71 S/cm pada tekanan 55 MPa dan temperatur penekanan 100°C, dapat disimpulkan bahwa tekanan yang tinggi, menghasilkan nilai konduktivitas yang tinggi pula.

Peningkatan nilai konduktivitas listrik dapat terjadi seiring dengan peningkatan tekanan, yang disebabkan karena berkurangnya jarak antar partikel grafit dan meningkatnya densitas dari partikel grafit, sehingga menghasilkan ketersediaan daerah atau jalur konduktivitas elektron (*electron conductivity path*) yang semakin banyak<sup>[20]</sup>.

#### 4.3 Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar dengan Kenaikan Waktu Campur Grafit EAF dan *Carbon Black*

Dari hasil penelitian komposit pelat bipolar dengan matriks polimer dan penguat berupa grafit EAF dan *carbon black* dengan variasi waktu campur 15-75 menit, maka dapat dilakukan suatu perbandingan antara sifat-sifat komposit pada setiap pelat yang dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut ini.

**Tabel 4.5** Perbandingan Karakteristik Pelat dengan Variasi Kenaikan Waktu Campur Grafit EAF dan *Carbon Black*.

Waktu Campur [Menit]	Karakteristik Pelat Bipolar			
	Densitas [gr/cm <sup>3</sup> ]	Porositas [%]	Kekuatan Fleksural [MPa]	Konduktivitas [S/cm]
15	1,62	0,75	49,23	6,71
30	1,69	0,87	38,56	16,72
45	1,73	0,97	49,44	2,54
60	1,73	0,55	49,34	2,87
75	1,63	3,17	46,58	2,06

Dari Tabel 4.5. dapat dilihat diambil kesimpulan bahwa pelat bipolar yang memiliki nilai karakteristik yang optimum terdapat pada pecampuran antara grafit EAF dengan *carbon black* selama 15 menit. Pada waktu campur 15 menit didapatkan nilai konduktivitas dan nilai fleksural dengan perbandingan sebesar

0,42% dengan nilai fleksural tertinggi. Untuk nilai densitas dan porsitas pada waktu campur 15 menit telah memenuhi standar DOE pelat bipolar ideal.

Secara keseluruhan nilai yang didapat telah hampir mencapai standar DOE. Penelitian lebih lanjut dibutuhkan untuk menghasilkan perbedaan metode pembuatan sampel dengan lebih memperhatikan variabel proses pembuatan. Variabel dan metode proses yang baik menjadi parameter yang tepat untuk mengoptimalkan sifat akhir komposit yang dihasilkan.





## BAB 5

### KESIMPULAN

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

1. Pelat bipolar yang dihasilkan dengan menggunakan waktu campur grafit EAF dan *carbon black* selama 15 menit memiliki performa terbaik dengan nilai densitas sebesar  $1.62 \text{ gr/cm}^3$ , porositas sebesar 0,75%, kekuatan fleksural sebesar 49,23 MPa, serta nilai konduktivitas listrik sebesar 6,71 S/cm, serta
2. Nilai densitas tertinggi sebesar  $1,73 \text{ g/cm}^3$  (45 dan 60 menit) dan terendah sebesar  $1.62 \text{ g/cm}^3$  (15 menit). Kelima pelat bipolar memiliki nilai densitas yang sudah memenuhi standar DOE, USA, yaitu kurang dari  $5 \text{ gr/cm}^3$ .
3. Kekuatan fleksural kelima pelat bipolar yang dihasilkan dengan variasi waktu campur (15-75 menit) secara keseluruhan telah sesuai standar DOE, USA, yaitu lebih besar dari 25 Mpa. Nilai minimum 38.56 MPa (30 menit) dan maksimum 49.44 Mpa (45 menit).
4. Dari penelitian ini, karakteristik yang telah memenuhi standar DOE yaitu nilai densitas ( $< 5 \text{ g/cm}^3$ ) dan kekuatan fleksural ( $> 25 \text{ Mpa}$ ). Sedangkan untuk porositas sebagian belum memenuhi standar ( $< 1\%$ ) dan untuk konduktivitas masih jauh dari standar yang telah ditetapkan ( $> 100 \text{ S/cm}$ ).

