



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN TEKANAN
COMPRESSION MOULDING TERHADAP KARAKTERISTIK
PELAT BIPOLAR KOMPOSIT (*EPOXY/CARBON EAF-10%CB*)
UNTUK APLIKASI PEMFC**

SKRIPSI

**DESTO WAHYU NOVIANTO
0606074735**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN TEKANAN
COMPRESSION MOULDING TERHADAP KARAKTERISTIK
PELAT BIPOLAR KOMPOSIT (*EPOXY/CARBON EAF-10%CB*)
UNTUK APLIKASI PEMFC**

SKRIPSI

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

**DESTO WAHYU NOVIANTO
0606074735**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Desto Wahyu Novianto

NPM : 0606074735

Tanda Tangan :

Tanggal : 9 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Desto Wahyu Novianto
NPM : 0606074735
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Penambahan Tekanan *Compression Moulding* Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar Komposit (*Epoxy/Carbon EAF-10%CB*) untuk Aplikasi PEMFC

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

DEWAN PENGUJI

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

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Juli 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadirat ALLAH SWT atas segala rahmat dan nikmat yang diberikan kepada saya hingga detik ini. Salah satunya adalah hasil rangkaian kegiatan penelitian yang tertulis dalam tiap lembar karya ilmiah ini. Selama melalui proses tersebut saya banyak mendapat dukungan moril maupun materil dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini perkenankan saya menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Ir. Yunita Sadeli, M.Sc & Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing saya dalam menyelesaikan karya ilmiah ini.
2. Pak Andi Suhandi, Pak Ahmad Subhan, Pak Joko, Mas Hendra, dan Mas Slamet dari Pusat Penelitian Fisika LIPI yang telah banyak membantu saya dari segi teknis.
3. Segenap keluarga IMMt dan karyawan Departemen Metalurgi & Material yang telah memberi saya pengalaman terbaik selama menjadi mahasiswa.
4. Sahabat kita semua Alm. Ari Azhari yang hingga detik terakhir menunjukkan semangat perjuangan dan pertemanan yang tidak akan pernah saya lupakan.
5. Sahabat-sahabat saya di tim KFC (Kelompok *Fuel Cell*): Setiadi P, Kenya Diestha L, Rio K, Farah F, Gabriel S, Dania F, dan Beringin S.
6. Kawan seperjuangan SMAN 4 Bekasi di FTUI yang selalu menginspirasi.
7. Keluarga besar, terutama kepada kedua orang tua dan kedua adik yang saya cintai dan banggakan. Karya ini terutama saya dedikasikan untuk kalian.

Meskipun jauh dari kesempurnaan, saya berharap karya ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di Indonesia.

Depok, 9 Juli 2010

Penulis

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

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

Nama : Desto Wahyu Novianto
NPM : 0606074735
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Pengaruh Penambahan Tekanan *Compression Moulding* Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar Komposit (*Epoxy/Carbon EAF-10%CB*) untuk Aplikasi PEMFC

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan 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 : 9 Juli 2010

Yang menyatakan

(Desto Wahyu Novianto)

ABSTRAK

Nama : Desto Wahyu Novianto
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Penambahan Tekanan *Compression Moulding* Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar Komposit (*Epoxy/Carbon EAF-10% CB*) untuk Aplikasi PEMFC

Pelat bipolar merupakan komponen penting dalam PEM *fuel cell* yang berfungsi mendistribusikan bahan bakar gas dan mengalirkan arus listrik antar sel tunggal. Pelat bipolar berkontribusi terhadap peningkatan berat, volume, dan biaya PEM *fuel cell*. Oleh karena itu dibutuhkan material penyusun pelat bipolar yang mampu mereduksi densitas dan biaya PEM *fuel cell*, salah satunya adalah material karbon-polimer komposit. Pada penelitian ini, pelat bipolar karbon-polimer komposit untuk PEM *fuel cell* dibuat dengan metode *compression moulding*. Partikel grafit EAF (*Electric Arc Furnace*) dan partikel *carbon black* dicampurkan dengan resin epoksi sebagai bahan utama penyusun komposit. *Carbon black* dibuat melalui proses karbonisasi pada temperatur 600°C selama 10 jam dalam kondisi gas inert (hidrogen) dengan menggunakan sabut kelapa sebagai bahan baku. Komposit dicetak pada temperatur 70°C selama 4 jam di bawah kondisi tekanan 350 kg/cm², 350 kg/cm², 400 kg/cm², dan 450 kg/cm². Hasil peningkatan tekanan *compression moulding* menunjukkan pengaruh terhadap peningkatan kekuatan fleksural dan konduktivitas listrik. Perolehan kekuatan fleksural tertinggi senilai 14,80 MPa, dan konduktivitas listrik tertinggi senilai 0,32 S/cm.

Kata kunci:

PEM *fuel cell*, pelat bipolar, *compression moulding*, resin epoksi, grafit EAF, *carbon black*, karbonisasi, kekuatan fleksural, konduktivitas listrik.

ABSTRACT

Name : Desto Wahyu Novianto
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Judul : The Effect of Increased Pressure of Compression Moulding on Characteristics of Carbon-Polymer Composite Bipolar Plate (Epoxy/Carbon EAF-10% CB) for PEMFC Application

Bipolar plates are key component of PEM fuel cell that is used to distribute fuel gas (H_2 and O_2) and to conduct electrical current between single cells. Bipolar plates contribute in increasing the weight, volume, and cost of PEM fuel cell. Therefore, it needs bipolar plate substantial materials that can reduce the density and PEM fuel cell cost, one of those materials is carbon-polymer composite. In this research, a carbon-polymer composite bipolar plate for a PEM fuel cell has been prepared by a compression moulding method. Graphite EAF (Electric Arc Furnace) particles and carbon black particles mixed with epoxy resin were used as the main substances of composite. Carbon black has been prepared by carbonization process at $600^\circ C$ for 10 hours under gaseous inert (hydrogen) condition with hair of coconut shell as the raw material. The composites were molded at $70^\circ C$ for 4 hours under pressure conditions 350 kg/cm^2 , 350 kg/cm^2 , 400 kg/cm^2 , and 450 kg/cm^2 . The result showed that with increase of pressure of compression moulding, the flexural strength and electrical conductivity increased. The highest flexural strength obtained was 14.8 MPa, and the highest conductivity obtained was 0.32 S/cm.

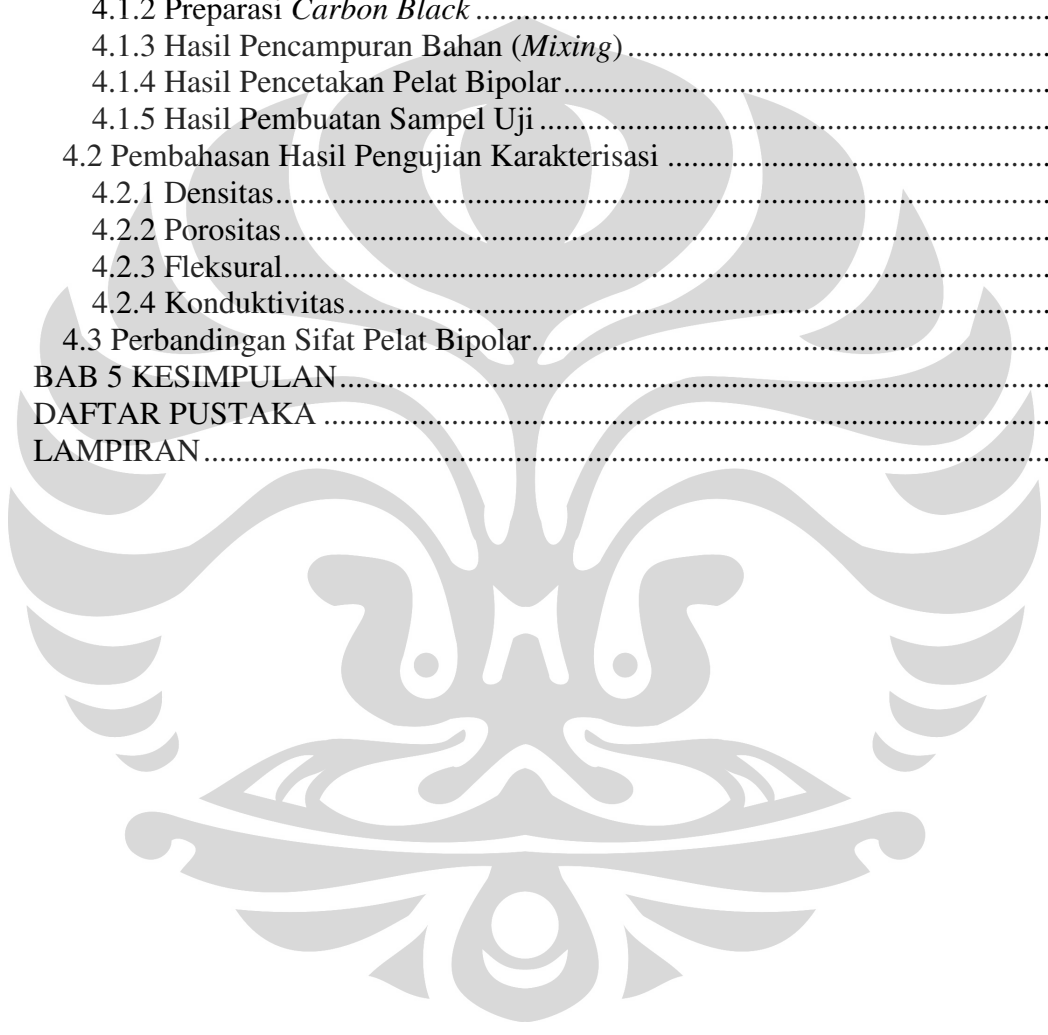
Keywords:

PEM fuel cell, bipolar plates, compression moulding, epoxy resin, graphite EAF, carbon black, carbonization, flexural strength, electrical conductivity.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah	5
1.5 Sistematika Penulisan.....	6
BAB 2 TEORI PENUNJANG	7
2.1 Sel Bahan Bakar (<i>Fuel Cell</i>).....	7
2.1.1 Jenis <i>Fuel Cell</i>	9
2.2 PEMFC (<i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i>).....	11
2.2.1 Struktur PEMFC	13
2.2.2 Pelat Bipolar	15
2.3 Material Komposit.....	18
2.4 Karbon-Polimer Komposit Sebagai Bahan Pembuatan Pelat Bipolar.....	23
2.5 Material Penyusun Pelat Bipolar Karbon-Polimer Komposit.....	25
2.5.1 Grafit EAF	25
2.5.2 Resin Epoksi	27
2.5.3 <i>Carbon Black</i>	27
2.5.4 Metanol	29
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	30
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	30
3.1.1 Diagram Alir Fabrikasi Sampel	30
3.1.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel.....	31
3.2 Komposisi Pelat Bipolar dan Variabel Penelitian	32
3.3 Alat dan Bahan	32
3.3.1 Peralatan.....	32
3.3.2 Bahan	33
3.4 Proses Pembuatan Pelat Bipolar.....	34
3.4.1 Penghalusan Grafit.....	34
3.4.2 Karbonisasi <i>Carbon Black</i>	34
3.4.3 Penimbangan.....	35
3.4.4 Pencampuran Bahan (<i>Mixing</i>)	35

3.4.5 Pencetakan	36
3.4.6 Pembuatan Sampel Uji.....	36
3.5 Karakterisasi Pelat Bipolar.....	37
3.5.1 Pengujian Konduktivitas.....	37
3.5.2 Pengujian Densitas.....	38
3.5.3 Pengujian Porositas.....	39
3.5.4 Pengujian Fleksural.....	40
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	42
4.1 Hasil Preparasi Sampel.....	42
4.1.1 Hasil Preparasi Grafit EAF.....	42
4.1.2 Preparasi <i>Carbon Black</i>	42
4.1.3 Hasil Pencampuran Bahan (<i>Mixing</i>).....	43
4.1.4 Hasil Pencetakan Pelat Bipolar.....	44
4.1.5 Hasil Pembuatan Sampel Uji.....	45
4.2 Pembahasan Hasil Pengujian Karakterisasi	46
4.2.1 Densitas.....	46
4.2.2 Porositas.....	47
4.2.3 Fleksural.....	49
4.2.4 Konduktivitas.....	50
4.3 Perbandingan Sifat Pelat Bipolar.....	52
BAB 5 KESIMPULAN.....	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN.....	57



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Estimasi Cadangan Energi Dunia.....	1
Gambar 1.2	Estimasi Produksi Bahan Bakar Fosil (Minyak Bumi dan Gas Alam) Dunia.....	2
Gambar 1.3	Distribusi Massa untuk <i>Stack</i> PEMFC.....	3
Gambar 2.1	Skema Operasi <i>Fuel Cell</i> Tunggal.....	8
Gambar 2.2	Jenis Operasi dalam Sistem <i>Fuel Cell</i> yang Berbeda.....	11
Gambar 2.3	Skema Operasi PEMFC.....	11
Gambar 2.4	Komponen Penyusun PEMFC.....	13
Gambar 2.5	Pelat Bipolar.....	15
Gambar 2.6	Klasifikasi Pelat Bipolar dalam PEMFC.....	16
Gambar 2.7	Jenis Penguat yang Terdistribusi pada Matiks Komposit.....	19
Gambar 2.8	<i>Interface</i> dan <i>Interphase</i> pada Komposit.....	19
Gambar 2.9	Sudut Kontak yang Terbentuk pada Komposit.....	20
Gambar 2.10	Skema Sudut Kontak dan Energi Bebas Permukaan Komposit....	20
Gambar 2.11	Parameter dari Bahan Pengisi pada Komposit: (a) Konsentrasi; (b) Ukuran; (c) Bentuk; (d) Distribusi; (e) Orientasi.....	21
Gambar 2.12	Resistansi pelat bipolar pada berbagai kondisi fabrikasi: (a) rasio komposisi grafit (10MPa, 120°C); (b) tekanan <i>compression moulding</i> (90vol%, 120°C); (c) temperatur proses (10Mpa, 90vol%).....	24
Gambar 2.13	Struktur Kristal Grafit.....	25
Gambar 2.14	Dapur EAF.....	26
Gambar 2.15	Struktur Dasar Resin Epoksi.....	27
Gambar 2.16	Struktur <i>Carbon Black</i>	28
Gambar 2.17	Dispersi <i>Carbon Black</i> pada Polimer.....	28
Gambar 2.18	Struktur Metanol.....	29
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian (Fabrikasi Sampel).....	31
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian (Karakterisasi Sampel).....	31
Gambar 3.3	Karbonisasi: (a) Bahan Baku Sabut Kelapa; (b) Perangkat Oven untuk Pembuatan <i>Carbon Black</i>	34
Gambar 3.4	Butiran Hasil Pencampuran.....	35
Gambar 3.5	Pencetakan.....	36
Gambar 3.6	Skema Mesin <i>Four Point Probe Test</i>	37
Gambar 3.7	Mesin Veeco FPP 5000 - <i>Four Point Probe Test</i>	37
Gambar 3.8	Penimbangan Sampel dalam Air.....	38
Gambar 3.9	Sampel Dipanaskan dalam Air pada T=100°C.....	40
Gambar 3.10	Skema Pengujian Fleksural.....	40
Gambar 3.11	Pengujian Fleksural.....	41
Gambar 4.1	Grafit EAF: (a) Bongkahan Grafit Sebelum Preparasi; (b) Serbuk Grafit Hasil Preparasi.....	42
Gambar 4.2	<i>Carbon Black</i> : (a) Hasil Karbonisasi; (b) Hasil Pengayakan.....	43
Gambar 4.3	Pencampuran: (a) Sebelum <i>Mixing</i> pada <i>Hot Plate</i> ; (b) Hasil Akhir <i>Mixing</i>	43

Gambar 4.4	Hasil Pencetakan Pelat Bipolar dengan Variasi Tekanan: (a) 300 kg/cm ² ; (b) 350 kg/cm ² ; (c) 400 kg/cm ² ; (d) 450 kg/cm ² .	44
Gambar 4.5	Sampel uji (a) Konduktivitas, Densitas, Porositas (b) Fleksural ..	45
Gambar 4.6	Pengaruh Tekanan <i>Compression Moulding</i> Terhadap Densitas ...	46
Gambar 4.7	Pengaruh Tekanan <i>Compression Moulding</i> Terhadap Porositas ..	48
Gambar 4.8	Pengaruh Tekanan <i>Compression Moulding</i> Terhadap Kekuatan Fleksural	49
Gambar 4.9	Pengaruh Tekanan <i>Compression Moulding</i> Terhadap Konduktivitas Listrik	51

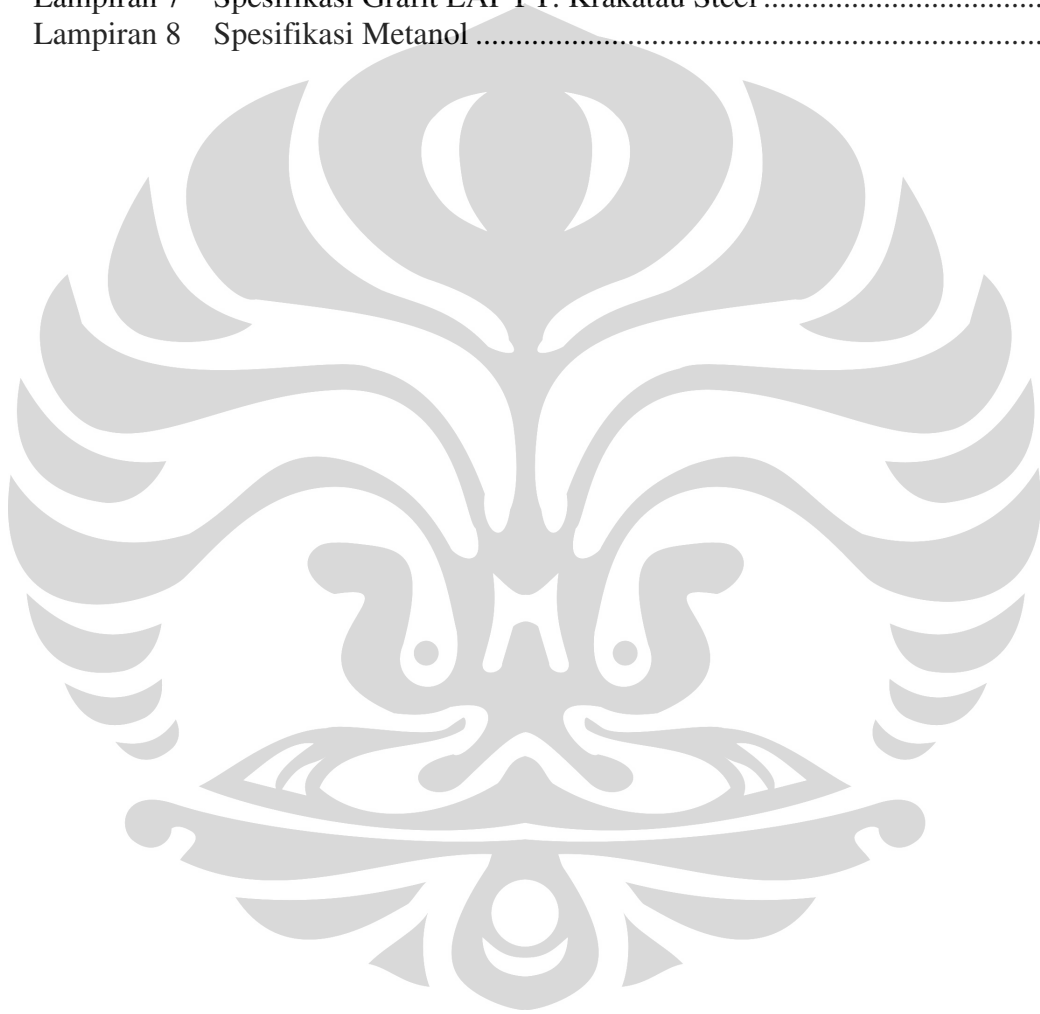


DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Emisi yang Dihasilkan <i>Fuel Cell</i> Selama Satu Tahun Operasi.....	9
Tabel 2.2	Perbandingan Tingkat Suara dan Efisiensi <i>Fuel Cell</i>	9
Tabel 2.3	Jenis <i>Fuel Cell</i>	10
Tabel 2.4	Komponen Penyusun PEMFC	14
Tabel 2.5	Kelebihan dan Kekurangan Material Penyusun Pelat Bipolar.....	17
Tabel 2.6	Target Teknis DOE untuk Karakteristik Pelat Bipolar	18
Tabel 2.7	Klasifikasi Komposit Berdasarkan Matriks Disertai Kelebihan dan Keterbatasan	22
Tabel 2.8	Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel Grafit Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar.....	26
Tabel 3.1	Komposisi Pelat Bipolar dan Variasi Tekanan <i>Hot Pressing Machine</i>	32
Tabel 4.1	Data Hasil Pengujian Densitas	46
Tabel 4.2	Data Hasil Pengujian Porositas	47
Tabel 4.3	Data Hasil Pengujian Fleksural.....	49
Tabel 4.4	Data Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik	50
Tabel 4.5	Perbandingan Sifat Pelat Bipolar	52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Hasil Pengujian Densitas	57
Lampiran 2	Hasil Pengujian Porositas	58
Lampiran 3	Hasil Pengujian Fleksural	59
Lampiran 4	Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik	60
Lampiran 5	Spesifikasi Resin Epoksi	61
Lampiran 6	Spesifikasi Epoksi <i>Hardener</i>	62
Lampiran 7	Spesifikasi Grafit EAF PT. Krakatau Steel	63
Lampiran 8	Spesifikasi Metanol	65

