



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN 0.87-1.74%wt *SUPERFINE*
ALUMINIUM POWDER TERHADAP KARAKTERISASI PELAT
BIPOLAR PEMFC**

SKRIPSI

DELVI ARDI

0706268386

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

UNIVERSITAS INDONESIA

JUNI 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN 0.87-1.74%wt *SUPERFINE*
ALUMINIUM POWDER TERHADAP KARAKTERISASI
PELAT BIPOLAR PEMFC**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Sarjana Teknik

DELVI ARDI

0706268386

FAKULTAS TEKNIK


PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

UNIVERSITAS INDONESIA

JUNI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Delvi Ardi
NPM : 0706268386
Tanda Tangan : 
Tanggal : 30 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

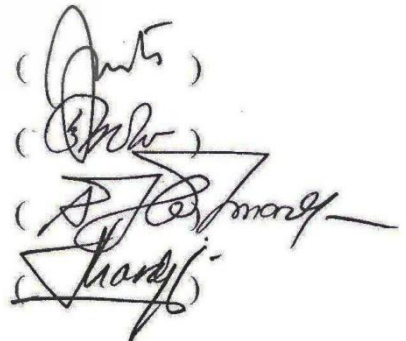
Skripsi ini diajukan oleh,

Nama : Delvi Ardi
NPM : 0706268386
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Penambahan 0.87-1.74% wt *Superfine Aluminium Powder* Terhadap Karakterisasi Pelat Bipolar PEMFC

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

DEWAN PENGUJI

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



(Yunita)
(Bambang)
(Akhmad)
(Sri)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah swt. Atas berkat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan tepat waktu. Penulisan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Penambahan 0.87-1.74%wt *Superfine Aluminium Powder* Terhadap Karakterisasi Pelat Bipolar PEMFC”** dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Teknik dari Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis sangat sadar bahwa tanpa adanya dukungan, pertolongan dan bimbingan dari berbagai pihak, maka proses pembuatan skripsi ini mungkin akan sulit diselesaikan. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