## DAFTAR REFERENSI

- [1] Diakses pada tanggal 6 April 2011 pukul 20.00 dari:  
<http://www.alpensteel.com/article/65-109-energi-fuel-cell-sel-bahan-bakar/1768--teknologi-fuel-cell-sebagai-energi-alternatif.html>
- [2] Pujowidodo, Hariyotejo. *Pengembangan Model Matematis untuk Disain dan Analisis Sel Tunam Membran Pertukaran Proton (PEMFC)*. Departemen Mesin, FTUI. 2009.
- [3] Listiani, Eniya Dewi. *Mass Transfer Study On Polymer Electrolyte Fuel Cell*. Seminar Nasional Teknologi. 2007.
- [4] Steele, Brian C. H. \* and Heinzl, Angelika. *Materials for fuel-cell technologies*. insight review articles. November 2001.
- [5] Yuhua Wang, *Thesis: Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*, Ontario, Canada: University of Waterloo, 2006.
- [6] Diakses pada tanggal 06 April 2011 pukul 21.15 dari:  
<http://www.materials.qmul.ac.uk/indvisit/2003/>
- [7] Stambouli, A. Boudghene, and E. Traversa. *Fuel cells, an Alternative to Standard Sources of Energy*. University of Roma, 'Tor Vergata', 2001.
- [8] Haile, Sossina M. *Fuel Cell Materials and Components*. Department of Materials Science and of Chemical Engineering, California Institute of Technology. 2003: 138-782.
- [9] Rayment, Chris. *Introduction to Fuel Cell Technology*. Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame. 2003.
- [10] Kakati, Biraj, and Deka Dhanapati. *Effect of Resin Matrix Precursor on the Properties of Graphite Composite Bipolar plate for PEM Fuel Cell*. *Energy & Fuel* 21. 2007: 1681-1687.
- [11] Diakses pada tanggal 15 April 2011 pukul 21.00 dari:  
[http://www.chem-is-try.org/artikel\\_kimia/kimia\\_fisika/sel-bahan-bakar\\_solusi-energi-masa-depan/](http://www.chem-is-try.org/artikel_kimia/kimia_fisika/sel-bahan-bakar_solusi-energi-masa-depan/)
- [12] Hendrata, Suhada. *Fuel Cell sebagai Penghasil Energi Abad 21*. Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Mesin, Universitas Kristen Petra. 2008.
- [13] Jacobson, Allan J. *Alternative Energy Technologies Fuel Cells*. Article. University of Houston. 2008.

- [14] Besmann, T., Klett, et al. *Carbon/Carbon Composite Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cells*. J. Electrochem. Soc. 2000.
- [15] Busick, D.N., Wilson, S., *Low-Cost Composite Materials for PEFC Bipolar Plates*. Fuel Cells Bulletin. 1999.
- [16] Cunningham, Brent. *The Development of Compression Moldable Polymer Composite Bipolar Plates for Fuel Cells*. Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University. 2007.
- [17] Diakses pada tanggal 17 April 2011 pukul 19.00:  
<http://aulia09.myblogrepublika.com/2009/03/09/pengembangan-nanokatalis-dan-nanokomposit-material-dalam-energi-alternatif-polymer-electrolyte-fuel-cell/>
- [18] Hermann, A, Chaudhuri, T, Sagnol, P. *Bipolar plates for PEM fuel cells: A review*. International Journal of Hydrogen Energy. 2005: 1297 – 1302.
- [19] Baurens, Pierre and Jean, Philippe. *Inovative Concepts for Bipolar Plates*. Technological Research Division, CLEFS CEA, No. 50/51, 2004-2005.
- [20] Ling Du. *Dissertation: Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. 2008.
- [21] Jalani, Nikhil H.. *Development of Nanocomposite Polymer Electrolyte Membranes for Higher Temperature PEM Fuel Cells*. Chemical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, 2006.
- [22] Diakses pada tanggal 15 April 2011 pukul 21.00 dari:  
[http://www.thirdorbitpower.com/PEM\\_mechanism.html](http://www.thirdorbitpower.com/PEM_mechanism.html)
- [23] V. Mehta dan J.S. Cooper. *Review and Analysis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing*. Jurnal of Power Sources. 2003: 114,32-53.
- [24] Hsu-Chiang Kuan, et al. *Preparation, Electrical, Mechanical, and Thermal Properties of Composite Bipolar plate for a Fuel Cell*. Journal of Power Sources, 2004.
- [25] Li, Xianguo and Sabir, Imran. *Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs*. Department of Mechanical Engineering, 2004.
- [26] R.L. Borup, N.E. Vanderborgh *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 1995
- [27] Xiao Zi Yuan, et al. *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells - From Materials to Processing*. Vancouver: Department of Chemical and Biological Engineering, University of British Columbia, 2006: p 45-60.