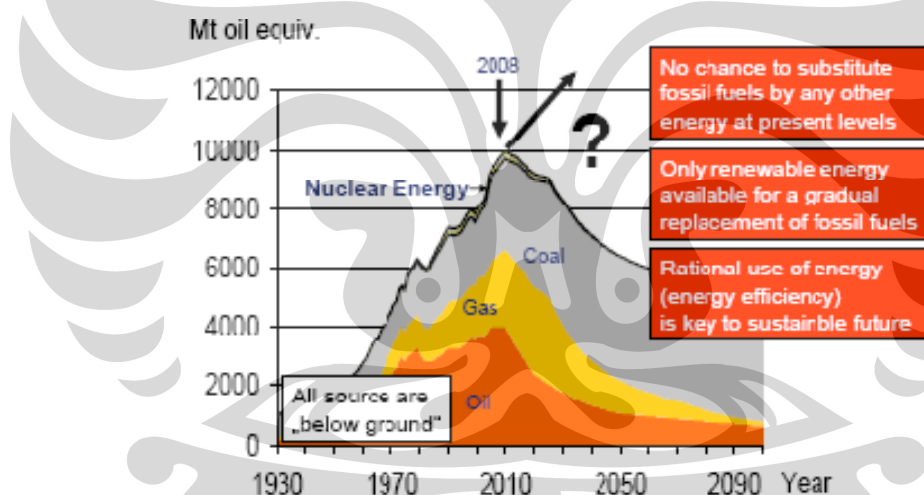


BAB 1

PENDAHULUAN

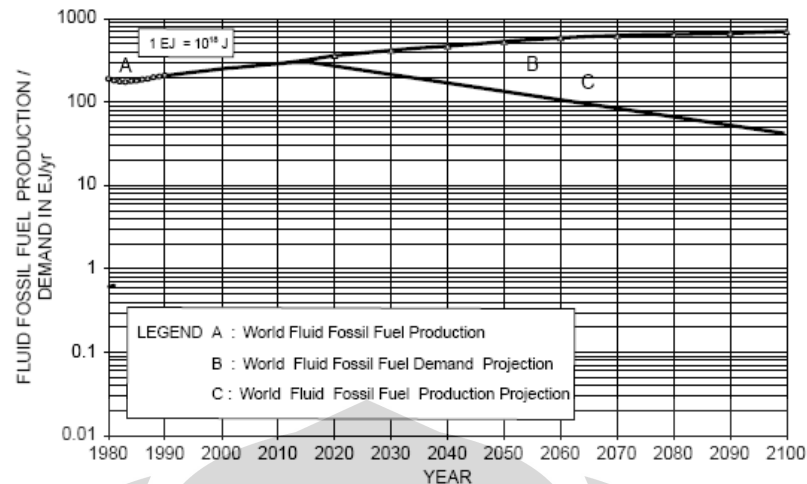
1.1 Latar Belakang

Sumber energi dunia terdiri dari sumber energi terbarukan dan tidak terbarukan. Pada awal masa revolusi industri pemanfaatan sumber energi tidak terbarukan berupa bahan bakar fosil menjadi pilihan utama. Kondisi tersebut berlangsung hingga kini dengan sebagian besar fasilitas industri dan mobilisasi beroperasi menggunakan mesin bakar (*combustion engine*). Namun kontinyuitas pengoperasian mesin bakar dibayangi keterbatasan cadangan sumber energi bahan bakar fosil. Berdasarkan Gambar 1.1 terlihat bahwa cadangan energi dunia telah mencapai batas maksimumnya dan terus mengalami defisit di sepanjang tahun berikutnya^[1].



Gambar 1.1 Estimasi Cadangan Energi Dunia^[1]

Pada sisi lain, konsumsi energi terus mengalami peningkatan seiring bertambahnya populasi penduduk dunia yang mencapai 1,2-2% per tahun^[2]. Pada Gambar 1.2 terlihat bahwa peningkatan kebutuhan energi tidak diiringi dengan peningkatan produksi energi bahan bakar fosil. Perbedaan kebutuhan konsumsi energi dan kapasitas produksi tersebut diprediksi akan menimbulkan dampak krisis energi jangka pendek mulai tahun 2015^[3].



Gambar 1.2 Estimasi Produksi Bahan Bakar Fosil (Minyak Bumi dan Gas Alam) Dunia^[3]

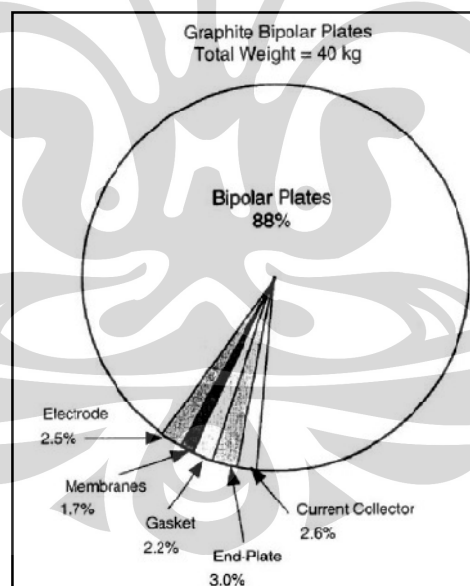
Ketergantungan terhadap energi tidak terbarukan berpotensi memperburuk kondisi lingkungan hidup dan perekonomian dunia^[2]. Protokol Kyoto merupakan bentuk kesepakatan internasional dari 187 negara yang berupaya menangani masalah tersebut. Sebanyak 37 negara industri diantaranya berkomitmen mereduksi gas rumah kaca (CO_2 , CH_4 , N_2O , SF_6) yang mereka hasilkan. Salah satu langkah konkrit dunia dalam menjalankan komitmen tersebut adalah mengembangkan teknologi untuk pemanfaatan sumber energi alternatif terbarukan seperti *solar cell* maupun *fuel cell*^[1].

Fuel cell merupakan suatu sistem konversi energi kimia menjadi energi listrik berdasarkan prinsip elektrokimia yang memiliki efisiensi tinggi dan ramah lingkungan^[4]. *Fuel cell* tidak mengalami siklus pembakaran penghasil polutan gas karbon seperti pada *combustion engine*, melainkan hanya berupa panas dan air sebagai produk reaksi. *Fuel cell* tidak mengalami *discharged* dan akan terus menghasilkan energi seiring suplai bahan bakar secara simultan terhadapnya^[2,5].

Terdapat beberapa jenis *fuel cell* yang dibedakan berdasarkan jenis elektrolitnya. Jenis *fuel cell* tersebut adalah *Alkaline Fuel Cell* (AFC), *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC), *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC), *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC), *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC), dan *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC)^[4]. PEMFC adalah sel yang potensial digunakan pada aplikasi bidang otomotif yang disebut *fuel cell vehicle* (FCV).

PEMFC dianggap potensial sebagai FCV karena memiliki efisiensi energi tinggi, *startup* relatif cepat, dan temperatur operasi rendah ($\pm 80^{\circ}\text{C}$)^[6]. Namun masih terdapat keterbatasan yang menghambat upaya komersialisasi dari PEMFC. Keterbatasan tersebut berupa biaya produksi tinggi, densitas tinggi, kendala area penyimpanan bahan bakar hidrogen, reliabilitas rendah (daya tahan katalis), dan durabilitas rendah (sifat mekanis membran)^[7].

PEMFC terdiri dari empat komponen utama, yaitu pelat bipolar, MEA (*Membrane Elctrode Assembly*), pelat penutup, dan penyimpan arus. Fokus penelitian ini pada pelat bipolar yang berfungsi sebagai pemisah antar sel tunggal, pendistribusi bahan bakar, pengatur distribusi air dan panas serta pembawa arus keluar sel^[8]. Pelat bipolar konvensional berkontribusi terhadap 45-60% biaya PEMFC^[7]. Berdasarkan Gambar 1.3 diketahui pelat bipolar mencakup $\pm 80\%$ total berat dan sebagian besar volume PEMFC. Pengembangan pelat bipolar alternatif berbahan dasar karbon-polimer komposit berpotensi mereduksi berat dan biaya produksi PEMFC disertai sifat mekanis dan kelistrikan yang baik^[9].



Gambar 1.3 Distribusi Massa untuk *Stack* PEMFC^[10]

Pengembangan material karbon-polimer komposit sebagai bahan dasar pembuatan pelat bipolar PEMFC merupakan tujuan penelitian ini. Pemanfaatan material jenis ini dapat mereduksi biaya produksi PEMFC hingga senilai 15-29%, menurunkan densitas, dan meningkatkan durabilitas^[11, 12]. Selain itu perolehan

konduktivitas listrik dapat setara pelat bipolar berbasis karbon maupun logam apabila mampu mengoptimalkan komposisi bahan dan parameter proses fabrikasi. Dalam literatur tercatat Ling Du menghasilkan pelat bipolar komposit bermatriks epoksi dengan konduktivitas listrik senilai lebih dari 800 S/cm^[7].

Atas dasar itu maka pada penelitian ini digunakan polimer epoksi sebagai matriks. Selain itu berdasarkan pertimbangan segi lingkungan maka digunakan grafit elektroda (limbah proses EAF) dan *carbon black* (CB) hasil karbonisasi serat alami (sabut kelapa sawit) sebagai *filler*^[13]. Distribusi ukuran partikel kemudian disesuaikan untuk menghasilkan sifat optimum dari pelat bipolar^[11].

1.2 Perumusan Masalah

Pelat bipolar karbon-polimer komposit memiliki beberapa keunggulan bila dibandingkan pelat bipolar berbahan grafit maupun material logam. Keunggulan tersebut berupa fabrikasi relatif mudah dan murah, ketahanan korosi baik, densitas ringan, dan tidak memerlukan permesinan tambahan untuk membuat *flow field*^[2]. Hal tersebut menjadi dasar pemilihan pelat bipolar jenis ini sebagai bagian dari komponen penyusun PEMFC. Namun tidak mudah menghasilkan konduktivitas listrik tinggi (> 100 S/cm) sesuai standar DOE untuk aplikasi FCV dengan mempertimbangkan beberapa faktor penting.

Sifat dasar material penyusun dan mekanisme pembasahan optimum adalah faktor penting dalam membentuk sifat terbaik dari komposit. Pada penelitian sebelumnya digunakan epoksi sebagai matriks disertai penambahan grafit sebagai penguat^[14]. Kombinasi keduanya dapat meningkatkan konduktivitas listrik pelat bipolar. Selain itu *carbon black* dengan komposisi optimum digunakan untuk meningkatkan konduktivitas listrik dan fleksibilitas mekanis pelat bipolar^[9, 15].

Pada penelitian ini dilakukan modifikasi komposisi bahan dan parameter fabrikasi. Pertama, digunakan *carbon black* hasil karbonisasi sabut kelapa pada temperatur tinggi (600°C) dalam lingkungan gas inert selama 10 jam. Hasilnya digunakan sebagai pembanding terhadap pelat bipolar dengan penyusun *carbon black* sintetis. Kedua, dilakukan pemvariasian tekanan *compression moulding* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap karakteristik pelat bipolar.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Memastikan kesesuaian komersialisasi pelat bipolar yang dibuat dengan parameter fabrikasi berupa variasi tekanan *compression moulding*.
2. Mengetahui pengaruh penambahan tekanan *compression moulding* terhadap karakteristik (densitas, porositas, kekuatan fleksural, dan konduktivitas listrik) pelat bipolar yang dihasilkan.
3. Membandingkan karakteristik pelat bipolar berbahan pengisi *carbon black* hasil karbonisasi serat alami dengan pelat bipolar berbahan pengisi *carbon black* sintesis pada penelitian sebelumnya.

1.4 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Pada penelitian ini digunakan formulasi komposisi bahan penyusun komposit berupa material polimer termoset (epoksi) sebagai matriks dan material keramik (karbon) sebagai bahan penguat dan pengisi. Karbon yang digunakan adalah karbon grafit elektroda EAF dan *carbon black* hasil karbonisasi serat alami. Perbandingan komposisi bahan penyusun pelat bipolar adalah:

1. Polimer termoset epoksi (20% total berat bahan), dengan perbandingan resin epoksi dan *hardener* (1:1)
2. Karbon (80% total berat bahan), terdiri dari grafit elektroda EAF (90% total berat karbon) dan *carbon black* (10% total berat karbon).

Total berat bahan pembentuk bakalan pelat bipolar adalah 180 gram. Bahan-bahan tersebut dicampurkan menjadi satu melalui proses *hot mixing* pada temperatur 100°C selama ± 20 menit. Pada proses ini dibutuhkan metanol sejumlah masing-masing 35 ml sebagai pelarut resin epoksi dan *hardener*.

Hasil pencampuran bahan diratakan ke dalam cetakan berbahan *Duplex SS* berukuran 15 cm x 15 cm. Pencetakan dilakukan menggunakan *Compression Moulding Machine* yang dirangkaikan pemanas (*heater*) pada bagian cetakan. Variasi tekanan yang diberikan senilai 300 kg/cm², 350 kg/cm², 400 kg/cm², dan 450 kg/cm² pada temperatur 70°C selama 4 jam. Hasil pencetakan dibentuk dalam beberapa sampel uji sesuai standar pengujian, yaitu uji konduktivitas listrik, uji fleksural, uji densitas, dan uji porositas.

1.5 Sistematika Penulisan

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

Bab 1: Pendahuluan

Bab ini berisikan penjelasan tentang latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab 2: Teori Penunjang

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

Bab 3: Metodologi Penelitian

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

Bab 4: Hasil dan Pembahasan

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

Bab 5: Kesimpulan

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

BAB 2 TEORI PENUNJANG

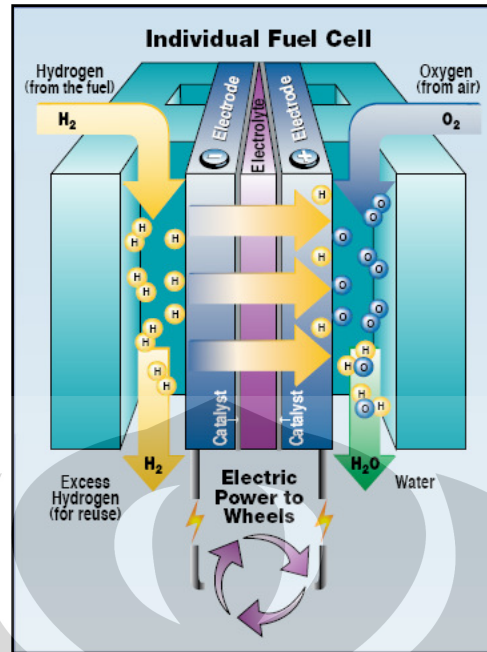
2.1 Sel Bahan Bakar (*Fuel Cell*)

Fuel cell merupakan suatu perangkat yang menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar untuk menghasilkan elektron, proton, panas, dan air^[5]. Aliran elektron akan menghasilkan energi listrik yang merupakan sumber daya penggerak suatu peralatan listrik. Panas yang dihasilkan merupakan akibat resistansi yang menghambat aliran elektron dalam sistem *fuel cell*. Sedangkan air adalah produk sampingan *fuel cell* selain panas yang terbentuk karena reaksi elektrokimia antara anoda dan katoda sesuai persamaan 2.1 berikut ini.



Aliran elektron dapat dimanfaatkan secara optimal untuk menghasilkan energi listrik dalam suatu sistem *fuel cell* tunggal. Namun masalah akan muncul ketika sel tunggal dikonstruksikan dalam suatu susunan disebut *stack*. *Fuel cell* akan memiliki resistansi tinggi sepanjang elektrolit yang berada diantara elektroda. Masalah tersebut dapat dipecahkan dengan mendesain pelat elektroda berporos dengan ketebalan minimum. Elektroda berporos dibutuhkan untuk optimalisasi penetrasi elektrolit dan gas yang terbentuk. Sedangkan ketebalan minimum akan mereduksi jarak antar elektroda, elektrolit dan gas sehingga mengurangi resistansi dari suatu sel^[5].

Fuel cell tidak membutuhkan pengisian ulang seperti pada sistem operasi baterai karena akan terus menghasilkan energi seiring suplai bahan bakar terhadapnya^[2, 5]. Konstruksi dasar dari *fuel cell* terdiri dari dua bagian elektroda dan satu bagian elektrolit. Hidrogen dan oksigen masing-masing akan dialirkan pada anoda (-) dan katoda (+) sehingga terjadi reaksi redoks (reduksi-oksidasi). Reaksi redoks dari *fuel cell* akan membentuk air sebagai produk reaksi. Skema operasi dan komponen dasar dari *fuel cell* tunggal dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut ini.



Gambar 2.1 Skema Operasi *Fuel Cell* Tunggal^[17]

Bahan bakar yang disuplai ke dalam sistem *fuel cell* dapat berupa hidrogen murni, propana, metanol, maupun etanol. Bahan bakar terbaik adalah hidrogen murni berwujud gas dengan kadar CO minimum yang dapat meminimalkan terbentuknya produk korosi dalam *fuel cell*. Bahan bakar hidrokarbon cair tetap dapat digunakan namun perlu adanya perangkat *fuel reformer* yang ditambahkan pada rangkaian *fuel cell*.

Fuel cell memiliki keunggulan berupa tingkat emisi rendah, terdiri dari perangkat sederhana, tidak bising, efisiensi relatif tinggi, dan fleksibel^[18]. Pada Tabel 2.1 terlihat tingkat emisi udara *fuel cell* lebih rendah dibandingkan pembangkit energi berbahan bakar fosil. *Fuel cell* dianggap sederhana karena tidak terdapat perangkat bergerak seperti piston pada *combustion engine*. Oleh karena itu *fuel cell* beroperasi pada tingkat kebisingan sangat rendah, seperti terlihat pada Tabel 2.2. Selain itu nilai efisiensi *fuel cell* dapat mencapai 90% apabila mampu mengoptimalkan energi panas yang dihasilkan ketika difungsikan sebagai stasioneri^[5]. Nilai efisiensi tersebut lebih baik dibandingkan dengan *combustion engine* dengan efisiensi maksimal 30%. Sedangkan fleksibilitas *fuel cell* dinilai dari kesesuaiannya dioperasikan pada berbagai aplikasi.