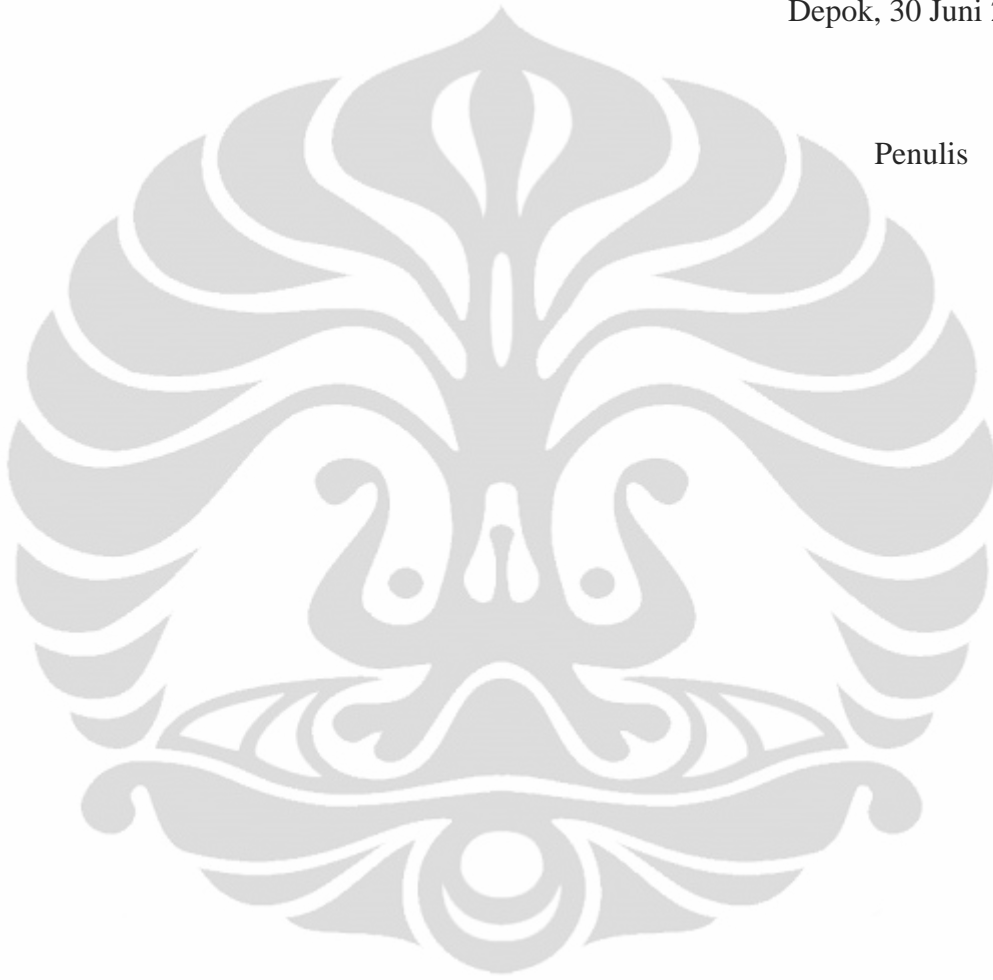
1. Ir. Yunita Sadeli, M.Sc selaku dosen pembimbing dari Departemen Metalurgi dan Material yang telah rela meluangkan waktu, tenaga, pikiran, serta bantuan lain baik dorongan moril maupun materil.
2. Bpk. Dr. Ir. Bambang Prihandoko, MT sebagai pembimbing dari Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang banyak membantu dan membimbing penulis dalam penelitian ini.
3. Keluarga penulis khususnya kedua orang tua untuk kepercayaan yang tulus serta dukungan baik moril maupun materil terhadap penulis
4. Kepala laboratorium Pengujian Konduktivitas Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
5. Kepala laboratorium Pengujian Fleksural Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
6. Dosen dan staf Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia
7. Rekan-rekan satu tim dalam penelitian ini.
8. Pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

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

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

Depok, 30 Juni 2011

Penulis



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

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

Nama : Delvi Ardi
NPM : 0706268386
Program Studi : Metalurgi & Material
Departemen : Metalurgi & Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

**Pengaruh Penambahan 0.87-1.74%wt *Superfine Aluminium Powder*
Terhadap Karakterisasi Pelat Bipolar 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 memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 30 Juni 2011

Yang menyatakan



(Delvi Ardi)

ABSTRAK

Nama : Delvi Ardi
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Penambahan 0.87-1.74%wt *Superfine Aluminium Powder* Terhadap Karakterisasi Pelat Bipolar PEMFC

Pada *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC), pelat bipolar merupakan komponen utama yang memenuhi sekitar 80% volum *fuel cell*, 70% bobot *fuel cell*, dan 60% biaya produksi. Pelat bipolar berfungsi sebagai penghubung elektrik antara dua elektroda dengan kutub yang berbeda, mendistribusikan gas reaktan (H_2 dan O_2), penghantar elektron dari anoda ke katoda, penghantar panas dari dan menuju elektroda mengalirkan produk akhir dalam bentuk air dari tiap sel, penghalang perpindahan gas antar sel, dan menjaga stabilitas struktur dari PEMFC itu sendiri. Persyaratan yang harus dimiliki pelat bipolar, yaitu densitas rendah, sifat mekanis dan konduktivitas listrik yang tinggi, mudah diproses, dan murah.

Pelat bipolar PEMFC dapat dibuat dengan metode *compression moulding* dengan variasi penambahan *aluminium powder* (0.87-1.74%wt) menggunakan tekanan 55 MPa pada temperatur 100°C selama 4 jam. Material penyusun pelat bipolar ini antara lain grafit EAF, *carbon black*, *aluminum powder*, resin epoksi, hardener, dan metanol. Total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit adalah 144 gram. Perbandingan komposisi grafit EAF: (*carbon black* + *aluminum powder*), yaitu 95%:5% dari 80% total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit sedangkan perbandingan resin epoksi:hardener, yaitu 50%:50% dari 20% total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit.

Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui pengaruh penambahan *aluminum powder* terhadap sifat mekanis dan konduktivitas listrik pelat bipolar yang dihasilkan. Konduktivitas listrik terbesar didapat pada pelat bipolar dengan penambahan 1.52%wt *aluminium powder*, dengan nilai konduktivitas sebesar 0.53 S/cm dan kekuatan fleksural 52.88 MPa. Nilai densitas untuk kelima variabel penambahan penguat *aluminium powder* (0.87-1.74%wt) berada pada rentang 1,6-1,7 gr/cm³, kekuatan fleksural sebesar 36-58 MPa, serta porositas $\leq 1,5\%$.

Kata kunci:

PEMFC, *compression moulding*, *aluminium powder*, pelat bipolar, komposit, konduktivitas listrik, kekuatan fleksural, densitas, porositas

ABSTRACT

Name : Delvi Ardi
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : The Effect of The Addition of 0.87-1.74wt% Superfine Aluminum Powder on PEMFC Bipolar Plate Characterization

In Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC), bipolar plate is a major component which dominate about 80% volume of the fuel cell, 70% weight of the fuel cell, and 60% of production costs. Bipolar plate serves as an electrical connection between two electrodes with different poles, distribute reactant gases (H_2 and O_2), sending electrons from anode to cathode, distribute heat from and toward cathode, discharge the final product in the form of water from each cell, as a barrier of the gas migration between cell, and maintain the stability of the PEMFC structure. Bipolar plate are required to have low density, excellent conductivity and mechanical properties, easy to process, and low cost production.

PEMFC bipolar plate has been fabricated by compression molding method with the addition of variations of aluminum powder (0.87-1.74wt%) at pressure of 55 Mpa, temperature of $100^\circ C$ for 4 hours. Constituent material consisting of EAF graphite, carbon black, aluminum powder, epoxy resin, hardener, and methanol. Total weight of composite bipolar plate components are 144gram. Ratio of graphite EAF: (carbon black + aluminium powder) is 95%:5% from 80% of the total weight of component composite bipolar plate. Meanwhile ratio of epoxy resin:hardener is 50%:50% from 20% of the total weight of composite bipolar plate components.

This study focused to determine the effect of the addition aluminum powder on electrical conductivity and mechanical properties of bipolar plate. The maximum electrical conductivity obtain by adding 1.52wt% of aluminium powder with value of 0.53 S/cm and flexural strength of 52,88 MPa. The density value for the five sample with addition of aluminum powder (0.87-1.74wt%) as filler in range of 1,6-1,7 gr/cm^3 , flexural strength of 36-58 MPa, with porosity $\leq 1,5\%$.

Keywords:

PEMFC, compression moulding, aluminium powder, bipolar plate, composite, electrical conductivity, flexural strength, density, porosity

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	6
1.5 Sistematika Penulisan	7
BAB 2. DASAR TEORI.....	8
2.1 <i>Fuel Cell</i>	8
2.2 <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)</i>	11
2.2.1 Struktur PEMFC.....	14
2.2.2 Pelat Bipolar.....	15
2.3 Material Komposit.....	22
2.4 Material Penyusun Pelat Bipolar.....	26
2.4.1 Grafit EAF.....	26
2.4.2 <i>Carbon Black</i>	30
2.4.3 Metanol.....	33