- [28] Joshua Hertz, GJ La O', Jungik Kim. *Fuel Cells Fundamentals The Materials Science of Renewable Energy*. Parsons Corporation .2006.
- [29] Yuhua Wang. *Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. University of Waterloo, Canada. 2006.
- [30] Diakses pada tanggal 20 Mei 2011 pukul 21.00 dari:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoset\\_polymer\\_matrices](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoset_polymer_matrices)
- [31] Diakses pada tanggal 20 Mei 2011 pukul 21.00 dari:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy>
- [32] Harper.A. Charles. *Modern plastics handbook 2000*. USA. 2000: p 2.62.
- [33] ASM International Committee. *Casting*. ASM Metals Handbook Vol. 15. 9<sup>th</sup> ed. 2001.
- [34] Nicolas, Probst, and Thomas, Gruenberger. *New Carbon Nano-materials and Carbon Black: Threats and Opportunities*. Belgium. Timcal 173.
- [35] Zhang Jie, Zou Yan-wen, and HE Jun. *Influence of Graphite Particle Size and Its Shape on Performance of Carbon Composite Bipolar Plate*. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [36] Jang, Borz. "*Advanced Polymer Composites*". Astm International United States of America. 1994.
- [37] Diakses pada tanggal 20 Mei 2011 pukul 21.10 dari:  
<http://seftianandriasandi.wordpress.com/2011/03/08/unsur-golongan-utama-periode-2-dan-3-dan-senyawanya/>
- [38] Diakses pada tanggal 20 Mei 2011 pukul 21.00 dari:  
[www.graftech.com/getdoc/46c98ecfcc4b4345aefd8c913367d29/gti\\_download.aspx](http://www.graftech.com/getdoc/46c98ecfcc4b4345aefd8c913367d29/gti_download.aspx)
- [39] Putra, Setiadi. *Skripsi: Pengaruh Tekanan Compression Molding terhadap Performa Pelat Bipolar Komposit Karbon EAF/Resin Epoksi dengan Komposisi 5% Carbon Black*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010.
- [40] Weber, Erik H.. *Dissertation: Development and Modeling of Thermally Conductive Polymer/Carbon Composites*. Bachelor of Science, Michigan Technological University, 1999.
- [41] Jan-chan Huang. *Carbon Black Filled Conducting Polymers and Polymer Blends*. Plastics Engineering Department, University of Massachusetts Lowell, Lowell, 2002.