Tabel 2.1 Emisi yang Dihasilkan *Fuel Cell* Selama Satu Tahun Operasi^[2]

Emisi udara	SO _x	NO _x	CO	Partikel	CO ₂
Pembangkit energi (bahan bakar fosil)	28000	41427	28125	500	4044000
<i>Fuel cell</i>	0	0	0	0	1860000

- Satuan massa emisi (pound)/ 1650 MWh

Tabel 2.2 Perbandingan Tingkat Suara dan Efisiensi *Fuel Cell*^[2]

Parameter	<i>Gas Electric</i>	<i>Microturbine</i>	<i>Diesel Electric</i>	<i>Fuel Cell</i>
Tingkat Suara	Tinggi	Sedang	Tinggi	Rendah
Efisiensi	20%	24%	32%	90%

Fuel cell juga memiliki beberapa keterbatasan mendasar seperti harganya yang masih relatif mahal dan kendala *hydrogen storage*. Pada aplikasi otomotif dibutuhkan biaya US\$10-15/kW dengan masa pakai 4000 jam untuk mampu bersaing dengan *combustion engine*. Pada aplikasi stasioneri yang memerlukan optimalisasi energi panas hasil reaksi *fuel cell* dibutuhkan biaya US\$1000/kW dan masa pakai 40000 jam. Biaya tersebut diprediksi akan berkurang lima kali lipat apabila dapat dikembangkan material baru yang lebih murah dengan fabrikasi massal yang lebih efisien^[18].

Keterbatasan pada *hydrogen storage* didasari sifat gas hidrogen dengan densitas yang rendah sehingga dibutuhkan volume penyimpanan yang besar. Apabila ingin mereduksi volume penyimpanan maka gas hidrogen perlu dikompresi pada kondisi tekanan tinggi hingga 75 MPa. Bahan tabung bertekanan tinggi yang digunakan adalah karbon nano-fiber. Beberapa opsi penyimpanan lainnya adalah penyimpanan hidrogen dalam bentuk *cryogenic liquid*, *reversibel metal hydride* maupun hasil reaksi antara *metal hydride* dengan air^[18].

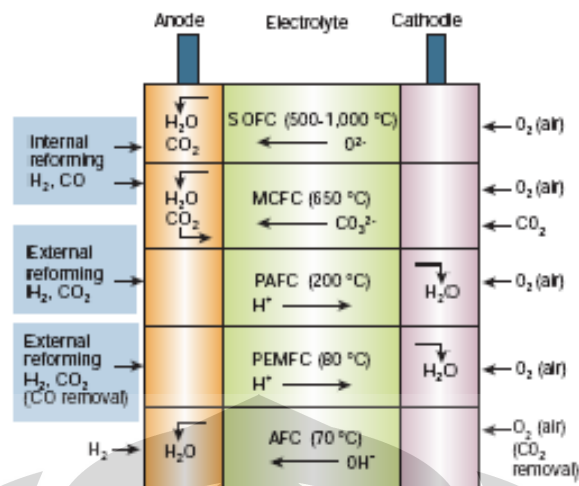
2.1.1 Jenis *Fuel Cell*

Fuel cell terdiri dari lima jenis yang dibedakan berdasarkan larutan elektrolit yang digunakan^[4, 18]. Selain itu perbedaan lainnya terdapat pada jenis material penyusun, metode fabrikasi, dan aplikasi. Pada Tabel 2.3 berikut ini diinformasikan secara detail mengenai perbedaan kelima jenis *fuel cell*.

Tabel 2.3 Jenis *Fuel Cell*^[4]

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	Hydrated Polymeric Ion Exchange Membranes	Mobilized or Immobilized Potassium Hydroxide in asbestos matrix	Immobilized Liquid Phosphoric Acid in SiC	Immobilized Liquid Molten Carbonate in LiAlO ₂	Perovskites (Ceramics)
Electrodes	Carbon	Transition metals	Carbon	Nickel and Nickel Oxide	Perovskite and perovskite / metal cermet
Catalyst	Platinum	Platinum	Platinum	Electrode material	Electrode material
Interconnect	Carbon or metal	Metal	Graphite	Stainless steel or Nickel	Nickel, ceramic, or steel
Operating Temperature	40 – 80 °C	65°C – 220 °C	205 °C	650 °C	600-1000 °C
Charge Carrier	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ⁼	O ⁼
External Reformer for hydrocarbon fuels	Yes	Yes	Yes	No, for some fuels	No, for some fuels and cell designs
External shift conversion of CO to hydrogen	Yes, plus purification to remove trace CO	Yes, plus purification to remove CO and CO ₂	Yes	No	No
Prime Cell Components	Carbon-based	Carbon-based	Graphite-based	Stainless-based	Ceramic
Product Water Management	Evaporative	Evaporative	Evaporative	Gaseous Product	Gaseous Product
Product Heat Management	Process Gas + Liquid Cooling Medium	Process Gas + Electrolyte Circulation	Process Gas + Liquid cooling medium or steam generation	Internal Reforming + Process Gas	Internal Reforming + Process Gas

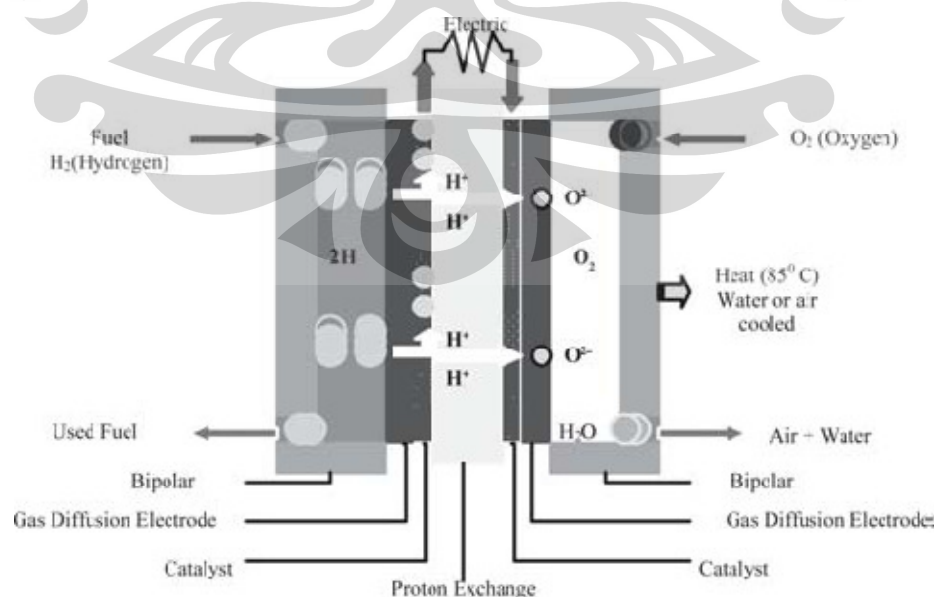
Perbedaan elektrolit pada masing-masing *fuel cell* menghasilkan perbedaan reaksi dan produk reaksi. Perbedaan reaksi terjadi pada anoda dan katoda tiap jenis *fuel cell*. Selain itu jenis ion yang dihasilkan juga berbeda sehingga kelistrikan yang dihasilkan oleh tiap *fuel cell* menjadi bervariasi. Hal tersebut membentuk perbedaan temperatur operasi diantara kelima jenis *fuel cell*, seperti terlihat pada Gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2 Jenis Operasi dalam Sistem *Fuel Cell* yang Berbeda^[19]

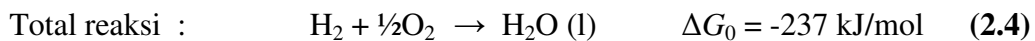
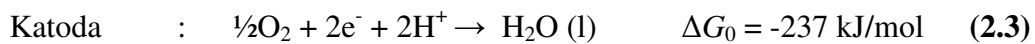
2.2 PEMFC (*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*)

Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell yang dikenal pula sebagai *polymer electrolyte membrane fuel cell* merupakan komponen yang terdiri dari elektrolit dan elektroda berbentuk padat^[7]. Elektrolit terbuat dari polimer padat terhidrasi (*fluorinated sulfonic acid polymer* dan sejenisnya) yang berfungsi sebagai membran pertukaran ion. Sedangkan elektroda terbuat dari karbon berpori yang mengandung katalis (Pt). Satu-satunya cairan dalam PEMFC adalah air hasil reaksi elektrokimia seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2.3 Skema Operasi PEMFC^[20]

Reaksi elektrokimia yang terjadi pada sistem PEMFC adalah sebagai berikut:



PEMFC beroperasi pada kisaran temperatur 80°C sehingga membuatnya cepat bereaksi untuk menghasilkan energi yang dibutuhkan. Selain itu PEMFC memiliki rasio energi terhadap berat yang tinggi serta ketahanan korosi dan durabilitas komponen yang baik. Karakteristik tersebut menjadi dasar pemanfaatan PEMFC sebagai FCV (*fuel cell vehicle*) dengan tingkat kebutuhan efisiensi yang tinggi. Pencapaian nilai efisiensi tersebut tentunya juga memerlukan pengaturan keseimbangan air dan panas hasil reaksi elektrokimia secara baik serta pengaturan kualitas sumber bahan bakar hidrogen^[4].

Air dalam sistem operasi PEMFC dihasilkan dan dialirkan pada bagian permukaan katoda. Air akan terevaporasi ketika bersinggungan dengan panas (lebih dari 60°C) dalam sistem operasi PEMFC. Kondisi evaporasi air diharapkan tidak lebih cepat dibandingkan reaksi pembentukannya pada katoda karena permukaan membran elektrolit perlu cukup terhidrasi^[4, 5]. Apabila membran terlalu kering maka transfer proton menuju elektroda dalam bentuk *hydrated proton* atau $\text{H}(\text{H}_2\text{O})_n$ akan berkurang. Sedangkan apabila terlalu basah maka akan menurunkan area permukaan pemisah antara anoda dan katoda yang akan mengganggu reaksi sel keduanya. Oleh karena itu air yang dihasilkan perlu dialirkan secara baik melalui *flow field* sehingga tingkat hidrasi dari elektroda dan elektrolit menjadi optimum.

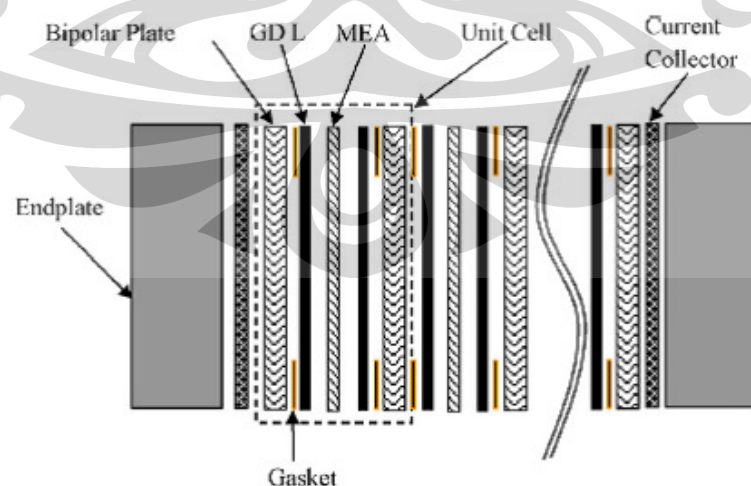
Pengoperasian PEMFC memiliki permasalahan efisiensi lain berkaitan dengan sumber bahan bakar. Sumber bahan bakar hidrogen umumnya memiliki pengotor berupa karbon monoksida (CO). Pengotor akan bereaksi dengan katalis Pt yang berada di anoda. Kondisi ini menyebabkan fungsi katalis terhambat dan menurunkan efisiensi sistem. Oleh karena itu dibutuhkan sumber bahan bakar hidrogen dengan tingkat kemurnian tinggi. Hidrogen murni memiliki densitas rendah sehingga perlu *hydrogen storage* berupa tabung bertekanan tinggi. Namun kondisi ini sulit diaplikasikan pada FCV karena dengan begitu dibutuhkan

kapasitas penyimpanan yang besar sehingga berat kendaraan meningkat. Solusinya adalah menggunakan sumber bahan bakar hidrogen dengan densitas lebih besar sehingga kapasitas penyimpanan menjadi kecil, meskipun dibutuhkan tambahan biaya untuk membuat *fuel reformer*.

Perkembangan PEMFC saat ini mengarah pada rekayasa material penyusun komponen utamanya, yaitu pelat bipolar sebagai penyumbang $\pm 80\%$ total berat PEMFC^[10]. Komposisi berat tersebut dapat menurunkan tingkat efisiensi energi dari sistem ketika teknologi ini diaplikasikan sebagai FCV. Oleh karena itu dibutuhkan material penyusun pelat bipolar yang ringan dan mampu menghasilkan konduktivitas listrik tinggi. Salah satu jenis material yang dapat digunakan untuk fungsi tersebut adalah karbon-polimer komposit.

2.2.1 Struktur PEMFC

Fuel cell tunggal memiliki keterbatasan dalam tegangan yang dihasilkan, yaitu senilai 0,6-0,7 V dengan rapat arus 0,6-0,8 A/cm²^[4]. Nilai tersebut sangat kecil apabila akan difungsikan sebagai FCV. Oleh sebab itu diperlukan pengombinasian komponen-komponen sel dalam bentuk tumpukan *fuel cell* tunggal (*stack*) untuk meningkatkan nilai kelistrikan. Pada Gambar 2.4 di bawah ini terlihat skema struktur *polymer electrolyte membrane fuel cell* (PEMFC) yang tersusun lebih dari sebuah *fuel cell* tunggal.



Gambar 2.4 Komponen Penyusun PEMFC^[21]

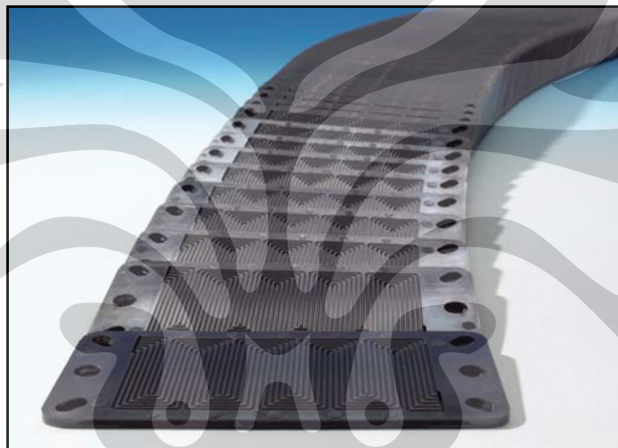
Komponen penyusun PEMFC terdiri dari membran solid polimer sebagai elektrolit dan elektroda (mengandung katalis Pt) karbon, pelat bipolar, pelat penutup (*end plate*), dan pengumpul arus^[7]. Masing-masing komponen penyusun memiliki fungsi tersendiri untuk menjadikan PEMFC sebagai suatu kesatuan penghasil energi listrik dengan efisiensi tinggi. Pada Tabel 2.4 dapat dilihat karakteristik material dan fungsi dari tiap komponen penyusun PEMFC.

Tabel 2.4 Komponen Penyusun PEMFC^[22]

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

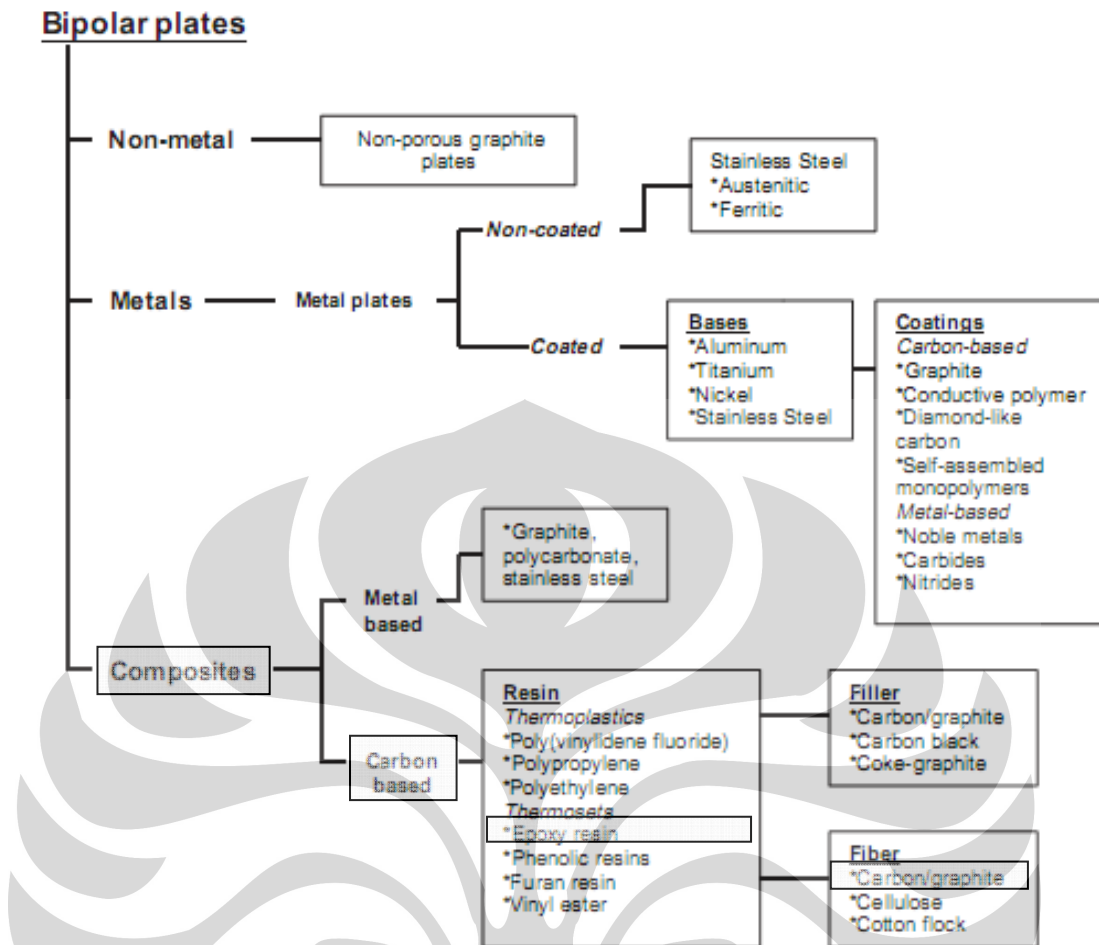
2.2.2 Pelat Bipolar

Pelat bipolar atau disebut juga *flow field plate* merupakan suatu komponen penting dalam sistem operasi PEMFC. Pelat bipolar memiliki dua fungsi utama, yaitu mengalirkan gas reaktan menuju *gas diffusion layer* melalui *flow channel* dan mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda^[9]. Seperti yang telah dijelaskan dalam bab pembuka, pelat bipolar konvensional berkontribusi terhadap 45-60% biaya pembuatan *stack*, $\pm 80%$ total berat, dan mencakup hampir seluruh volume *stack* dari PEMFC^[2]. Oleh karena itu pelat bipolar harus dibuat setipis dan seringan mungkin, ekonomis, dan mudah dibentuk guna mengoptimalkan fungsinya^[10]. Pada Gambar 2.5 terlihat pelat bipolar hasil pencetakan dengan ketebalan minimum disertai *flow field* pada bagian permukaannya.