2.4.4 Resin Epoksi.....	34
2.4.5 <i>Superfine Aluminium Powder</i>	38
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....	41
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	41
3.1.1 Diagram Alir Fabrikasi Sampel.....	41
3.1.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel.....	42
3.2 Komposisi Pelat Bipolar dan Variabel Penelitian.....	43
3.3 Alat dan Bahan.....	44
3.3.1 Peralatan.....	44
3.3.2 Bahan.....	45
3.3.2.1 Grafit EAF.....	45
3.3.2.2 <i>Carbon Black</i>	45
3.3.2.3 Resin Epoksi.....	46
3.3.2.4 Metanol.....	47
3.3.2.5 <i>Superfine Aluminium Powder</i>	48
3.4 Proses Pembuatan Pelat.....	48
3.4.1 Proses Penghalusan Grafit EAF dan <i>Carbon Black</i>	48
3.4.2 Penimbangan.....	49
3.4.3 Proses Pencampuran.....	49
3.4.4 Proses Pencetakan.....	51
3.4.5 Pembuatan Spesimen Uji.....	52
3.4.6 Proses Karakterisasi Material Pelat Bipolar.....	53
3.4.6.1 Pengujian Konduktivitas.....	53
3.4.6.2 Pengujian Densitas.....	54
3.4.6.3 Pengujian Porositas.....	55
3.4.6.4 Pengujian Fleksural.....	57
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	59
4.1 Hasil Preparasi Sampel.....	59
4.1.1 Hasil Preparasi Grafit EAF.....	59
4.1.2 Hasil Preparasi <i>Carbon Black</i>	59

4.1.3 Hasil Pencampuran.....	60
4.2 Pengamatan Visual Pelat Bipolar Hasil Pencetakan.....	61
4.3 Hasil Pembuatan Spesimen Uji.....	63
4.4 Pembahasan Hasil Pengujian Spesimen Uji.....	64
4.4.1 Pengujian Densitas.....	64
4.4.2 Pengujian Porositas.....	67
4.4.3 Pengujian Fleksural.....	70
4.4.4 Pengujian Konduktivitas.....	72
4.3 Perbandingan Sifat Pelat Bipolar.....	74
BAB 5. KESIMPULAN.....	76
DAFTAR ACUAN.....	77
LAMPIRAN.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Tren dan Perkiraan Kebutuhan Energi Dunia.....	1
Gambar 1.2	Skema Kerja <i>Fuel Cell</i>	3
Gambar 2.1	Reaksi Anoda dan Katoda pada Berbagai Jenis <i>Fuel Cell</i>	11
Gambar 2.2	Prinsip Kerja PEMFC.....	12
Gambar 2.3	Skema Struktur Komponen PEMFC	14
Gambar 2.4	Pelat Bipolar	16
Gambar 2.5	Klasifikasi Pelat Bipolar Berdasarkan Material Penyusunnya	17
Gambar 2.6	Jenis Penguat yang Terdistribusi pada Matiks Komposit.....	23
Gambar 2.7	Parameter dari Bahan Pengisi pada Komposit : (a) Konsentrasi; (b) Ukuran; (c) Bentuk; (d) Distribusi; (e) Orientasi.....	24
Gambar 2.8	Ikatan Antarmuka.....	25
Gambar 2.9	Ikatan Interfasa.....	26
Gambar 2.10	Struktur Kristal Grafit.....	27
Gambar 2.11	Tungku Busur Listrik.....	28
Gambar 2.12	Pengaruh Penambahan Grafit terhadap Resistansi dan Konduktivitas Listrik.....	29
Gambar 2.13	Struktur <i>Carbon Black</i>	31
Gambar 2.14	Pengaruh Penambahan <i>Carbon Black</i>	32
Gambar 2.15	Skematik Komposit yang Mengandung Bahan Pengisi Konduktif dalam Jumlah Besar (• = Bahan Pengisi Konduktif dan = Adhesive).....	32
Gambar 2.16	Ilustrasi Skematik dari (a) Berbagai Hambatan Tersusun secara Seri, (b) Partikel <i>Carbon Black</i> Ditempatkan di antara Lapisan Grafit untuk Mengurangi Nilai Hambatan R_e	33
Gambar 2.17	Struktur Metanol.....	34
Gambar 2.18	Struktur Dasar Epoksi.....	35
Gambar 2.19	Reaksi antara epoksi resin dan <i>hardener</i>	37
Gambar 2.20	Bentuk partikel <i>aluminium powder</i>	38