- [42] Diakses pada tanggal 20 Mei 2011 pukul 21.00 dari:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol>
- [43] Diakses pada tanggal 21 Juni 2011 pukul 11.00 dari:  
[http://www.mtixtl.com/sfm-1bench-topplanetaryautomaticballmills\\_with\\_4\\_aluminajars500ml.aspx](http://www.mtixtl.com/sfm-1bench-topplanetaryautomaticballmills_with_4_aluminajars500ml.aspx)
- [44] Indrawati, Heny. *Pengaruh Tekanan terhadap Karakteristik Pelat Bipolar PEMFC Karbon-Karbon Komposit dengan Penambahan 5%wt Carbon Black*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010
- [45] T. Derieth et. al.. *Development of Highly Filled Graphite Compounds as Bipolar Plate Materials for Low and High Temperature PEM Fuel Cells*. Journal of New Materials for Electrochemical Systems 11, 2008: page 21-29.
- [46] H.S. Lee, et al., ed. *Evaluation of Graphite Composite Bipolar Plate for PEM (Proton Exchange Membrane) Fuel Cell: Electrical, Mechanical, and Molding Properties*. South Korea, 2006.
- [47] Kakati B. K. et al. *The Electrical Conductivity of A Composite Bipolar Plate for Fuel Cell Applications*. Department of Chemical Engineering, IIT Guwahati, Guwahati 781039, Assam, India, 2009.
- [48] Li, Q.Q. et al. *Temperature Dependence of Electrical Properties of The Carbon Nanotube/Polymer Composites*. eXPRESS Polymer Letters Vol. 3. No. 12, 2009.
- [49] Amalia, Dinda Putri. *Skripsi: Pengaruh Temperatur Compression Molding Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar PEMFC Komposit Grafit EAF/Epoksi Dan 5% Carbon Black*. Depok: Departemen Teknik Metalurgi dan Material. 2011.
- [50] Suhandi, Andi, et al., ed. *Research on PEMFC Graphite Composite Bipolar Plate Influenced by Composition of Filler and Binder*. Tangerang: Puspiptek Serpong, 2008
- [51] Diakses pada tanggal 23 Juni 2011 pukul 22.00 dari:  
[http://www.simetric.co.uk/si\\_water.htm](http://www.simetric.co.uk/si_water.htm)

## Lampiran 1. Hasil Pengujian Densitas

Sampel	Massa di Udara (A) [gr]	Massa dalam Air (B) [gr]	A-B [gr]	$\rho$ Air [gr/cm <sup>3</sup> ]	$\rho$ Sampel [gr/cm <sup>3</sup> ]	$\rho$ Sampel Rata-Rata [gr/cm <sup>3</sup> ]
				T = 28 <sup>0</sup> C		
<b>Pelat Bipolar 1 (5% Carbon Black; 15 menit)</b>						
1	2,35	0,91	1,44	0,996232	1,63	1,62
2	2,05	0,69	1,36	0,996232	1,50	
3	2,29	0,92	1,37	0,996232	1,67	
4	2,41	0,96	1,45	0,996232	1,66	
5	2,49	0,96	1,53	0,996232	1,62	
6	2,49	0,98	1,51	0,996232	1,64	
<b>Pelat Bipolar 2 (5% Carbon Black; 30 menit)</b>						
1	2,17	0,89	1,28	0,996232	1,69	1,69
2	1,92	0,77	1,15	0,996232	1,66	
3	2,04	0,86	1,18	0,996232	1,72	
4	2,03	0,84	1,19	0,996232	1,70	
5	2,17	0,89	1,28	0,996232	1,69	
6	1,97	0,81	1,16	0,996232	1,69	
<b>Pelat Bipolar 3 (5% Carbon Black; 45 menit)</b>						
1	2,41	1,04	1,37	0,996232	1,75	1,73
2	2,47	1,05	1,42	0,996232	1,73	
3	2,49	1,06	1,43	0,996232	1,73	
4	2,41	1,02	1,39	0,996232	1,73	
5	2,55	1,08	1,47	0,996232	1,73	
6	2,57	1,09	1,48	0,996232	1,73	
<b>Pelat Bipolar 4 (5% Carbon Black; 60 menit)</b>						
1	2,17	0,94	1,23	0,996232	1,76	1,73
2	2,38	1,00	1,38	0,996232	1,72	
3	2,3	0,97	1,33	0,996232	1,72	
4	2,41	1,02	1,39	0,996232	1,73	
5	2,21	0,93	1,28	0,996232	1,72	
6	2,6	1,09	1,51	0,996232	1,72	
<b>Pelat Bipolar 5 (5% Carbon Black; 75 menit)</b>						
1	1,71	0,59	1,12	0,996232	1,52	1,63
2	2,10	0,78	1,32	0,996232	1,58	
3	2,39	0,90	1,49	0,996232	1,60	
4	2,21	0,96	1,25	0,996232	1,76	
5	2,45	1,05	1,40	0,996232	1,74	
6	2,09	0,77	1,32	0,996232	1,58	