Gambar 2.5 Pelat Bipolar^[23]

Pelat bipolar perlu dibuat dari material dengan sifat konduktivitas listrik tinggi dan tidak dapat dilewati oleh gas atau memiliki sifat permeabilitas yang rendah. Sifat tersebut dibutuhkan untuk menghasilkan aliran elektron yang baik dalam sistem operasi *fuel cell*. Sifat tersebut dapat diperoleh dari beberapa material dasar pembentuk pelat bipolar seperti material grafit, logam, maupun komposit^[8, 9, 23]. Material dasar tersebut memiliki sifat tertentu yang membedakan proses fabrikasi, biaya produksi serta aplikasi dari pelat bipolar. Jenis-jenis material dasar penyusun pelat bipolar terlihat pada Gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2.6 Klasifikasi Pelat Bipolar dalam PEMFC^[8]

Setiap material dasar yang digunakan sebagai penyusun pelat bipolar difungsikan untuk aplikasi tertentu yang spesifik. Material tersebut memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing yang menjadi dasar perbedaan pemanfaatannya, seperti terlihat pada Tabel 2.5. Hal ini dikarenakan dalam kondisi pengaplikasian yang berbeda maka dibutuhkan sifat pelat bipolar yang berbeda pula baik dari segi sifat mekanis, sifat kimia, sifat kelistrikan maupun sifat termal. Selain itu pertimbangan dari segi ekonomi juga menjadi bagian penting. Pemilihan material yang tepat sebagai penyusun pelat bipolar perlu dilakukan dengan cermat agar penggunaan *fuel cell* sebagai penghasil energi listrik dapat bernilai ekonomis tinggi dan efisiensi tinggi.

Tabel 2.5 Kelebihan dan Kekurangan Material Penyusun Pelat Bipolar^[9]

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

Salah satu fokus pemanfaatan PEMFC adalah sebagai FCV. Aplikasi ini membutuhkan tingkat efisiensi tinggi yang dapat diperoleh dari merekayasa desain dan rekayasa material penyusunnya. Tujuannya adalah menurunkan berat kendaraan sehingga mengurangi daya yang dibutuhkan untuk mobilisasi. Apapun

bahan yang digunakan perlu dipastikan bahwa pelat bipolar memenuhi karakteristik standar untuk aplikasi FCV. Seperti yang disyaratkan US DOE (Department of Energy) pada Tabel 2.6 berikut ini.

Tabel 2.6 Target Teknis DOE untuk Karakteristik Pelat Bipolar^[24]

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

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

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

^c Status is from 2005 TIAx study and will be periodically updated.

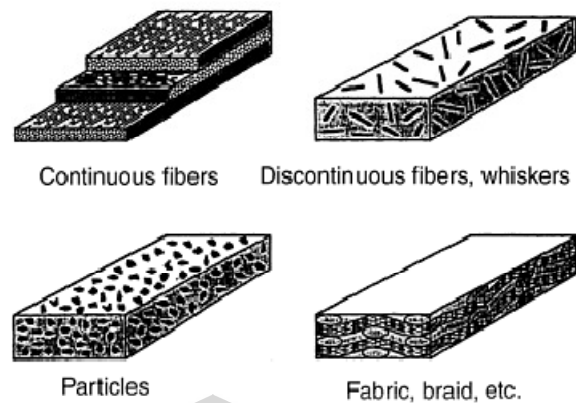
^d May have to be as low as 1 nA/cm if all corrosion product ions remain in ionomer.

^e Includes contact resistance.

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

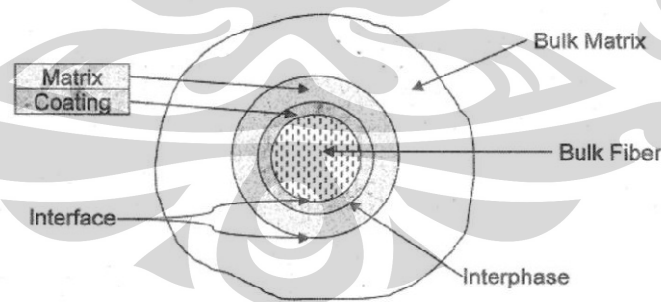
2.3 Material Komposit

Material komposit merupakan kombinasi makroskopik dari dua atau lebih material dengan sifat dan bentuk berbeda yang disatukan oleh suatu ikatan permukaan^[16]. Tujuan pembuatan material komposit adalah mendapatkan sifat (mekanis, optis, termal maupun kelistrikan) terbaik dari kombinasi sifat dasar material penyusunnya untuk kebutuhan suatu aplikasi tertentu. Konstituen yang menyusun material komposit disebut sebagai matriks (*matrix*) dan penguat (*reinforcement*). Pada Gambar 2.7 dapat dilihat adalah berbagai jenis penguat yang terdispersi pada suatu matriks.



Gambar 2.7 Jenis Penguat yang Terdistribusi pada Matiks Komposit^[16]

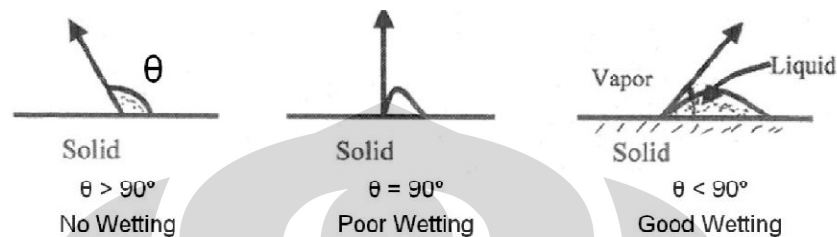
Matriks memiliki nilai fraksi volume sekitar 40-50% dari suatu komposit serta memiliki sifat mekanis lebih lemah dibandingkan penguat. Matriks berfungsi sebagai penentu stabilitas komposit terhadap temperatur, pelindung penguat dari lingkungan abrasif dan korosif, media transfer tegangan, pemberi ketangguhan dan kekuatan geser serta penjaga orientasi penguat yang terdispersi di dalamnya. Dalam memenuhi fungsi tersebut matriks perlu membasahi permukaan penguat dengan baik agar dihasilkan ikatan permukaan (ikatan antarmuka dan ikatan antar fasa) di antara keduanya, seperti terlihat pada Gambar 2.8. Ikatan permukaan berfungsi sebagai jembatan transfer energi ketika material komposit menerima suatu nilai pembebanan.



Gambar 2.8 *Interface* dan *Interphase* pada Komposit^[16]

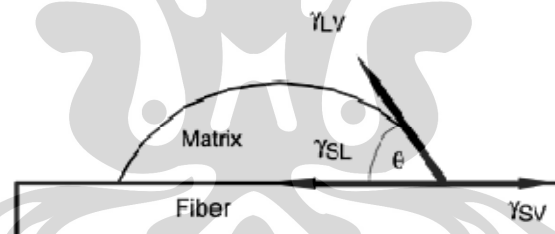
Ikatan permukaan yang terbentuk antara matriks dan penguat sangat mempengaruhi sifat akhir dari material komposit. Daya pembasahan adalah faktor penting untuk menghasilkan ikatan permukaan yang baik. Indikator yang digunakan sebagai penentu daya pembasahan adalah dengan menguji pembentukan sudut kontak antar kedua konstituen. Pada Gambar 2.9 ditunjukkan

daya pembasahan akan bersifat baik apabila sudut kontak yang terbentuk kurang dari 90° . Namun apabila sudut kontak yang terbentuk lebih dari 90° maka daya pembasahan dianggap buruk atau tidak terjadi pembasahan sama sekali. Daya pembasahan yang buruk dapat diperbaiki dengan menambahkan suatu *wetting agent* terhadap konstituen.



Gambar 2.9 Sudut Kontak yang Terbentuk pada Komposit^[16]

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



Gambar 2.10 Skema Sudut Kontak dan Energi Bebas Permukaan Komposit^[16]

$$W_A = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (2.5)$$

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LV} \cos \theta + \gamma_{SL} \quad (2.6)$$

Dengan menyubstitusi persamaan (2.5) ke dalam persamaan (2.6) maka:

$$W_A = \gamma_{LV} (1 + \cos \theta) \quad (2.7)$$

Selain memperhatikan daya pembasahan untuk menghasilkan ikatan permukaan dan sifat akhir komposit yang baik, perlu diperhatikan pula nilai komposisi antar konstituen agar dihasilkan sifat material komposit yang sesuai

dengan kebutuhan. Sifat akhir dari material komposit akan didominasi oleh material dengan komposisi (fraksi volume) terbesar. Sifat akhir yang dipengaruhi oleh komposisi tersebut biasanya berupa koefisien elongasi, densitas, rasio tegangan, rasio regangan, kekerasan, dll. Pengaruh komposisi terhadap sifat komposit ini diturunkan menggunakan *rule of mixture* untuk memprediksi sifat akhir komposit^[25].

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.8)$$

$$\rho = \frac{m_c}{v_c} = \frac{m_f + m_m}{V_f + V_m + V_v} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{\rho_f V_f + \rho_m V_m + \rho_v V_v} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{1} \quad (2.9)$$

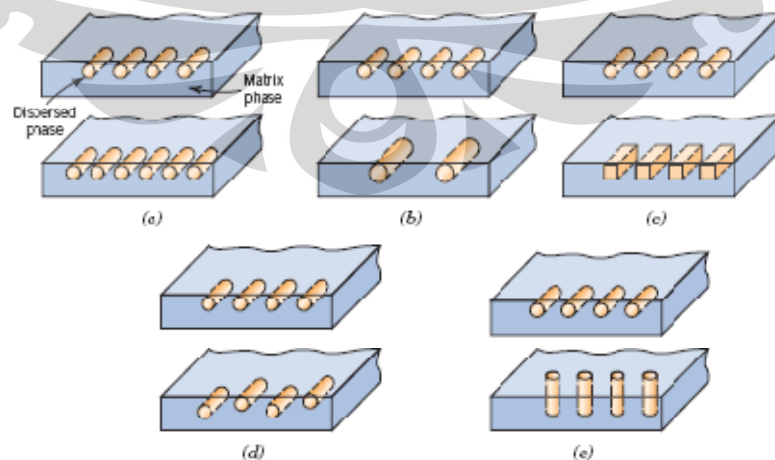
Keterangan: Komposit (c); Matriks (m); Penguat (f)

E = Modulus Elastisitas [MPa]

V = Fraksi Volume [%]

ρ = Densitas [gr/cm³]

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



Gambar 2.11 Parameter dari Bahan Pengisi pada Komposit:

(a) Konsentrasi; (b) Ukuran; (c) Bentuk; (d) Distribusi; (e) Orientasi^[25]

Klasifikasi komposit berdasarkan matriks sesuai Tabel 2.7 dibedakan menjadi tiga jenis, *Metal Matrix Composite* (MMC), *Ceramic Matrix Composite* (CMC), dan *Polymer Matrix Composite* (PMC). Ketiganya memiliki sifat berbeda yang memberikan kelebihan dan keterbatasan dalam pengaplikasiannya. Oleh karena itu perlu penyesuaian sifat yang dimiliki komposit terhadap aplikasi agar dapat dimanfaatkan secara optimal.

Tabel 2.7 Klasifikasi Komposit Berdasarkan Matriks Disertai Kelebihan dan Keterbatasan^[16]

Jenis Komposit	Kelebihan	Keterbatasan
<i>Metal Matriks Composit</i> (MMC)	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur aplikasi tinggi. • Kekuatan dan kekakuan baik. • Ketangguhan baik. • Konduktivitas listrik baik. • Konduktivitas panas baik. • Dapat difabrikasi dengan metode konvensional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bobot yang berat. • Ketahanan korosi buruk. • Biaya produksi relatif mahal.
<i>Ceramic Matriks Composit</i> (CMC)	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur penggunaan sangat tinggi (> 2000°C). • Densitas rendah. • Modulus elastisitas besar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kegetasan tinggi. • Ketahanan terhadap <i>mechanical</i> buruk. • Ketahanan terhadap <i>thermal shock</i> buruk.
<i>Polymer Matriks Composit</i> (PMC)	<ul style="list-style-type: none"> • Massa ringan. • Fabrikasi mudah. • Ketangguhan baik. • Dapat diproses dengan teknik pembuatan polimer konvensional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur aplikasi rendah. • Sensitif terhadap lingkungan dengan tingkat kelembaban tinggi.

2.4 Karbon-Polimer Komposit Sebagai Bahan Pembuatan Pelat Bipolar

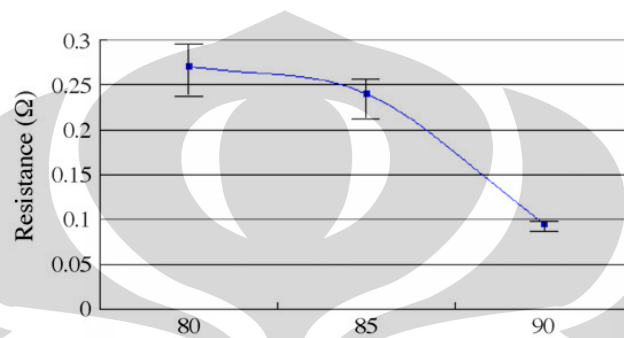
Telah dipaparkan sebelumnya bahwa dalam pengaplikasian PEMFC yang efisien sebagai FCV dibutuhkan komponen penyusun yang ringan, murah, dan mudah difabrikasi^[9]. Pelat bipolar sebagai komponen penyusun yang mendominasi massa dan biaya pembuatan PEMFC menjadi fokus utama modifikasi. Terdapat berbagai jenis bahan yang dapat digunakan untuk membuat pelat bipolar. Karbon-polimer komposit adalah material yang paling sesuai untuk tujuan efisiensi sebagai bahan pembuat pelat bipolar.

Karbon-polimer komposit tersusun dari matriks polimer dan bahan pengisi karbon. Matriks polimer yang digunakan dapat berupa polimer termoset maupun termoplastik. Pada penelitian ini digunakan polimer termoset, yaitu epoksi yang memiliki sifat ketahanan kimia dan sifat adhesi yang baik^[26]. Karbon sebagai penguat memiliki sifat kelistrikan, sifat ketahanan kimia, sifat mekanis, dan sifat termal yang baik^[25]. Kombinasi optimum keduanya dapat menghasilkan pelat bipolar dengan konduktivitas listrik, ketahanan kimia dan sifat mekanis yang baik serta densitas yang ringan. Selain itu fabrikasi pelat bipolar jenis ini relatif lebih mudah dan murah karena tidak membutuhkan permesinan tambahan untuk membuat *flow field channel*^[8, 9].

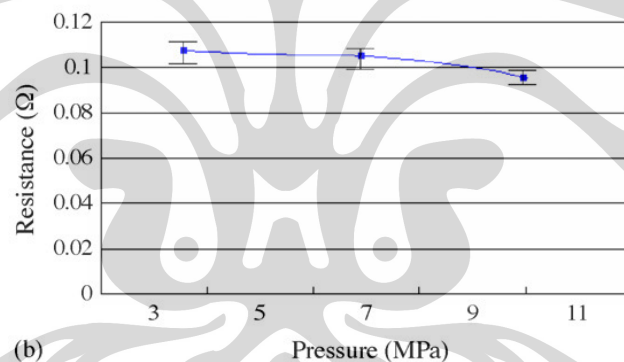
Metode fabrikasi yang dapat diaplikasikan untuk pembuatan pelat bipolar karbon-polimer komposit adalah *compression moulding*, *injection moulding*, *two-component injection moulding*, dan *preform moulding*^[9]. Metode fabrikasi yang sesuai untuk fabrikasi komposit pada penelitian ini adalah *compression moulding* yang dikombinasikan dengan pemanas (*heater*) pada cetakan (*mould*), disebut *hot press machine*. Kesesuaian tersebut ditinjau dari sifat dasar matriks polimer epoksi yang membutuhkan temperatur *curing* dan waktu pembebanan tertentu agar terjadi reaksi polimerisasi. Reaksi ini akan menghasilkan struktur polimer termoset yang kuat (*cross-linked structure*) dan mampu membentuk ikatan permukaan yang baik dengan bahan penguat maupun pengisi.

Berdasarkan penjelasan di atas maka dapat disimpulkan bahwa komposisi dari konstituen, tekanan dari *compression molding*, dan temperatur pencetakan menjadi parameter penting dalam menghasilkan sifat pelat bipolar yang baik. Komposisi konstituen optimal untuk penelitian ini diketahui pada perbandingan

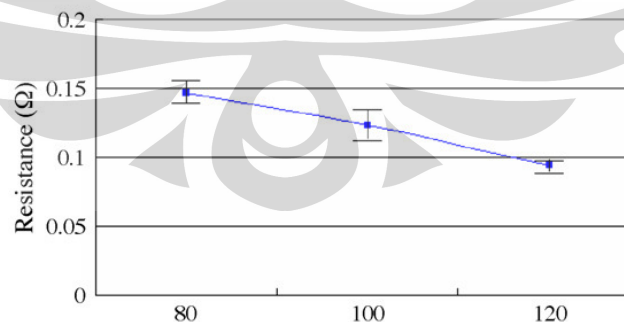
karbon dan epoksi (80 : 20)^[7, 27, 28, 29]. Tekanan *compression molding* yang semakin besar dan temperatur cetakan yang semakin tinggi akan semakin menurunkan resistansi dari pelat bipolar, seperti terlihat pada Gambar 2.12^[28]. Namun pengaplikasian temperatur tetap harus berada di antara *melting temperatur* (T_m) dan *glass temperature* (T_g) dari polimer termoset sebagai matriks. Hal ini ditujukan untuk memfasilitasi terbentuknya *crosslinked-structure* yang homogen selama pembebanan.



(a) Graphite particles mixing ratio (vol%)



(b) Pressure (MPa)



(c) Temperature (°C)

Gambar 2.12 Resistansi pelat bipolar pada kondisi fabrikasi berbeda:

(a) rasio komposisi grafit (10MPa, 120°C); (b) tekanan *compression moulding* (90 vol%, 120°C);

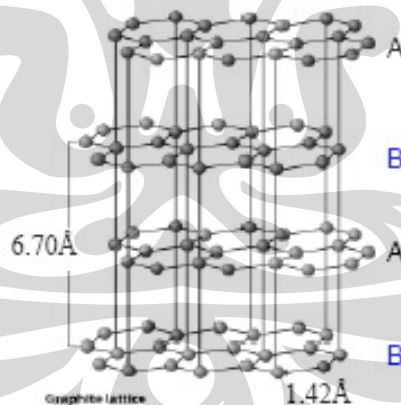
(c) temperatur proses (10Mpa, 90 vol%)^[28]

2.5 Material Penyusun Pelat Bipolar Karbon-Polimer Komposit

Penting menentukan jenis material dan komposisi penyusun dalam pembuatan pelat bipolar karbon-polimer komposit. Pada penelitian ini jenis material penyusun utama yang digunakan berupa grafit EAF, resin epoksi serta *carbon black*. Selain itu terdapat pula agen pelarut metanol sebagai pelarut resin epoksi dan *hardener*.

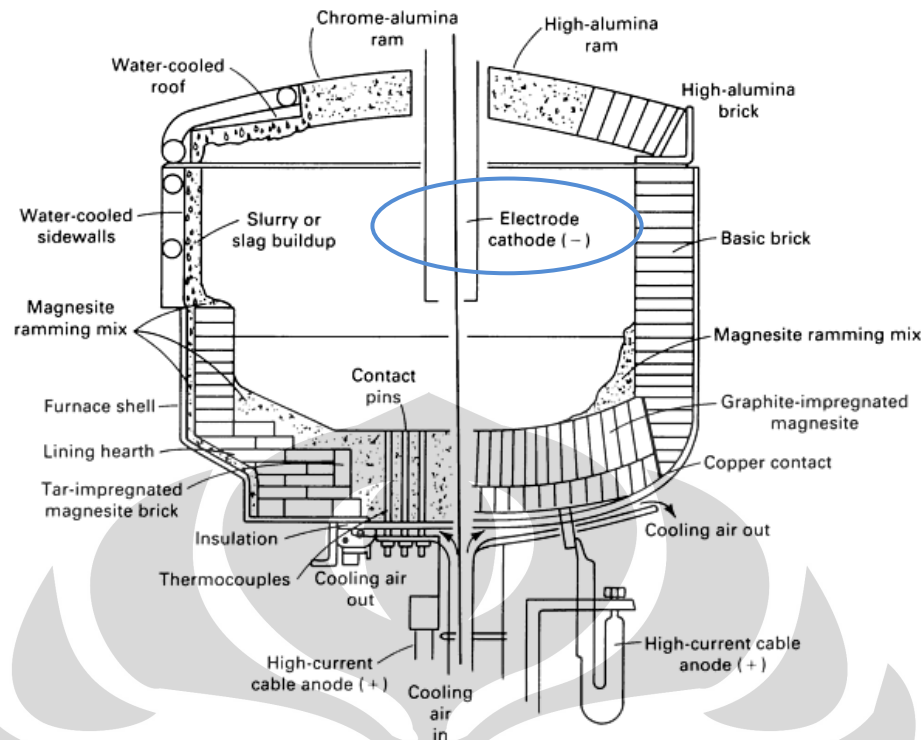
2.5.1 Grafit EAF

Grafit merupakan suatu bentuk modifikasi dari karbon yang memiliki struktur kristal heksagonal, seperti terlihat pada Gambar 2.13. Grafit tersusun dari atom karbon dengan ikatan kovalen pada kisi planar dan ikatan Van der Waals pada tiap lapisan yang menciptakan perbedaan derajat anisotropik. Ikatan Van der Waals yang lemah memungkinkan tiap lapisan memberikan efek lubrikasi. Struktur lapisan grafit bersifat inert terhadap lingkungan kimia. Grafit memiliki sifat konduktivitas termal dan listrik yang baik sehingga dapat digunakan sebagai elektroda maupun konstituen dalam material komposit.



Gambar 2.13 Struktur Kristal Grafit^[7]

Salah satu pemanfaatan grafit sebagai elektroda adalah pada peleburan besi ataupun baja menggunakan *Electric Arc Furnace* (dapur busur listrik). Elektroda berfungsi menghantarkan arus listrik hingga menghasilkan energi panas tinggi yang mampu mencapai titik lebur besi maupun baja. Pada Gambar 2.14 di bawah ini ditunjukkan pemanfaatan grafit sebagai elektroda dalam suatu dapur busur listrik.



Gambar 2.14 Dapur EAF^[30]

Selain sebagai elektroda, grafit dapat pula difungsikan sebagai konstituen dalam pembuatan material komposit. Salah satunya adalah sebagai bahan penguat pada pelat bipolar karbon-polimer komposit. Grafit mampu memberikan nilai konduktivitas listrik yang baik dan juga meningkatkan sifat mekanis dari komposit. 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 Grafit Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar^[11]

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	

2.5.2 Resin Epoksi

Resin epoksi merupakan senyawa molekuler organik yang mengandung sejumlah grup epoksi^[26]. Epoksi sederhana disusun oleh dua atom karbon dan satu atom oksigen, seperti terlihat pada Gambar 2.15. Epoksi termasuk ke dalam material polimer termoset yang dapat mengalami pemutusan rantai polimer apabila mengalami siklus pemanasan berulang.



Gambar 2.15 Struktur Dasar Resin Epoksi^[26]

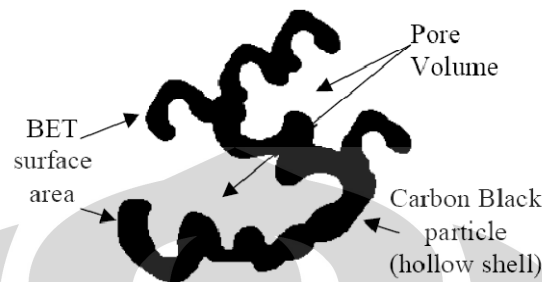
Secara umum polimer termoset terdiri dari dua penyusun, yaitu resin dan *curing agent (hardener)*. *Hardener* adalah suatu senyawa reaktif *aliphatic amine* yang mempunyai sifat *curing time* yang cepat bila direaksikan pada temperatur ruang. Pencampuran resin epoksi dan *hardener* akan menghasilkan reaksi *curing* sehingga didapatkan *hardened polymer (cross-linked structure)*.

Penggunaan epoksi dalam aplikasi komposit seperti pada pembuatan pelat bipolar memiliki fungsi utama sebagai matriks yang akan membasahi seluruh permukaan bahan penguat sehingga dihasilkan ikatan permukaan yang baik. Ikatan permukaan yang baik tersebut membentuk sifat mekanis yang baik pula. Selain itu kombinasi antara epoksi dengan bahan penguat bersifat polar (OH) akan mampu meningkatkan nilai konduktivitas pelat bipolar.

2.5.3 Carbon Black

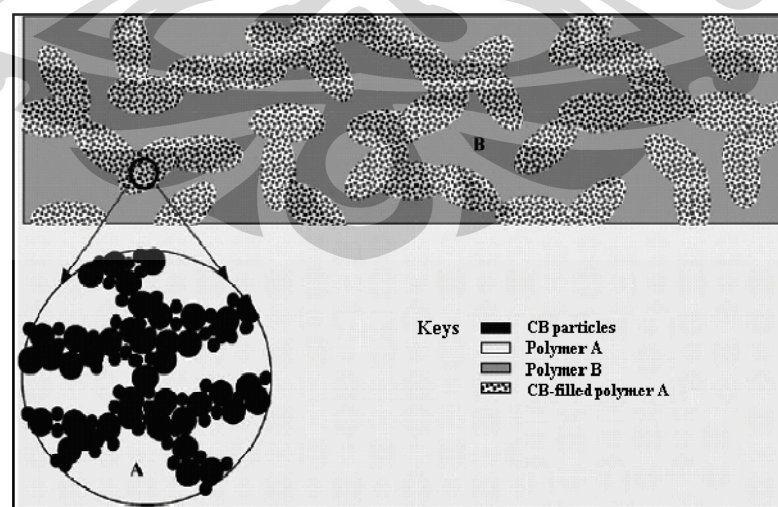
Carbon black merupakan padatan karbon amorf yang dibentuk dengan proses deposisi dari parikel padat dalam fasa gas. Proses deposisi tersebut terjadi karena pembakaran tidak sempurna dari hidrokarbon cair^[31]. Penggunaan *carbon black* secara umum adalah sebagai bahan pengisi yang bertujuan untuk meningkatkan stabilitas dimensi, meningkatkan konduktivitas, *UV stabilizer*, antioksidan pada polimer, dan sebagai pigmen warna^[9, 31]. Struktur karbon mirip dengan struktur grafit yang acak. Ikatan antar atom didalam strukturnya dibentuk

oleh ikatan Van der Waals. Setiap atom karbon dan radikal bebas dalam *carbon black* bereaksi membentuk suatu lapisan yang tersusun menjadi struktur kristal heksagonal. Struktur yang terbentuk memiliki pori dengan volume tertentu, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16 berikut ini.



Gambar 2.16 Struktur *Carbon Black*^[31]

Pada karbon-polimer komposit, dispersi *carbon black* akan membentuk jaringan antar karbon dalam polimer. Jaringan ini berfungsi sebagai sirkuit elektrik sehingga dengan mudah dapat mengalirkan arus listrik dan mengurangi efek isolator dari polimer. Selain itu jaringan tersebut akan meningkatkan kemampuan proses komposit dan sifat mekanisnya. Namun perlu diketahui ketika komposisi *carbon black* terlalu besar pada suatu matriks maka akan terbentuk pengelompokan (*cluster*) *carbon black* dan jaringan tidak terbentuk dengan baik. Morfologi jaringan secara struktur mikro dari *carbon black* pada matriks polimer dapat dilihat pada Gambar 2.17 berikut ini.

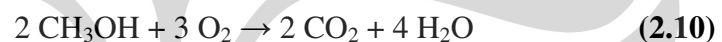


Gambar 2.17 Dispersi *Carbon Black* pada Polimer^[9]

Dalam mengoptimalkan fungsi tersebut ukuran dan komposisi dari partikel *carbon black* perlu diperhatikan. Ukuran yang semakin kecil dengan pendispersian yang merata akan mengoptimalkan pembasahan yang terjadi dalam polimer. Hal ini akan mampu meningkatkan sifat mekanis dan konduktivitas listrik karbon-polimer komposit. Namun apabila nilai komposisi *carbon black* terlalu besar maka jumlah pori yang terdapat pada polimer akan semakin banyak dan berdampak pada penurunan sifat mekanis^[15].

2.5.4 Metanol

Metanol diproduksi secara alami oleh metabolisme bakteri anaerobik. Hasil proses tersebut adalah uap metanol (dalam jumlah kecil) di udara. Setelah beberapa hari, uap metanol 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 digunakan sebagai pelarut dan pengencer untuk resin epoksi (viskositas rendah) agar dapat bercampur dengan grafit sehingga pembasahan permukaan grafit bisa lebih baik dan menjangkau area yang lebih luas. Pada Gambar 2.18 berikut ini dapat dilihat struktur kimia dari metanol.



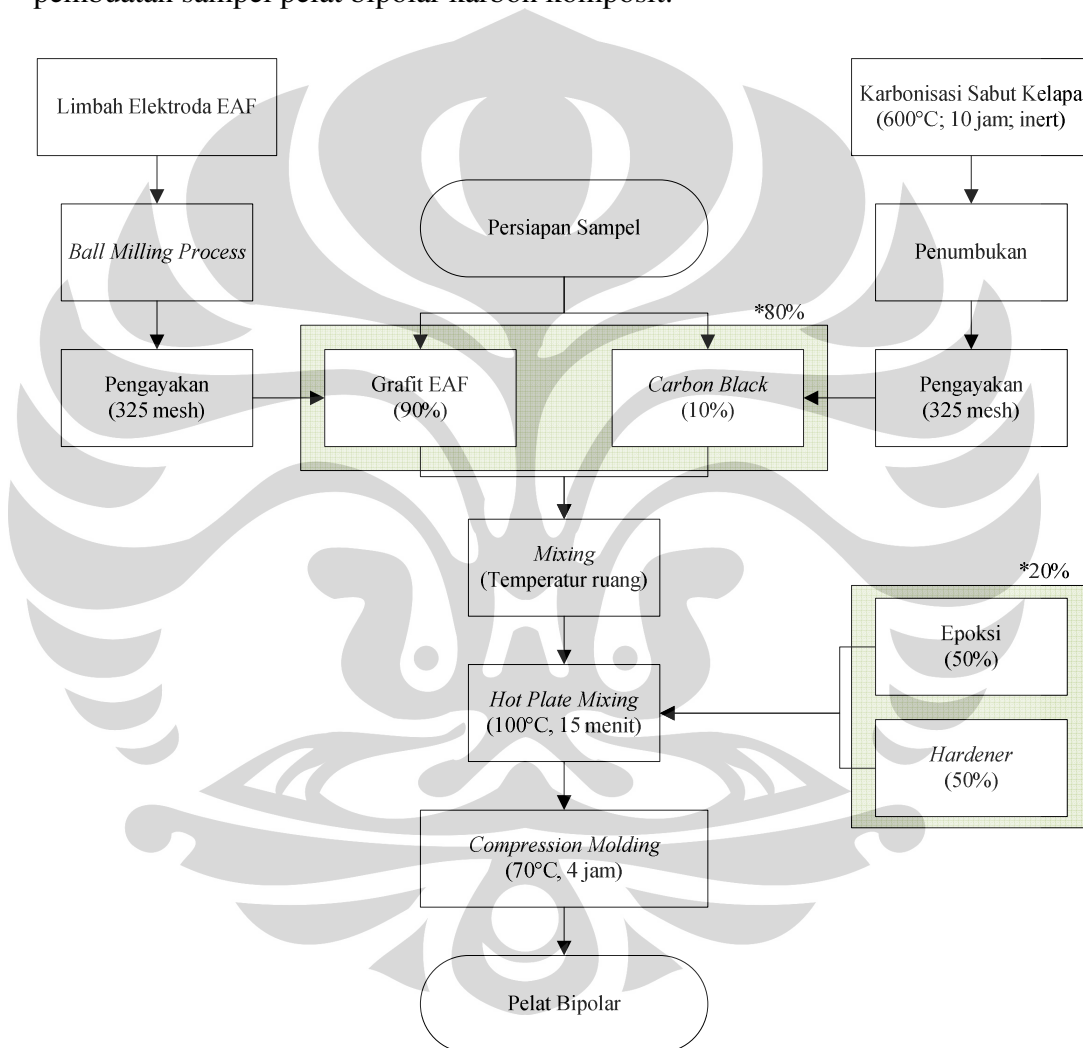
Gambar 2.18 Struktur Metanol^[32]

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1.1 Diagram Alir Fabrikasi Sampel

Pada Gambar 3.1 berikut ini ditunjukkan diagram alir penelitian dari pembuatan sampel pelat bipolar karbon komposit.

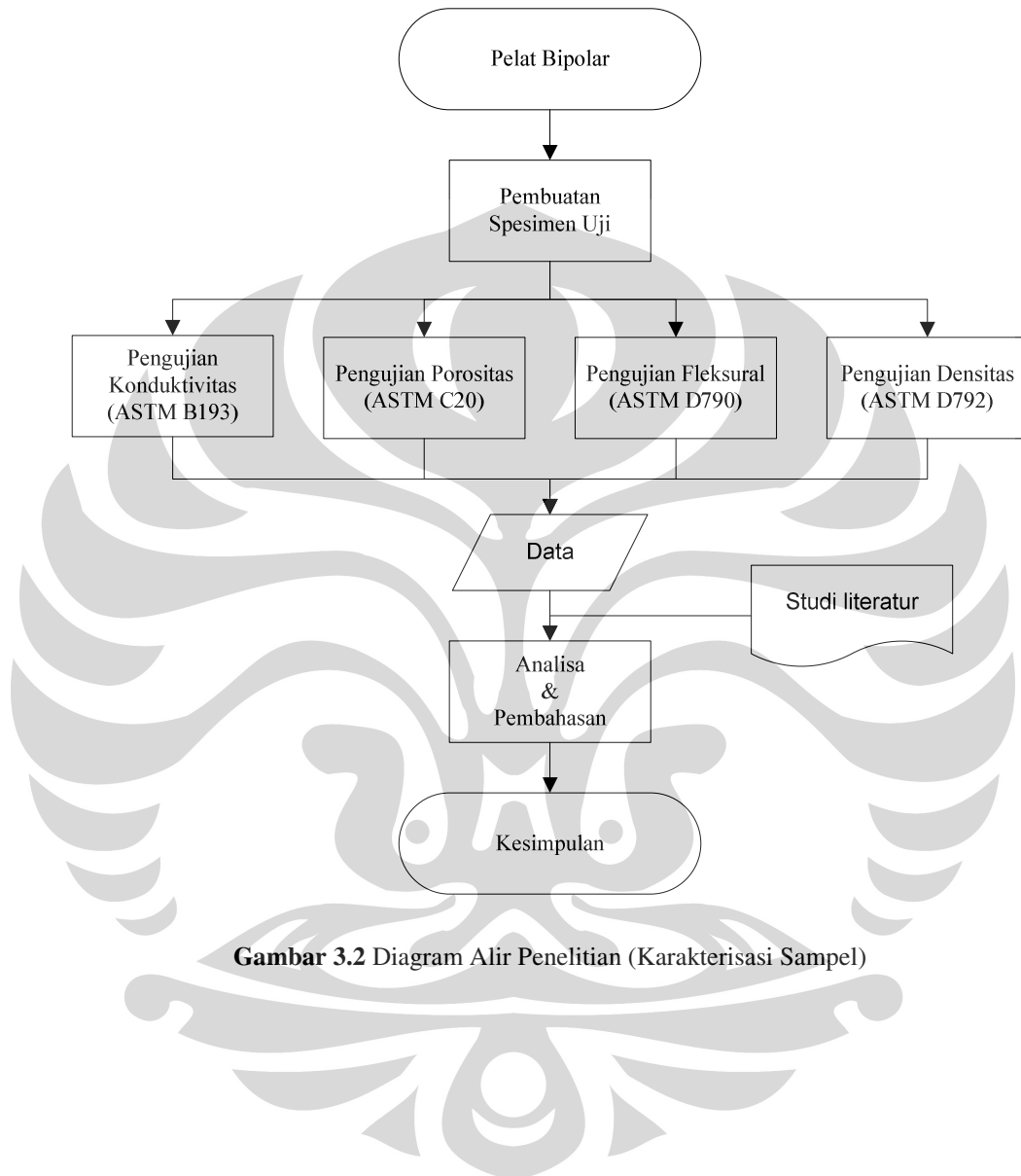


* Merupakan persentase dari berat total pelat bipolar senilai 180gr.

Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian (Fabrikasi Sampel)

3.1.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel

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



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (Karakterisasi Sampel)

3.2 Komposisi Pelat Bipolar dan Variabel Penelitian

Pada Tabel 3.1 di bawah ini dijabarkan komposisi bahan dari sampel serta variasi tekanan yang ditandai dengan kode sampel yang berbeda.

Tabel 3.1 Komposisi Pelat Bipolar dan Variasi Tekanan *Hot Pressing Machine*

Kode Sampel	Pelat Bipolar Komposit (100%wt = 180gr)				Variasi Tekanan [kg/cm ²]
	Reinforcement (80%wt = 144gr)		Matriks Polimer (20%wt = 36gr)		
	Grafit EAF (90%wt)	<i>Carbon Black</i> (10%wt)	Epoksi (50%wt)	<i>Hardener</i> (50%)	
	gr	gr	gr	gr	
A	129,6	14,4	18	18	300
B					350
C					400
D					450

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Peralatan

- Peralatan Preparasi Sampel

1. *Beaker glass*
2. *Pipet volumetric*
3. *Planetary ball mill (Alumina)*
4. Peralatan penumbuk
5. Mesin Pengayak
6. Oven
7. Gas nitrogen
8. Termometer
9. *Mixer*
10. *Hot plate*
11. *Compression Moulding Machine*
12. Cetakan Duplex SS : (15x15) cm²
13. Timbangan digital
14. Gergaji
15. Amplas : 120#, 400#, dan 1000#
16. Jangka Sorong

- Peralatan Pengujian Karakterisasi

1. *Conductivity Four Point Probe Test Machine*
2. *Oven*
3. *Universal Testing Machine*
4. *Dryer*

3.3.2 Bahan

3.3.2.1 Polimer Epoksi

Polimer epoksi yang digunakan dalam penelitian ini berupa resin epoksi bermerek dagang Eposchon (Bhispenol A-epichlorohydrin). Selain itu *curing agent* berupa epoksi *hardener* bermerek dagang Eposchon (Polyaminoamide) digunakan sebagai stimulan polimerisasi pada temperatur ruang. Gabungan keduanya sebagai matriks berfungsi mengikat grafit dan *carbon black*. Spesifikasi resin epoksi dapat dilihat pada Lampiran 5 sedangkan *hardener* pada Lampiran 6.

3.3.2.2 Grafit EAF

Pada penelitian ini digunakan grafit elektroda EAF (*Electric Arc Furnace*) sisa peleburan baja PT. Krakatau Steel. Ukuran partikel dari grafit EAF yang digunakan lebih kecil dari 44 μm (325 mesh). Ukuran tersebut diperoleh setelah bongkahan grafit elektroda EAF ditumbuk dan digerus menggunakan alat *disc mill* dan *planetary ball mill* untuk kemudian diayak. Spesifikasi grafit elektroda EAF dapat dilihat pada Lampiran 7.

3.3.2.3 Carbon Black

Carbon black yang digunakan merupakan hasil karbonisasi serat alami berupa sabut kelapa. Karbonisasi terhadap sabut kelapa kering dilakukan dalam oven pada temperatur ruang 600°C selama 10 jam. Oven dalam kondisi inert setelah pada awal pemanasan dialirkan gas nitrogen ke dalamnya. Hasil dari proses ini kemudian melalui tahapan penumbukan dan penggerusan dengan alat mortar penumbuk. Selanjutnya diayak hingga memiliki ukuran partikel lebih kecil dari 44 μm (325 mesh).

3.3.2.4 Metanol

Metanol berfungsi sebagai pelarut bagi resin epoksi dan *hardener*. Pelarutan membantu homogenisasi pembasahan matriks terhadap bahan penguat. Jumlah metanol yang digunakan sebanyak 35 ml untuk masing-masing pada resin epoksi dan *hardener* di tiap pembuatan bakalan pelat bipolar. Spesifikasi metanol yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Lampiran 8.