(lanjutan)

Contoh perhitungan data densitas sampel pelat bipolar 1 (15 menit):

$$\rho_{\text{sampel}} = \frac{A}{A - B} \times \rho_{\text{air}} = \frac{2,35}{2,35 - 0,91} \times 0.996232 = 1,63$$



## Lampiran 2. Hasil Pengujian Porositas

Sampel	Dry Weight (D) [gr]	Suspended Weight (S) [gr]	Saturated Weight (Sw) [gr]	Porositas [%]	Porositas Rata-Rata [%]
<b>Pelat Bipolar 1 (5% Carbon Black; 15 menit)</b>					
1	2,05	0,82	2,06	0,81	0,75
2	2,29	0,92	2,30	0,73	
3	2,35	0,95	2,36	0,71	
<b>Pelat Bipolar 2 (5% Carbon Black; 30 menit)</b>					
1	1,97	0,81	1,98	0,86	0,87
2	1,92	0,80	1,93	0,89	
3	2,03	0,86	2,04	0,85	
<b>Pelat Bipolar 3 (5% Carbon Black; 45 menit)</b>					
1	2,41	1,04	2,42	0,73	0,97
2	2,47	1,06	2,48	0,71	
3	2,41	1,06	2,43	1,48	
<b>Pelat Bipolar 4 (5% Carbon Black; 60 menit)</b>					
1	2,15	0,93	2,16	0,82	0,55
2	2,28	1,03	2,28	0,00	
3	2,19	0,97	2,2	0,82	
<b>Pelat Bipolar 5 (5% Carbon Black; 75 menit)</b>					
1	1,71	0,92	1,73	2,53	3,17
2	2,1	1,04	2,15	4,72	
3	2,21	0,88	2,24	2,26	

Contoh perhitungan data porositas sampel pelat bipolar 1 (15 menit):

$$\% \text{ Porositas} = \frac{Sw - D}{D - S} \times 100\% = \frac{2,06 - 2,05}{2,05 - 0,82} \times 100\% = 0,81\%$$



## Lampiran 3. Hasil Pengujian Kekuatan Fleksural

Sampel	Tebal (D)	Lebar (B)	Panjang (L)	Beban (P)	Kekuatan Fleksural [MPa]	Kekuatan Fleksural Rata-Rata [MPa]
	[mm]	[mm]	[mm]	[N]		
<b>Pelat Bipolar 1 (5% Carbon Black; 15 menit)</b>						
1	3,00	13,00	120,00	32,00	49,23*	49,23
2	3,00	13,00	120,00	32,00	49,23*	
3	3,00	13,00	120,00	32,00	49,23*	
4	3,00	13,00	120,00	27,20	41,85	
<b>Pelat Bipolar 2 (5% Carbon Black; 30 menit)</b>						
1	3,00	13,00	120,00	24,00	36,92*	38,56
2	3,00	13,00	120,00	24,00	36,92*	
3	3,00	13,00	120,00	27,20	41,85*	
4	3,00	12,50	120,00	24,00	38,40	
<b>Pelat Bipolar 3 (5% Carbon Black; 45 menit)</b>						
1	3,10	13,50	120,00	40,00	55,50*	49,44
2	3,00	14,00	120,00	36,80	52,57*	
3	3,30	13,80	120,00	33,60	40,24*	
4	3,30	13,80	120,00	32,00	38,33	
<b>Pelat Bipolar 4 (5% Carbon Black; 60 menit)</b>						
1	3,40	15,20	120,00	44,80	45,89*	49,34
2	3,20	15,20	120,00	40,00	46,26*	
3	3,30	14,20	120,00	48,00	55,87*	
4	3,30	15,70	120,00	36,80	38,74	
<b>Pelat Bipolar 5 (5% Carbon Black; 75 menit)</b>						
1	3,00	13,00	120,00	35,20	54,15*	46,58
2	3,00	13,20	120,00	24,00	36,36*	
3	3,00	13,00	120,00	32,00	49,23*	
4	3,00	13,50	120,00	24,00	35,56	

Ket: \* = Data yang dipakai pada perhitungan fleksural rata-rata

Contoh perhitungan data fleksural sampel pelat bipolar 1 (15 menit):

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2BD^2} = \frac{3 \times 32,20 \times 120}{2 \times 13,00 \times 3^2} = 49,23 \text{ MPa}$$

## Lampiran 4. Hasil Pengujian Konduktivitas

Sampel	Pengujian Resistensi [ $\Omega$ .cm]	Konduktivitas [S/cm]	Konduktivitas Rata-Rata [S/cm]
<b>Pelat Bipolar 1 (5% Carbon Black; 15 menit)</b>			
1	0,23	4,31*	6,71
2	0,14	7,12*	
3	0,11	8,72*	
4	1,62	0,62	
5	4,79	0,21	
6	9,38	0,11	
<b>Pelat Bipolar 2 (5% Carbon Black; 30 menit)</b>			
1	0,06	16,19*	16,72
2	0,06	16,95*	
3	0,06	17,02*	
4	0,04	23,94	
5	0,09	11,59	
6	2,21	0,45	
<b>Pelat Bipolar 3 (5% Carbon Black; 45 menit)</b>			
1	0,43	2,33*	2,54
2	0,38	2,60*	
3	0,37	2,69*	
4	0,23	4,44	
5	0,16	6,12	
6	0,75	1,33	
<b>Pelat Bipolar 4 (5% Carbon Black; 60 menit)</b>			
1	0,36	2,78*	2,87
2	2,77	0,36*	
3	0,18	5,48*	
4	5,73	0,17	
5	4,83	0,21	
6	5,30	0,19	
<b>Pelat Bipolar 5 (5% Carbon Black; 75 menit)</b>			
1	0,47	2,11*	2,06
2	0,40	2,53*	
3	0,65	1,55*	
4	3,44	0,29	
5	6,25	0,16	
6	10,54	0,09	

(lanjutan)


Ket: \* = Data yang dipakai pada perhitungan konduktivitas rata-rata


Contoh perhitungan data konduktivitas sampel pelat bipolar 1 (15 menit):

$$C = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0,23} = 4,31 \text{ S/cm}$$