3.4 Proses Pembuatan Pelat Bipolar

3.4.1 Penghalusan Grafit

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

3.4.2 Karbonisasi *Carbon Black*

Karbonisasi terhadap sabut kelapa dilakukan di dalam sebuah oven dimana terdapat wadah berukuran 20 cm x 20 cm, seperti terlihat pada Gambar 3.3b. Sabut kelapa disiapkan dalam keadaan kering untuk selanjutnya dipadatkan ke dalam wadah sebelum ditempatkan pada oven. Temperatur oven diatur pada kondisi 600°C, proses ini disebut *preheating* yang berlangsung selama 1 jam. Secara bersamaan dialirkan gas hidrogen sehingga lingkungan di dalam *oven* menjadi inert. Karbonisasi pada temperatur yang stabil (600°C) akan berlangsung selama 9 jam. Hasil karbonisasi dihaluskan menggunakan alat mortar penumbuk untuk selanjutnya diayak hingga berukuran lebih kecil dari 44 µm (325 mesh).



(a)

(b)

Gambar 3.3 Karbonisasi: (a) Bahan Baku Sabut Kelapa;

(b) Perangkat Oven untuk Pembuatan *Carbon Black*

3.4.3 Penimbangan

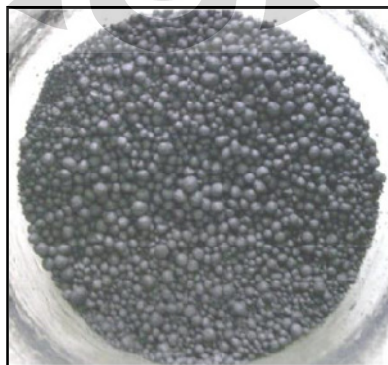
Proses ini dilakukan untuk mendapatkan ukuran yang sesuai dari berat bahan pada tiap komposisi sampel uji. Pada penelitian ini komposisi bahan untuk keempat sampel uji bernilai sama. Prosedur penimbangan adalah sebagai berikut:

1. Nyalakan tombol “on” pada alat.
2. Lakukan pengaturan alat pada kondisi angka nol.
3. Taruh gelas cawan di dalam timbangan dan kondisikan alat di angka nol.
4. Masukkan bahan yang akan ditimbang pada gelas cawan.
5. Timbang bahan sesuai dengan berat yang telah ditentukan.
6. Ulangi langkah 2-5 untuk bahan lainnya.

3.4.4 Pencampuran Bahan (*Mixing*)

Proses ini dilakukan setelah semua bahan ditakar jumlahnya sesuai dengan komposisi berat setiap sampel uji. Prosedur pencampuran adalah sebagai berikut:

1. Lakukan pengaturan temperatur mesin *hot plate* pada kondisi 100°C.
2. Campurkan grafit EAF dan *carbon black* ke dalam *beaker glass* untuk diaduk hingga merata.
3. Larutkan resin epoksi dengan metanol (35 ml), kemudian campurkan ke dalam *beaker glass* bersama campuran sebelumnya menggunakan *mixer* selama 5 menit.
4. Larutkan *hardener* dengan metanol (35 ml), kemudian campurkan ke dalam *beaker glass* bersama campuran sebelumnya menggunakan *mixer* selama 15 menit di atas *hot plate* hingga bakalan berbentuk butiran (*granule*) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4 berikut ini.

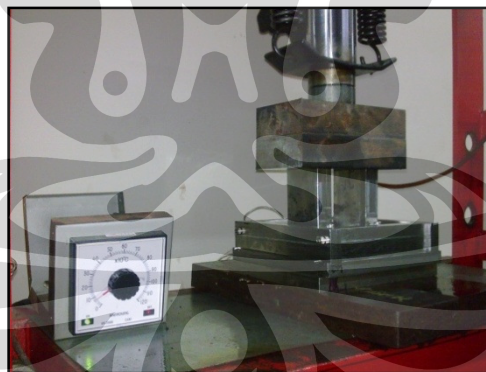


Gambar 3.4 Butiran Hasil Pencampuran

3.4.5 Pencetakan

Adonan yang diperoleh dari pencampuran bahan selanjutnya dicetak pada sebuah cetakan berbahan Duplex SS berukuran 15 cm x 15 cm. Cetakan ini dikombinasikan dengan *heater* untuk mengatur kondisi temperatur pencetakan. Penekanan dilakukan menggunakan *compression moulding machine*, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5. Prosedur pencetakan adalah sebagai berikut:

1. Bersihkan cetakan dari kotoran (debu dan karat) yang menempel dan lumuri dengan oli bersih secara merata pada bagian dalam cetakan.
2. Masukkan adonan hasil pencampuran ke dalam cetakan hingga merata.
3. Tutup cetakan dan masukkan ke dalam mesin tekan.
4. Atur tekanan mesin pada kondisi 300 kg/cm^2 dan temperatur senilai 70°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.
8. Ulangi langkah 1-7 untuk sampel berikutnya dengan tekanan yang berbeda (350 kg/cm^2 , 400 kg/cm^2 , dan 450 kg/cm^2).



Gambar 3.5 Pencetakan

3.4.6 Pembuatan Sampel Uji

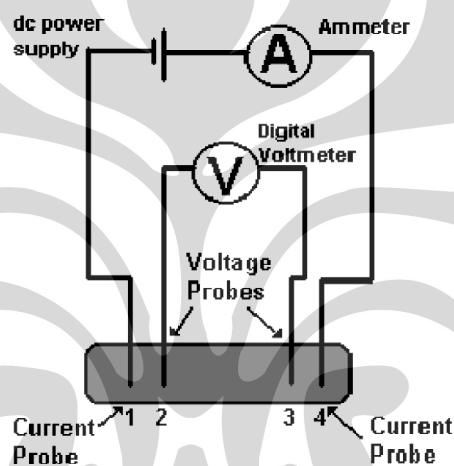
Pembuatan sampel uji adalah untuk pengujian fleksural, konduktivitas listrik, densitas, dan porositas. Pelat bipolar hasil pencetakan dibentuk ke dalam dimensi tertentu sesuai standar pengujian. Pada pengujian konduktivitas listrik, densitas, dan porositas digunakan sampel berukuran 2 cm x 2 cm. Sedangkan untuk pengujian fleksural digunakan sampel berukuran 12 cm x 1,3 cm x 0,3 cm.

3.5 Karakterisasi Pelat Bipolar

Karakterisasi ditujukan untuk mengetahui sejauh mana performa dari pelat bipolar baik dari segi mekanis maupun kelistrikan. Karakterisasi ini meliputi beberapa pengujian, diantaranya:

3.5.1 Pengujian Konduktivitas

Pengujian konduktivitas dilakukan menggunakan alat digital Veeco FPP 5000-*four point probe test*. Alat ini terdiri dari empat *probe* dimana sampel ditempatkan pada bagian permukaannya, seperti terlihat pada Gambar 3.6. Arus dialirkan melalui *probe* 1 dan 4, apabila terdapat tahanan listrik maka akan terjadi penurunan tegangan pada *probe* 2 dan 3 yang diukur dengan voltmeter digital.



Gambar 3.6 Skema Mesin *Four Point Probe Test*

Pada pengujian konduktivitas listrik digunakan cakram untuk menahan posisi sampel uji serta memfokuskan arus yang ditembakkan pada titik tertentu. Cakram terbuat dari polimer berwarna hitam yang berbentuk lingkaran dengan diameter dan ketebalan tertentu, seperti terlihat pada Gambar 3.7 di bawah ini.



Gambar 3.7 Mesin Veeco FPP 5000 - *Four Point Probe Test*

Prosedur pengujian konduktivitas listrik adalah sebagai berikut :

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

Dari hasil pengujian ini akan dihasilkan resistivitas listrik yang kemudian diubah menjadi nilai konduktivitas listrik sesuai persamaan 3.1 berikut ini:

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

Keterangan: σ = nilai konduktivitas [S/cm]
 ρ = resistivitas [Ω cm]

3.5.2 Pengujian Densitas

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

1. Timbang sampel pada temperatur ruang, catat sebagai berat sampel di udara (A).
2. Timbang sampel dalam kondisi terendam air dan melayang dalam *beaker glass* sesuai Gambar 3.8, catat sebagai berat sampel dalam air (B).
3. Berat sampel yang diperoleh disubstitusi ke dalam persamaan 3.2.



Gambar 3.8 Penimbangan Sampel dalam Air

Setelah diperoleh massa dari sampel, baik yang di udara maupun di dalam air, selanjutnya dapat dilakukan perhitungan rapat massa atau densitas dari sampel dengan menggunakan persamaan 3.2 berikut ini:

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

Keterangan: ρ = *bulk density* [gr/cm³]
 A = berat sampel di udara [gr]
 B = berat sampel dalam air [gr]
 ρ_{air} = densitas air [0,996232 gr/cm³]

3.5.3 Pengujian Porositas

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

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



Gambar 3.9 Sampel Dipanaskan dalam Air pada $T=100^{\circ}\text{C}$

Perhitungan nilai porositas dapat dihitung dengan persamaan:

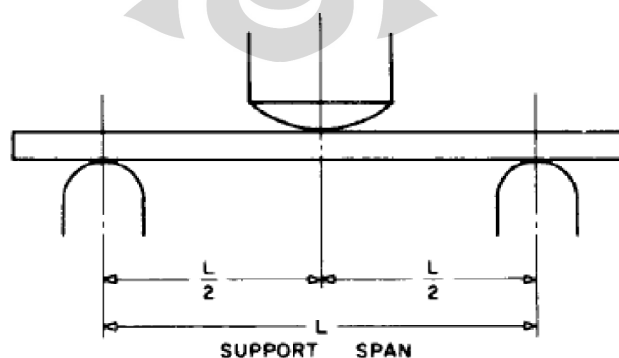
$$\% \text{ Porositas} = \frac{S_w - D}{D - S} \times 100\% \quad (3.3)$$

Keterangan:

- S_w = *Saturated Weight* [gr]
- D = *Dry Weight* [gr]
- S = *Suspended Weight* [gr]

3.5.4 Pengujian Fleksural

Pengujian fleksural bertujuan untuk mengetahui ketahanan dari pelat bipolar terhadap beban tekan. Pengujian ini disesuaikan dengan kondisi aplikasi pelat bipolar yang umumnya dibentuk dalam satu *stack* (susunan pelat saling berhimpitan) serta mendapatkan tekanan dari gas dari segala arah. Pengujian fleksural mengacu pada standar ASTM D790. Metode pengujian berupa metode *three point bending*, pembebanan diberikan pada bagian tengah sampel uji sesuai Gambar 3.10. Ukuran dari sampel uji adalah 12 cm x 1,3 cm x 0,3 cm.



Gambar 3.10 Skema Pengujian Fleksural

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



Gambar 3.11 Pengujian Fleksural

Dari pengujian akan diperoleh beban maksimal (P) yang diberikan terhadap sampel hingga terjadi perpatahan. Nilai kekuatan fleksural dari sampel didapat menggunakan persamaan 3.4 berikut ini.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

(3.4)

Keterangan:

- σ_f = kekuatan lentur [Mpa]
- P = beban maksimal [N]
- L = panjang sampel [mm]
- b = lebar sampel [mm]
- d = tebal sampel [mm]

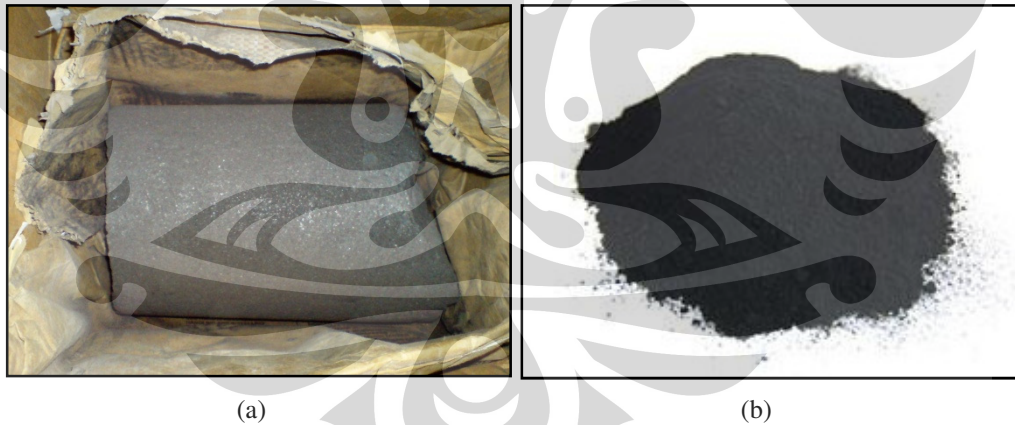
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Preparasi Sampel

Sebelum dilakukan pengujian untuk karakterisasi pelat bipolar, terdapat beberapa rangkaian proses awal yang perlu dilakukan. Rangkaian proses tersebut berupa preparasi grafit EAF, preparasi *carbon black*, pencampuran bahan (*mixing*), pencetakan, dan pembuatan smpel uji. Preparasi grafit EAF terdiri dari rangkaian proses *crushing*, *milling*, dan *screening*. Preparasi *carbon black* terdiri dari rangkaian proses karbonisasi, *crushing*, *milling*, dan *screening*. Hasil dari proses tersebut berpengaruh terhadap sifat akhir dari pelat bipolar.

4.1.1 Hasil Preparasi Grafit EAF

Preparasi grafit EAF bertujuan mereduksi ukuran dari bentuk awal berupa bongkahan menjadi bentuk partikel berukuran kurang dari 44 μm (325 mesh). Pada Gambar 4.1 terlihat bentuk grafit EAF sebelum dan sesudah preparasi.



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

4.1.2 Preparasi *Carbon Black*

Preparasi awal *carbon black* berupa karbonisasi yang berfungsi meningkatkan kadar karbon aktif dari *carbon black*. Hasil karbonisasi kemudian direduksi menjadi berukuran kurang dari 44 μm (325 mesh).



(a)

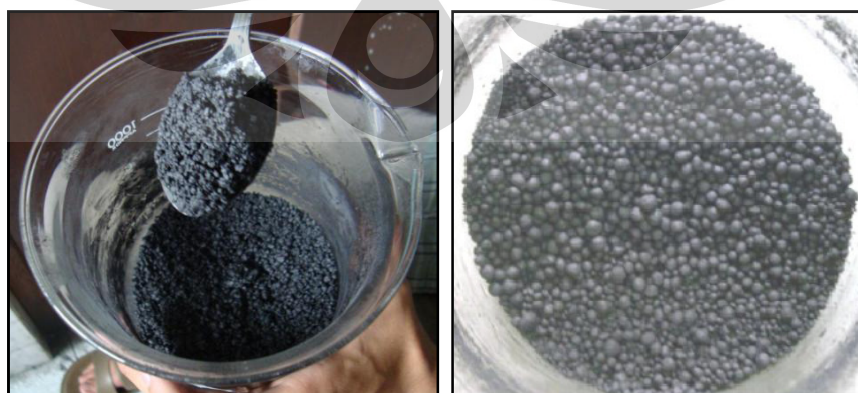
(b)

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

Pada Gambar 4.2a terlihat *carbon black* hasil karbonisasi berwarna hitam kecoklatan dengan tekstur serabut. Setelah ditumbuk dan diayak, diperoleh bentuk *carbon black* partikulat berwarna hitam, seperti terlihat pada Gambar 4.2b. Densitas dari *carbon black* hasil karbonisasi diketahui lebih rendah dibandingkan densitas grafit EAF dengan kadar karbon aktif senilai 55%.

4.1.3 Hasil Pencampuran Bahan (*Mixing*)

Hasil preparasi bahan (grafit EAF dan *carbon black*) berupa partikel berukuran kurang dari 44 μm (325 mesh) selanjutnya melalui tahap pencampuran (*mixing*) dengan resin epoksi dan *hardener*. Pencampuran dilakukan dengan dan tanpa pengaplikasian panas. Pencampuran dengan pengaplikasian panas dilakukan di atas *hot plate* pada temperatur 100°C. Pada Gambar 4.3 berikut ini terlihat hasil pencampuran awal dan hasil pencampuran akhir dari bahan.



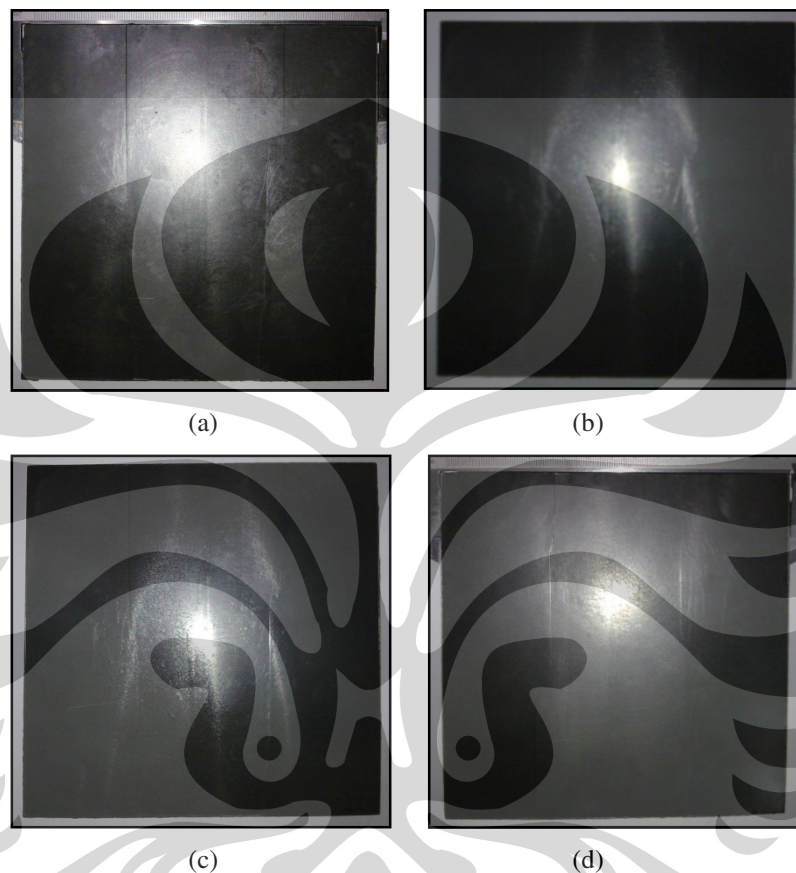
(a)

(b)

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

4.1.4 Hasil Pencetakan Pelat Bipolar

Pada penelitian ini dibuat empat buah pelat bipolar dengan metode *compression moulding* pada suhu cetakan 70°C selama empat jam. Pemberian variasi tekanan senilai 300 kg/cm^2 , 350 kg/cm^2 , 400 kg/cm^2 , dan 450 kg/cm^2 . Hasil pencetakan berukuran $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ dengan ketebalan 3-5 mm.



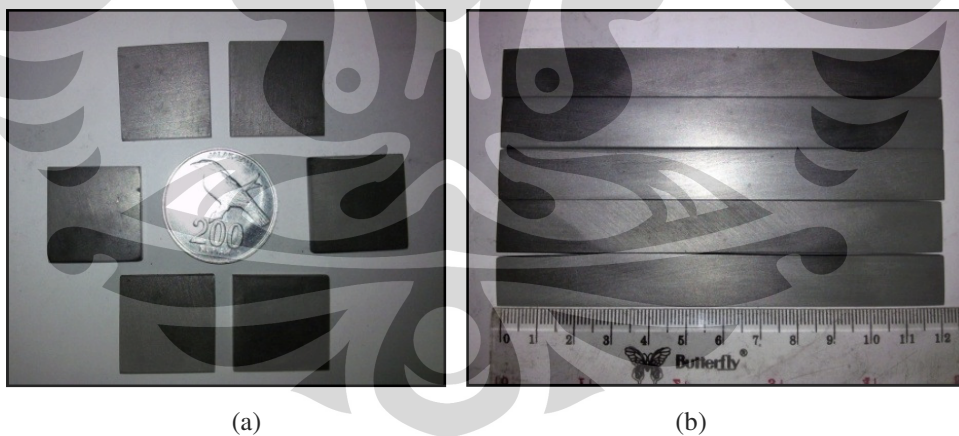
Gambar 4.4 Hasil Pencetakan Pelat Bipolar dengan Variasi Tekanan:
(a) 300 kg/cm^2 ; (b) 350 kg/cm^2 ; (c) 400 kg/cm^2 ; (d) 450 kg/cm^2

Dimensi panjang dan lebar dari pelat yang terbentuk sesuai dengan dimensi cetakan menandakan bakalan mengisi rongga cetakan dengan baik. Ketebalan pelat yang dihasilkan berbeda antar sisi berlawanan sehingga terlihat memiliki kemiringan. Hal ini kemungkinan terjadi karena perataan bakalan yang kurang sesuai sehingga menghasilkan variasi ketinggian terhadap cetakan. Ketika dilakukan pembebanan, distribusi penekanan menjadi tidak merata sehingga dihasilkan ketebalan pelat berbeda. Desain dari pelat menolerir terjadinya perbedaan ketebalan pelat tersebut.