## Lampiran 5. Spesifikasi Resin Epoksi




Technical Information

---

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

**Characteristics**


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

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

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

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

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



## Lampiran 6. Spesifikasi Epoksi *Hardener*

TECHNICAL DATA SHEET	
EPOXY HARDENER V-140	
Epoxy Hardener V-140 is a reactive polyamide resin based on dimerized fatty acid and polyamines and designed for use with solid or liquid epoxy resin. Epoxy Hardener V-140 offers ambient cure, excellent adhesion and resistance properties which may be used in high solid coating, adhesive, sealant, primer, and enamel paint formulations, putties and small casting.	
<b>SPECIFICATION :</b>	
Appearance	: Brown clear liquid
Colour (gardner)	: <10
Viscosity (poise/25°C)	: 100-200
Amine Value (mg KOH/g)	: 335-550
<b>TYPICAL PROPERTIES :</b>	
Theoretical Amino Hydrogen Equi. Wt.	: 105
Solid %	: 100
Mix ratio with 190 EEW Epoxy Liquid	: 55 (phr)
<b>TYPICAL PROPERTIES IN A CURED COATING :</b>	
Tack Free Time, hours	: 5
Pot Life, minutes	: 120
Geltime, minutes	: 108
Through Cure Time, hours	: 23
<b>TYPICAL CURED RESIN PROPERTIES :</b>	
Hardness (shoro D)	: 84
Tensile Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 410
Flexural Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 810
Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 740
Shear Adhesive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	: 160
<b>CHEMICAL RESISTANCE PROPERTIES :</b>	
(weight change after 10 days immersion, %)	
Water destilated	: 0.4
10% Hydrochloric Acid	: 1.0
10% Sodium Hydroxide	: 0.5
5% Sodium Chloride	: 0.5
10% Sulfuric Acid	: 1.3
Methyl Ethyl Ketone	: 35
Xylene	: 0.6
Mineral Spirits	: 0.1

PT. Duster Kimia  
JAWABTA

## Lampiran 7. Spesifikasi Grafit EAF

WED, 29-JUL-09 12:21    DIV SSP 11 PTKS/CLG    82 0254 371184    P. 0

CILEGON

INVENTORY CONTROL SYSTEM    Item No : 00908011

DATE : 04.12.2007

GROUP/CLASS : 443019132

Nato-name : ELECTRODE,

Material Code	Material Unit	B O H	Min	Max
00908011	KG	9.000	50,000.000	150,000.000

NAME & SPECIFICATION - GROUP

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 BACH SET POLE & NIPPLE:+/- 410KG

ASH CONTENT'S:0.5% MAX

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

COMPLETE WITH ACCESSORIES :

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

MANUFACTURE :

GENSUPP ELECTRODE-ARC-D406MMX1800MM-20-46KA

**Lampiran 8. Spesifikasi Metanol**

Formula	CH <sub>3</sub> OH
Massa	32.05 gr/mol
Penampakan	Cairan tidak berwarna
Densitas	0.7918 gr/cm <sup>3</sup>
Titik Leleh	-97 °C / -142,9 °F / 176 K
Titik Didih	64,7 °C / 148,4 °F / 337,8 K
Kelarutan Dalam Air	Larut

Lampiran 9. Tabel densitas air<sup>[51]</sup>

	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








(lanjutan)

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 10.** Peralatan yang Digunakan Pada Penelitian

Nama Alat	Foto Alat
<p><i>Beaker Glass</i> ukuran 100 mL dan 1 L serta gelas ukur 50 mL</p>	
<p><i>Planetary Ball Mill</i></p>	
<p>Mesin Pengguncang</p>	
<p>Timbangan Digital Serta Alat Pengujian Densitas dan Porositas</p>	
<p><i>Mixer</i></p>	

(lanjutan)

<p><i>Hot Plate Magnetic Stirring</i></p>	 A photograph of a laboratory hot plate magnetic stirrer. It features a white base with two circular control knobs on the left and a central stirring area. The device is placed on a light-colored surface.
<p><i>Cetakan Stainless Steel</i></p>	 A photograph of a stainless steel casting machine. It has a complex mechanical structure with a central vertical rod and a base for holding a mold. The machine is mounted on a wooden table.
<p><i>Mesin Hydraulic Press</i></p>	 A photograph of a red hydraulic press. It has a sturdy metal frame with a central vertical column and a horizontal crossbar. The press is used for compressing materials.
<p><i>Conductivity Four Point Probe Test Machine</i></p>	 A photograph of a four-point probe test machine. It consists of a white base with a black control panel and a central probe assembly. The machine is used for measuring the conductivity of materials.
<p><i>Universal Testing Machine</i></p>	 A photograph of a universal testing machine. It has a large, light blue metal frame with a central vertical column and a horizontal crossbar. The machine is used for testing the mechanical properties of materials.

Universitas Indonesia