Berdasarkan Gambar 4.4 terlihat bahwa permukaan dari keempat pelat cukup halus dan tanpa adanya kerusakan seperti retak dan berporos. Hal ini berarti parameter variasi tekanan dapat diaplikasikan dengan baik. Namun pada keempat pelat umumnya terdapat pori pada bagian sisi. Pori yang terbentuk dapat disebabkan oleh penguapan metanol yang merupakan pelarut matriks polimer epoksi. Warna hitam pelat menandakan konstituen karbon mendominasi komposisi bahan karbon-polimer komposit. Pada permukaan pelat tampak terdapat relief yang merupakan jejak dari cetakan. Jejak ini nantinya perlu dihilangkan dengan pengamplasan untuk dipersiapkan sebagai sampel uji.

4.1.5 Hasil Pembuatan Sampel Uji

Sebelum dilakukan pengujian untuk karakterisasi pelat bipolar, dilakukan preparasi sampel berdasarkan ukuran sesuai standar pengujian. Selanjutnya permukaan sampel dihaluskan sehingga *initial crack* di permukaan dapat direduksi. Sampel uji yang dihasilkan terlihat pada Gambar 4.5 dimana terdapat perbedaan dimensi antara sampel uji fleksural dengan sampel uji lainnya (konduktivitas, densitas, dan porositas).



Gambar 4.5 Sampel uji (a) Konduktivitas, Densitas, Porositas (b) Fleksural

Secara umum sampel uji karakteristik telah sesuai dengan standar ukuran untuk pengujian dan memiliki permukaan yang halus. Namun tetap didapati sedikit perbedaan dimensi dari sampel uji dikarenakan pemotongan dan pengampelasan yang kurang presisi. Perbedaan dimensi yang minimal tersebut dinilai tidak mempengaruhi hasil pengujian secara signifikan.

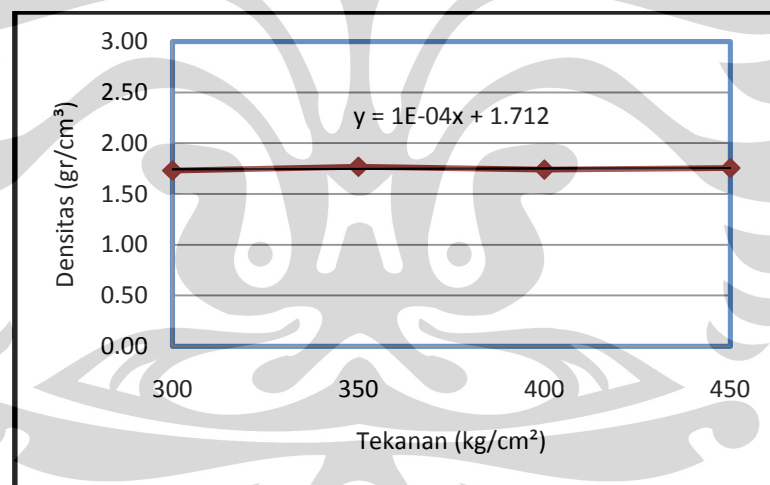
4.2 Pembahasan Hasil Pengujian Karakterisasi

4.2.1 Densitas

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui massa jenis dari pelat bipolar. Diketahui bahwa densitas akan mempengaruhi massa dari suatu benda. Pada pemanfaatan pelat bipolar untuk aplikasi FCV diharapkan nilai densitas rendah sehingga didapat massa yang ringan. Massa yang ringan akan meningkatkan efisiensi dari kendaraan. Namun semakin kecil densitas maka sifat mekanis dan konduktivitas listrik mengalami kecenderungan penurunan^[26, 28]. Pada Tabel 4.1 berikut ini ditunjukkan hasil pengujian densitas keempat sampel.

Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian Densitas

Sampel	A	B	C	D
Tekanan [kg/cm^2]	300	350	400	450
Densitas [gr/cm^3]	1,73	1,77	1,74	1,76



Gambar 4.6 Pengaruh Tekanan *Compression Moulding* Terhadap Densitas

Berdasarkan Gambar 4.6 terlihat bahwa tidak didapati perbedaan signifikan akibat variasi tekanan pencetakan. Namun tetap terlihat kecenderungan peningkatan densitas akibat pengaruh peningkatan tekanan^[7, 27]. Densitas dari keempat sampel berada pada nilai $1,73 \text{ gr}/\text{cm}^3$ – $1,77 \text{ gr}/\text{cm}^3$. Nilai ini telah sesuai dengan persyaratan nilai densitas, yaitu kurang dari $5 \text{ gr}/\text{cm}^3$.

Perbedaan nilai densitas ini diketahui terjadi karena mekanisme pemadatan oleh tekanan disertai temperatur selama pencetakan^[27]. Pengaplikasian temperatur

akan menguapkan metanol yang berfungsi sebagai pelarut resin epoksi dan *hardener*. Selain itu selama pemanasan terjadi pembentukan struktur jaring silang (*cross-linked structure*) polimer yang rapat disertai terperangkapnya pori hasil penguapan metanol. Pengaplikasian tekanan akan semakin merapatkan jarak ikatan dan mendesak keberadaan pori. Pemadatan ini berpengaruh terhadap penurunan ketebalan dan peningkatan densitas pelat bipolar yang terbentuk.

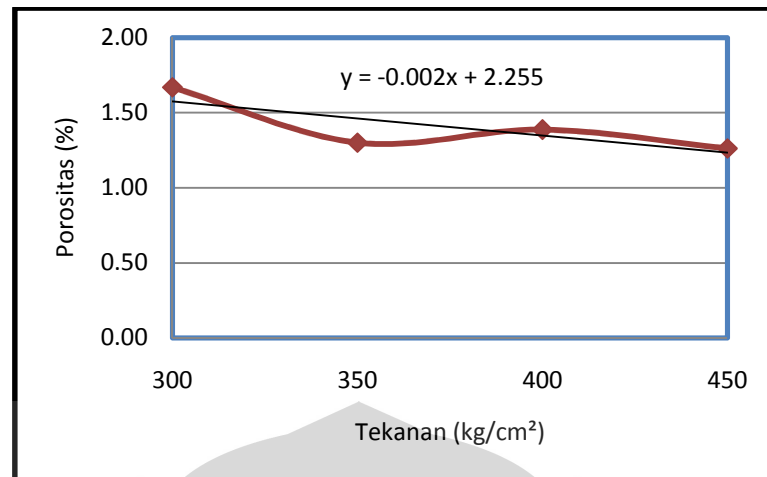
Perolehan nilai densitas dari penelitian ini lebih rendah dibandingkan hasil penelitian sebelumnya pada tekanan 300 kg/cm², yaitu 1,83 gr/cm³^[14]. Hal ini kemungkinan terjadi karena densitas dari *carbon black* hasil karbonisasi lebih rendah dibandingkan *carbon black* sintetis. Tahapan karbonisasi pada temperatur tinggi akan membuat struktur *carbon black* semakin berpori^[31]. Peningkatan pori semakin menurunkan massa jenis *carbon black* dan mempengaruhi densitas komposit ketika *carbon black* dikomposisikan ke dalamnya^[16].

4.2.2 Porositas

Porositas merupakan rongga yang terbentuk dalam suatu material akibat pengaruh senyawa gas. Gas ini umumnya berasal dari luar sistem (uap air dan gas) ataupun dari dalam sistem (bagian komposisi bahan yang dapat menguap) yang terbentuk selama pembentukan material tersebut. Dalam pembuatan pelat bipolar karbon-polimer komposit, kehadiran porositas tidak dapat dihindari. Namun apabila jumlah porositas terlalu banyak maka dapat mempengaruhi efisiensi sistem *fuel cell* karena reaksi sel dapat terganggu oleh kehadiran gas yang terdistribusi melalui pori. Oleh karena itu diharapkan persentase porositas pada pelat bipolar senilai kurang dari 1%. Pada Tabel 4.2 di bawah ini ditunjukkan hasil pengujian porositas keempat sampel.

Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Porositas

Sampel	A	B	C	D
Tekanan [kg/cm ²]	300	350	400	450
Porositas [%]	1,67	1,30	1,39	1,26



Gambar 4.7 Pengaruh Tekanan *Compression Moulding* Terhadap Porositas

Pada Gambar 4.7 ditunjukkan pengaruh tekanan *compression moulding* terhadap porositas dari pelat bipolar. Terlihat kecenderungan penurunan persentase porositas seiring meningkatnya nilai tekanan. Mekanisme pemadatan berpengaruh terhadap penurunan tersebut seiring pemberian tekanan pada temperatur 70°C^[27]. Pemadatan meningkatkan kerapatan massa dan menekan keberadaan pori. Nilai persentase porositas dari pengujian berada pada kisaran nilai 1,26% - 1,67%. Nilai tersebut lebih besar dari standar nilai porositas. Hal ini kemungkinan terjadi karena pengaruh *carbon black* yang memiliki struktur berpori^[15, 30]. Apabila *carbon black* dikomposisikan berlebih maka porositas meningkat akibat pori tidak terisi oleh matriks secara merata.

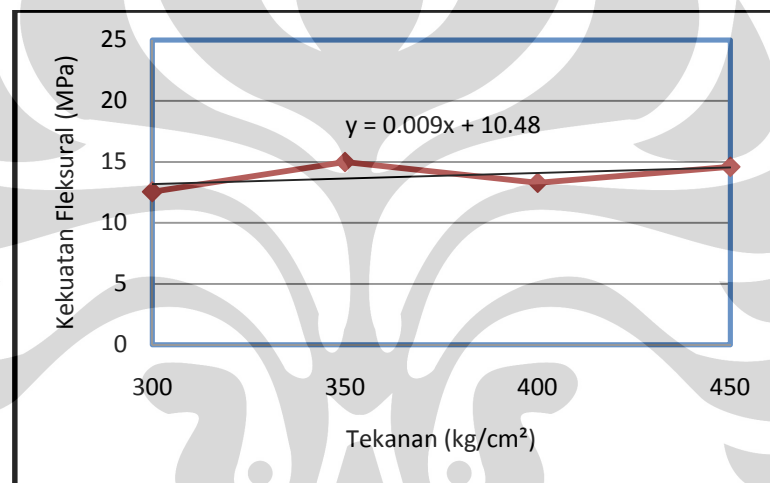
Porositas sampel A senilai 1,67% dari penelitian ini bernilai lebih tinggi dibandingkan hasil porositas pada penelitian sebelumnya, yaitu 0,48%^[14]. Porositas sampel dengan *carbon black* hasil karbonisasi bernilai tiga kali lebih besar dibandingkan porositas sampel dengan *carbon black sintesis*. Struktur poros dan ukuran partikel *carbon black* mempengaruhi hasil tersebut. Pada penelitian sebelumnya digunakan *carbon black sintesis* dengan ukuran partikel kurang dari 50 mikron. Ukuran partikel *carbon black* hasil karbonisasi yang semakin kecil membuatnya sulit terdistribusi merata pada matriks dan cenderung membentuk pengelompokan atau *cluster*^[9, 29]. Hal ini akan semakin meningkatkan porositas karena kerapatan ikatan partikel tidak optimum.

4.2.3 Fleksural

Pengujian fleksural dilakukan untuk mengetahui nilai ketahanan pelat bipolar terhadap suatu beban tekan. Hasil dari pengujian ini penting karena pada pengaplikasiannya pelat bipolar akan mengalami tekanan gas dari segala arah. Pada Tabel 4.3 di bawah ini ditunjukkan hasil pengujian fleksural keempat sampel.

Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Fleksural

Sampel	A	B	C	D
Tekanan [kg/cm^2]	300	350	400	450
Fleksural [Mpa]	12,54	15	13,28	14,60



Gambar 4.8 Pengaruh Tekanan *Compression Moulding* Terhadap Kekuatan Fleksural

Berdasarkan Gambar 4.8 terlihat kecenderungan peningkatan kekuatan fleksural seiring peningkatan tekanan *compression moulding*. Peningkatan kekuatan fleksural merupakan efek dari pemadatan yang menghasilkan penurunan porositas dan membentuk ikatan antarmuka yang kuat. Penurunan porositas meminimalkan *initial crack* yang terjadi karena pembebanan^[25]. Ikatan antarmuka yang kuat menandakan distribusi pembebanan antara matriks dan bahan penguat dapat berjalan baik^[16]. Oleh karena itu pelat bipolar dapat menerima pembebanan yang lebih besar sebelum mengalami *initial crack* dan terjadi perpatahan.

Hasil kekuatan fleksural dari pelat bipolar minimal senilai 12,54 MPa dan maksimal senilai 14,80 MPa. Nilai tersebut belum memenuhi standar kekuatan fleksural, yaitu senilai 25 MPa. Tidak tercapainya standar dapat dipengaruhi oleh

komposisi *carbon black*. Komposisi *carbon black* maksimum untuk mendapatkan sifat pelat bipolar komposit yang optimum diketahui senilai 5%^[7]. Ketika komposisi bernilai lebih rendah ataupun lebih tinggi dari nilai optimum maka penurunan sifat mekanis dan kelistrikan akan terjadi.

Selain itu densitas dari *carbon black* diketahui lebih rendah dibandingkan grafit EAF. Hal ini berarti *carbon black* memiliki permukaan kontak yang lebih besar dibanding grafit EAF. Pada satu sisi peningkatan permukaan kontak akan menghasilkan jarak antar karbon yang minimum sehingga ikatan antarmuka meningkat^[7]. Namun di sisi lain hal tersebut membuat *carbon black* bersifat *inhomogen* (tidak seragam), yaitu cenderung membentuk *cluster* sehingga tidak terdistribusi merata dalam matriks. Terbentuknya *cluster* akan melemahkan ikatan antarmuka sehingga menurunkan sifat mekanis pelat bipolar^[28].

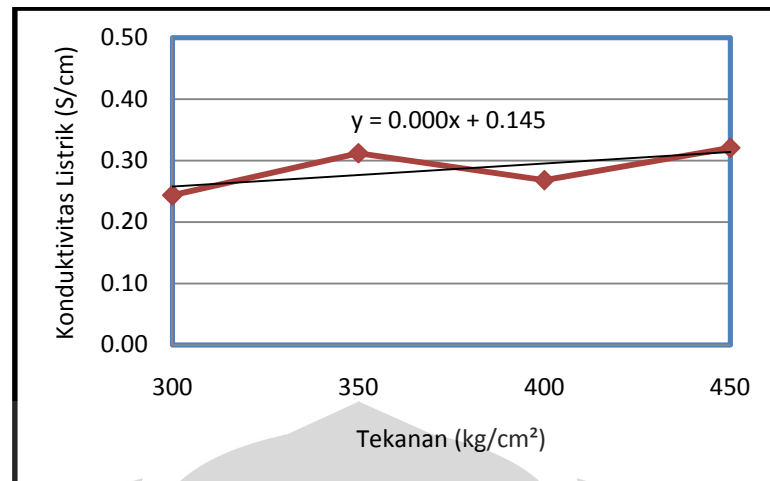
Hasil pengujian fleksural sampel A senilai 12,54 MPa pada penelitian ini lebih rendah bila dibandingkan hasil penelitian sebelumnya, yaitu 13,79 MPa^[14]. Perbedaan ini dapat dikaitkan dengan tingginya porositas sampel uji pelat bipolar dengan komposisi *carbon black* hasil karbonisasi. Porositas merupakan sumber *initial crack* ketika komposit mengalami pembebanan. Ketika porositas semakin tinggi maka penyerapan energi menjadi berkurang yang berdampak pada penurunan kekuatan fleksural.

4.2.4 Konduktivitas

Nilai konduktivitas menjadi fokus utama pengembangan pelat bipolar karbon-polimer komposit. Pelat bipolar dengan konduktivitas tinggi akan mampu mengalirkan arus listrik antar elektroda dengan baik. Alat *four point probe* digunakan untuk mengukur resistivitas listrik pelat bipolar untuk dikonversi ke dalam nilai konduktivitas listrik. Pada Tabel 4.4 dapat dilihat pengaruh variasi tekanan *compression moulding* terhadap konduktivitas listrik pelat bipolar.

Tabel 4.4 Data Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik

Sampel	A	B	C	D
Tekanan [kg/cm ²]	300	350	400	450
Konduktivitas [S/cm]	0,24	0,31	0,27	0,32



Gambar 4.9 Pengaruh Tekanan *Compression Moulding* Terhadap Konduktivitas Listrik

Berdasarkan Gambar 4.9 nilai konduktivitas listrik maksimum yang diperoleh adalah 0,32 S/cm. Nilai tersebut masih jauh dari standar DOE untuk konduktivitas listrik, yaitu minimum 100 S/cm. Apabila menganalisa pengaruh penambahan tekanan *compression moulding* maka didapati kecenderungan peningkatan konduktivitas listrik. Peningkatan tekanan berperan dalam menurunkan jarak antar partikel sehingga menghasilkan kerapatan massa tinggi^[28]. Seperti diketahui luas permukaan dan jarak mempengaruhi efisiensi aliran listrik. Semakin kecil luas permukaan dan jarak rambatan aliran listrik maka nilai hambatan akan semakin rendah^[28].

Pengujian konduktivitas listrik untuk sampel A senilai 0,24 S/cm bernilai lebih tinggi bila dibandingkan hasil penelitian sebelumnya, yaitu 0,22 S/cm^[14]. Nilai tersebut tidak berbeda secara signifikan atau dapat diindikasikan sama. Daya pembasahan dan porositas pelat bipolar dapat menjadi parameter nilai konduktivitas listrik. Ketika daya pembasahan semakin baik maka sifat mekanis dan konduktivitas listrik dari komposit dapat semakin meningkat. Porositas yang buruk lebih disebabkan oleh distribusi *carbon black* yang tidak cukup merata sehingga meningkatkan nilai resistansi listrik. Hal ini berarti *carbon black* hasil karbonisasi memiliki sifat dasar yang lebih baik dari *carbon black* sintetis. Apabila distribusinya dalam matriks dapat lebih merata maka nilai konduktivitas listrik pelat bipolar dapat semakin tinggi.

4.3 Perbandingan Sifat Pelat Bipolar

Berdasarkan hasil karakterisasi pelat bipolar karbon-poliemer komposit yang ditinjau dari pengaruh variasi tekanan *compression moulding* maka didapatkan perbandingan sifat akhir sebagai berikut.

Tabel 4.5 Perbandingan Sifat Pelat Bipolar

Sampel	A	B	C	D
Tekanan [kg/cm ²]	300	350	400	450
Densitas [gr/cm]	1,73	1,77	1,74	1,76
Porositas [%]	1,67	1,30	1,39	1,26
Fleksural [Mpa]	12,54	14,80	13,28	14,60
Konduktivitas [S/cm]	0,24	0,31	0,27	0,32

Berdasarkan Tabel 4.5 terlihat nilai densitas terbesar dimiliki sampel B, porositas terkecil oleh sampel D, kekuatan fleksural tertinggi pada sampel B, dan konduktivitas listrik terbaik untuk sampel D. Secara keseluruhan nilai yang didapat masih jauh dari pencapaian standar DOE. Dari hasil yang didapat maka diketahui keterkaitan sifat satu sama lain sedikit menyimpang karena perolehan data sampel B. Menurut literatur peningkatan tekanan akan menaikkan densitas, kekuatan fleksural, dan konduktivitas listrik serta menurunkan persentase porositas^[27]. Namun anomali yang terjadi dapat diabaikan karena kecenderungan sifat yang muncul telah sesuai dengan literatur. Penelitian lebih lanjut dibutuhkan untuk menghasilkan perbedaan signifikan dari parameter tekanan yang diberikan dengan lebih memperhatikan sifat dasar bahan penyusun. Pemahaman sifat dasar material menjadi penentu komposisi yang sesuai dan parameter proses yang tepat untuk mengoptimalkan sifat akhir komposit yang dihasilkan.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan analisa hasil penelitian maka dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu:

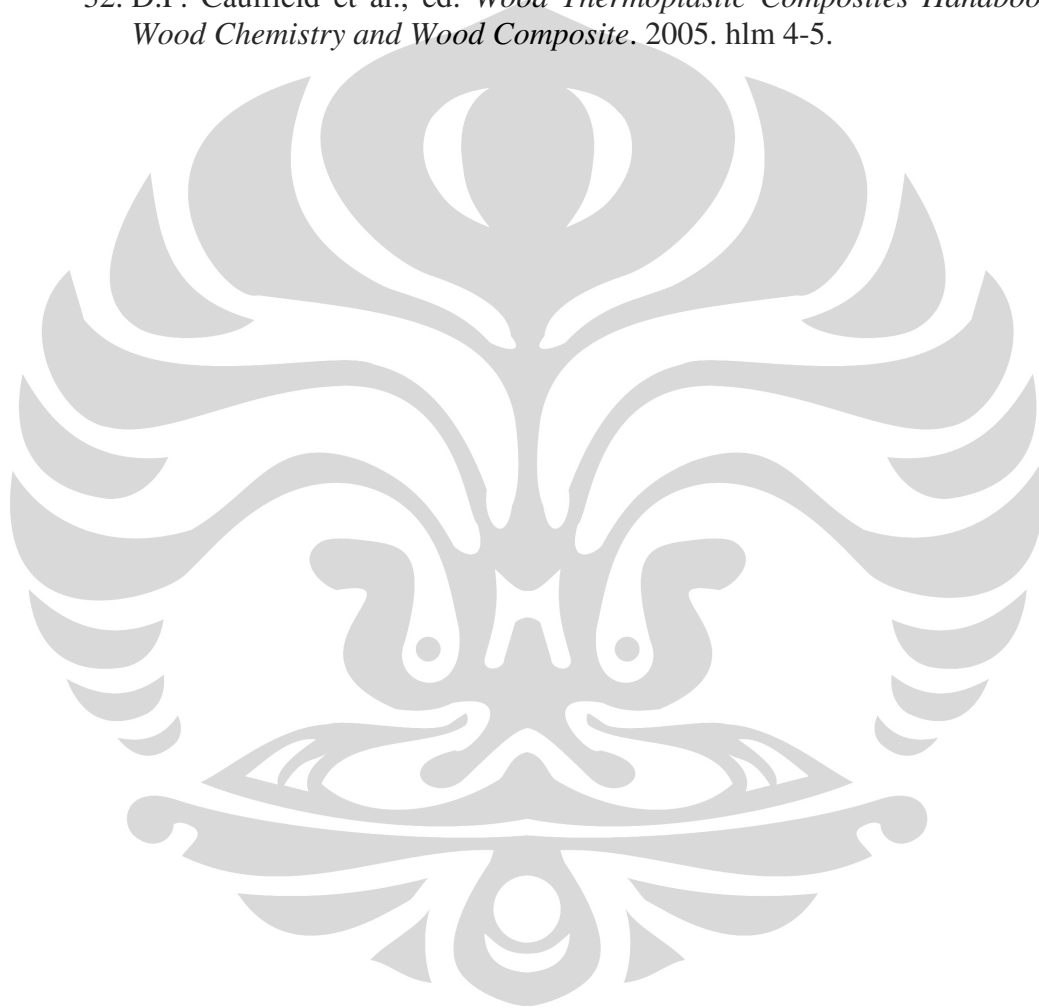
1. Sifat fisik pelat bipolar yang dibuat dengan variasi tekanan *compression moulding* hingga 450 kg/cm^2 bersifat baik sehingga parameter tekanan optimum pada penelitian ini dapat diimplementasikan pada tahapan komersialisasi.
2. Peningkatan tekanan *compression moulding* ($300 \text{ kg/cm}^2 - 450 \text{ kg/cm}^2$) berpengaruh terhadap peningkatan densitas, kekuatan fleksural dan konduktivitas listrik serta penurunan persentase porositas.
3. Densitas keempat sampel telah sesuai standar, yaitu kurang dari 5 gr/cm^3 . Densitas minimum $1,73 \text{ gr/cm}^3$ (300 kg/cm^2) dan maksimum $1,77 \text{ gr/cm}^3$ (350 kg/cm^2).
4. Porositas seluruh sampel lebih besar dari standar senilai lebih dari 1%. Persentase porositas minimum 1,26% (450 kg/cm^2) dan maksimum 1,67% (300 kg/cm^2).
5. Kekuatan fleksural sampel kurang dari standar senilai 25 Mpa. Nilai minimum 12,54 Mpa (300 kg/cm^2) dan maksimum 15 Mpa (350 kg/cm^2).
6. Keempat sampel memiliki konduktivitas listrik yang berada di bawah standar senilai kurang dari 100 S/cm. Konduktivitas listrik minimum senilai 0,24 S/cm (300 kg/cm^2) dan maksimum 0,32 S/cm (450 kg/cm^2).
7. Penggunaan *carbon black* hasil karbonisasi sebagai bahan pengisi membentuk pelat bipolar dengan nilai densitas, kekuatan fleksural, dan konduktivitas yang lebih baik dibandingkan *carbon black* sintetis. Meskipun nilai porositasnya bersifat lebih buruk.

DAFTAR PUSTAKA

1. Bossel, Ulf. *Alternative Energy Conversion*. European Fuel Cell Forum. Switzerland: Oberrohrdorf, 5-8 June 2008.
2. Stambouli, A. Boudghene, and E. Traversa. *Fuel Cells, an Alternative to Standard Sources of Energy*. Italy: University of Roma, 2001.
3. Sopian, Kamaruzzaman, and Wan Ramli Wan Daud. *Challenges and Future Developments in Proton Exchange Membrane Fuel Cells*. Malaysia: Universiti Kebangsaan Malaysia, 2005.
4. U.S. Department of Energy. *Fuel Cell Handbook*. 7th Edition. West Virginia: Morgantown, 2004.
5. Rayment, Chris, and Scott Sherwin. *Introduction to Fuel Cell Technology*. Notre Dame: University of Notre Dame, 2003.
6. Mehta, Viral, and Joyce Smith Cooper. *Review and Analysis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing*. Seattle: University of Washington, 2002.
7. Ling Du. *Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. 2008.
8. Hermanna, Allen, Tapas Chaudhuria, and Priscila Spagnolb. *Bipolar plates for PEM Fuel Cells : A Review*. Golden National Renewable Energy Laboratory: University of Colorado, 2005.
9. Xiao Zi Yuan, et al., ed. *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells - From Materials to Processing*. Vancouver: University of British Columbia, 2006.
10. Xianguo Li, and Imran Sabir. *Review of Bipolar Plates in PEM Fuel Cells: Flow-Field Designs*. Canada: University Avenue West, 2004.
11. 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.
12. Kakati, B.K. et al., ed. *The Electrical Conductivity of a Composite Bipolar Plate for Fuel Cell Applications*. India, 2009.
13. Cooper, Joyce S. *Design Analysis of PEMFC Bipolar Plates Considering Stack Manufacturing and Environment Impact*. Seattle: University of Washington, 2003.

14. Fauziah, Farah. *Pengaruh Penambahan 10-20wt% Carbon Black Terhadap Karakterisasi Komposit Epoxy/Grafit EAF Sebagai Material Pelat Bipolar PEMFC*. Depok: Universitas Indonesia, 2009
15. Kakati, Biraj Kumar, and Dhanapati Deka. *Effect of Resin Matrix Precursor on the Properties of Graphite Composite Bipolar Plate for PEM Fuel Cell*. India: Tezpur University, 2007.
16. ASM International Committee. *Composites*. ASM Handbook Vol. 21. 2001.
17. UChicago Argonne. *Just the Basics*. 2009.
18. Holland, B.J., J.G. Zhu, and L. Jamet. *Fuel Cell Technology and Application*. Sydney: University of Technology, 2007.
19. Steele, Brian C. H., and Angelika Heinzl. *Materials for Fuel-Cell Technologies*. Macmillan Magazines Ltd. Germany, 2001.
20. Reddy, Ramana G. *Fuel Cell and Hydrogen Economy*. Tuscaloosa: University of Alabama, 2006.
21. In Uk Hwanga, et al., ed. *Bipolar Plate Made of Carbon Fiber Epoxy Composite for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells*. Korea, 2008.
22. Yuhua Wang. *Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. Ontario: Chemical Engineering University of Waterloo, 2006.
23. Heinzl, A., F. Mähendorf, and C. Jansen. *Bipolar Plates*. Duisburg: University of Duisburg, 2009.
24. DOE Hydrogen Program. *Next Generation Bipolar Plates for Automotive PEM Fuel Cells*. Annual Progress Report. 2007.
25. Callister, William D., Jr. *Materials Science and Engineering*. 7th ed. United States of America: University of Utah, 2007.
26. Akovali, Guneri, ed. *Handbook of Composite Fabrication*. Ankara, 2001.
27. Suhandi, Andi, et al., ed. *Research on PEMFC Graphite Composite Bipolar Plate Influenced by Composition of Filler and Binder*. Tangerang: Puspiptek Serpong, 2008.
28. 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.

29. Hsu-Chiang, et al., ed. *Preparation, Electrical, Mechanical and Thermal Properties of Composite Bipolar Plate for a Fuel Cell*. Taiwan, 2004.
30. ASM International Committee. *Casting*. ASM Metals Handbook Vol. 15. 9th ed. 1988.
31. Weber, Erik H. *Development and Modeling of Thermally Conductive Polymer/Carbon Composites*. Michigan: Michigan Technological University, 1999.
32. D.F. Caulfield et al., ed. *Wood Thermoplastic Composites Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite*. 2005. hlm 4-5.



Lampiran 1. Hasil Pengujian Densitas

Sampel		A (udara)	B (air)	A-B	$\rho_{\text{air}} (T=28^\circ\text{C})$	ρ_{sampel}
		[gr]	[gr]	[gr]	[gr/cm ³]	[gr/cm ³]
300 kg/cm ²	1	2,94	1,25	1,69	0,996232	1,73
	2	2,98	1,27	1,71	0,996232	1,74
	3	2,98	1,26	1,72	0,996232	1,73
	4	3,00	1,26	1,74	0,996232	1,73
	5	3,47	1,48	1,99	0,996232	1,74
	6	4,01	1,70	2,31	0,996232	1,73
350 kg/cm ²	1	3,37	1,46	1,91	0,996232	1,76
	2	3,28	1,44	1,84	0,996232	1,78
	3	3,38	1,47	1,91	0,996232	1,76
	4	3,58	1,58	2,00	0,996232	1,78
	5	3,62	1,56	2,06	0,996232	1,75
	6	3,42	1,50	1,92	0,996232	1,77
400 kg/cm ²	1	3,05	1,29	1,76	0,996232	1,73
	2	3,32	1,45	1,87	0,996232	1,77
	3	3,33	1,43	1,9	0,996232	1,75
	4	3,02	1,28	1,74	0,996232	1,73
	5	3,04	1,27	1,77	0,996232	1,71
	6	3,06	1,32	1,74	0,996232	1,75
450 kg/cm ²	1	2,94	1,28	1,66	0,996232	1,76
	2	2,91	1,26	1,65	0,996232	1,76
	3	2,68	1,15	1,53	0,996232	1,75
	4	2,72	1,17	1,55	0,996232	1,75
	5	2,98	1,31	1,67	0,996232	1,78
	6	2,62	1,12	1,50	0,996232	1,74

Contoh perhitungan: *Sampel 1 (300 kg/cm²)

$$\rho = \frac{A - B}{B} \times \rho_{\text{air}} = \frac{2,94 - 1,25}{1,25} \times 0,996232 = 1,73 \text{ gr/cm}^3$$

Lampiran 2. Hasil Pengujian Porositas

Sampel		Berat jenuh (S _w)	Berat kering (D)	Suspended weight (S)	Porositas
		[gr]	[gr]	[gr]	[%]
300 kg/cm ²	1	2,90	2,88	1,21	1,20
	2	2,92	2,90	1,25	1,21
	3	2,93	2,89	1,23	2,41
	4	2,93	2,90	1,23	1,80
	5	3,40	3,36	1,43	2,07
	6	3,97	3,94	1,67	1,32
350 kg/cm ²	1	3,37	3,34	1,47	1,60
	2	3,28	3,26	1,44	1,10
	3	3,36	3,34	1,45	1,06
	4	3,57	3,54	1,54	1,50
	5	3,62	3,59	1,57	1,49
	6	3,40	3,38	1,48	1,05
400 kg/cm ²	1	3,00	2,97	1,22	1,71
	2	3,28	3,26	1,34	1,04
	3	3,28	3,25	1,33	1,56
	4	2,97	2,94	1,21	1,73
	5	2,98	2,96	1,18	1,12
	6	3,03	3,01	1,26	1,14
450 kg/cm ²	1	2,90	2,88	1,25	1,23
	2	2,85	2,83	1,19	1,22
	3	2,65	2,63	1,10	1,31
	4	2,67	2,65	1,11	1,30
	5	2,93	2,91	1,24	1,20
	6	2,61	2,59	1,07	1,32

Contoh perhitungan: *Sampel 1 (300 kg/cm²)

$$\% \text{ Porositas} = \frac{S_w - D}{D - S} = \frac{2,9 - 2,88}{2,88 - 1,21} \times 100\% = 1,20\%$$

Lampiran 3. Hasil Pengujian Fleksural

Sampel		Tebal (d)	Lebar (b)	Panjang (L)	Load (P)	Fleksural
		[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[Mpa]
300 kg/cm ²	1	4,30	14,40	64	32,00	11,54
	2	4,05	12,60	64	28,80	13,38
	3	4,00	13,30	64	28,80	12,99
	4	4,05	12,20	64	28,80	13,82
	5	4,25	13,20	64	27,20	10,95
350 kg/cm ²	1	4,65	14,40	64	54,40	16,77
	2	4,55	13,60	64	48,00	16,36
	3	4,10	14,30	64	35,20	14,06
	4	4,60	15,00	64	51,20	15,49
	5	4,40	14,20	64	35,20	12,29
400 kg/cm ²	1	4,50	13,60	64	40,00	13,94
	2	4,60	13,40	64	40,00	13,54
	3	4,45	14,50	64	40,00	13,37
	4	4,40	14,50	64	33,60	11,49
	5	4,40	14,10	64	40,00	14,07
450 kg/cm ²	1	4,30	14,20	64	35,20	12,87
	2	4,05	13,50	64	33,60	14,57
	3	4,00	14,10	64	33,60	14,30
	4	4,25	14,10	64	43,20	16,28
	5	4,10	13,40	64	35,20	15,00

Contoh perhitungan: *Sampel 1 (300 kg/cm²)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} = \frac{3(32 \times 64)}{2(14,4 \times 4,3^2)} = 11,54 \text{ MPa}$$

Lampiran 4. Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik


Sampel		Pengujian Resistansi ke-			Rata2	Tebal	Konduktivitas
		1	2	3	[$\Omega.cm$]	[mm]	[S/cm]
300 kg/cm ²	1	5,14	5,90	5,43	5,49	3,89	0,18
	2	5,42	7,40	4,02	5,61	3,90	0,18
	3	4,05	2,94	2,85	3,28	3,60	0,31
	4	4,23	4,06	3,94	4,07	3,72	0,25
	5	5,62	7,31	5,53	6,15	4,06	0,16
	6	5,73	5,26	5,69	5,56	3,90	0,18
350 kg/cm ²	1	0,39	0,39	0,39	0,39	3,45	2,57
	2	5,01	0,65	5,12	3,60	3,50	0,28
	3	5,07	5,04	0,54	3,55	3,45	0,28
	4	0,54	0,53	6,92	2,66	3,65	0,38
	5	6,36	6,60	9,53	7,50	3,55	0,13
	6	5,54	5,68	5,27	5,50	3,65	0,18
400 kg/cm ²	1	5,23	4,45	4,92	4,87	3,75	0,21
	2	3,19	4,74	4,38	4,10	3,55	0,24
	3	5,15	7,79	6,09	6,34	3,65	0,16
	4	5,18	4,63	5,72	5,18	3,40	0,19
	5	5,25	0,94	3,63	3,27	3,95	0,31
	6	4,78	3,86	3,14	3,93	3,95	0,26
450 kg/cm ²	1	4,30	5,97	5,97	5,41	3,55	0,19
	2	0,50	4,03	4,26	2,93	3,50	0,34
	3	5,61	5,63	7,66	6,30	3,55	0,16
	4	2,13	2,64	2,12	2,30	3,60	0,44
	5	7,46	6,50	6,11	6,69	3,70	0,15
	6	4,37	4,69	4,67	4,58	3,60	0,22

Contoh perhitungan: *Sampel 1 (300 kg/cm²)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{5,49} = 0,18 \text{ S/cm}$$

Lampiran 5. Spesifikasi Resin Epoksi

EP


Technical Information

Bakelite® EPR 174

Unmodified, liquid standard epoxy resin based on Bisphenol-A


Characteristics		Unit	Value
Properties			
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.

SPECIFICATION :

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

TYPICAL PROPERTIES :

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

TYPICAL PROPERTIES IN A CURED COATING :

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

TYPICAL CURED RESIN PROPERTIES :

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

CHEMICAL RESISTANCE PROPERTIES :

(weight change after 10 days immersion, %)

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

PT. Justr Kimiara
JAKARTA

Lampiran 7. Spesifikasi Grafit EAF PT. Krakatau Steel

WED, 29-JUL-09 12:20 DIV SSP II PTKS CLG 62 0254 371184

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

Material Code Name & Spesification	Material Unit Group	B O H	Min	Max
01518429 GRAPHITE,ELECTRODE-D610X2700-60-66KA	KG	169,298.900	350,000.000	1000,000.000

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

MANUFACTURE :

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

(Lanjutan)

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

CILEGON ----- -----

INVENTORY CONTROL SYSTEM Item No : 00908011

DATE : 04.12.2007

GROUP/CLASS : 443019132

Nato-name : ELECTRODE,

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

GRAPHITE,ELECTRODE-D406X1800MM-20-46KA

GRAPHITE ELECTRODE

GRADE: ULTRA HIGH POWER (UHP)

DIA.: 406 MM

LENGTH: 1800 MM

POROSITY:15 - 26%

BULK DENSITY:1.66-1.72 GR/CM3

RESISTANCE:5.0-6.0 OHM/M

THERMAL CONDUCTIVITY:120-300 W/MK

COMPRESIVE STRENGTH:260-262 KG/CM2

CURRENT CARRYING CAPACITY:20-46 KA

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

ASH CONTENT'S:0.5% MAX

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

COMPLETE WITH ACCESSORIES :

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

MANUFACTURE :

GENSUPP ELECTRODE-ARC-D406MMX1800MM-20-46KA

Lampiran 8. Spesifikasi Metanol

Metanol	
Formula	CH₃OH
Massa	32,05 gr/mol
Penampakan	Cairan tidak berwarna
Densitas	0,7918 gr/cm ³
Titik Leleh	-97 °C / -142,9 °F / 176 K
Titik Didih	64,7 °C / 148,4 °F / 337,8 K
Kelarutan dalam Air	Larut