Gambar 2.21	a.) Efek dari kandungan aluminium terhadap nilai konduktivitas listrik elektroda grafit b.) Variasi nilai konduktivitas listrik dari elektroda grafit dengan temperatur pencetakan	39
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian (Fabrikasi Pelat Bipolar)	41
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian (Karakterisasi Pelat Bipolar)	42
Gambar 3.3	(a) Serabut kelapa sebelum pirolisis; (b) Carbon black setelah di- <i>milling</i> dan ayak.....	46
Gambar 3.4	Hasil Pencampuran Bahan-Bahan Penyusun Komposit.....	50
Gambar 3.5	Cetakan yang Digunakan (Kiri) dan Penempatan Cetakan pada Mesin <i>Hydraulic Pressure Machine</i> (Kanan).....	52
Gambar 3.6	Sampel Uji Konduktivitas, Densitas, dan Porositas	52
Gambar 3.7	Sampel Uji Fleksural	53
Gambar 3.8	(a) Mesin Veeco FPP 5000 - <i>Four Point Probe Test</i> dan Ilustrasi Skematis dari Mesin <i>Four Point Probe Test</i> (b).....	53
Gambar 3.9	Penimbangan Sampel di Air	55
Gambar 3.10	Sampel Dipanaskan dalam Air pada Temperatur 100 ⁰ C.....	56
Gambar 3.11	(a) Skema Pengujian Fleksural (b) dan Proses Pengujian Fleksural	57
Gambar 4.1	Grafit EAF (a) Bongkahan Grafit Sebelum Preparasi; (b) Serbuk Grafit Hasil Preparasi	59
Gambar 4.2	<i>Carbon Black</i> (a) Hasil Pirolisis ; (b) Hasil Pengayakan	60
Gambar 4.3	Pencampuran grafit EAF dan <i>carbon black</i> menggunakan jar <i>planetary ball mill</i>	60
Gambar 4.4	a.) Hasil pencampuran sebelum proses <i>hot plate</i> b.) Hasil bakalan setelah proses <i>hot plate</i>	61
Gambar 4.5	Pelat Bipolar yang Dihasilkan pada Variasi Penambahan <i>Aluminum Powder</i> : a.) 1 gr, b.) 1,25gr c.) 1,5 gr, d.) 1.75gr, dan e.) 2gr	62
Gambar 4.6	Sampel uji a.) Fleksural, b.) Konduktivitas, Densitas, dan Porositas	64
Gambar 4.7	Pengaruh Penambahan Aluminium Terhadap Densitas	66

Gambar 4.8 Pengaruh Penambahan Aluminium Terhadap Porositas68
Gambar 4.9 Pengaruh Penambahan Aluminium Terhadap Kekuatan Fleksural
.....71
Gambar 4.10 Pengaruh Penambahan Aluminium Terhadap Konduktivitas 73



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi <i>Fuel Cell</i>	10
Tabel 2.2	Komponen Utama PEMFC	15
Tabel 2.3	Target Teknis <i>Department of Energy</i> (DOE), USA untuk karakteristik pelat bipolar.....	18
Tabel 2.4	Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Beberapa Material sebagai Pelat Bipolar.....	21
Tabel 2.5	Perbandingan Nilai Konduktivitas dari Material Pelat Bipolar	22
Tabel 2.6	Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel Grafit	30
Tabel 2.7	Sifat Umum Metanol.....	34
Tabel 2.8	Keunggulan dan Kelemahan Resin Epoksi.....	35
Tabel 3.1	Komposisi Pelat dan Variasi <i>Aluminium powder</i> pada Proses <i>Compression Moulding</i>	43
Tabel 3.2	Spesifikasi Polimer Epoksi Resin Eposchon	46
Tabel 3.3	Spesifikasi Polimer Hardener Resin Eposchon.....	47
Tabel 3.4	Spesifikasi Metanol.....	48
Tabel 3.5	Spesifikasi <i>Aluminium Powder</i>	48
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Densitas	65
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Porositas.....	68
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Kekuatan Fleksural	70
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik.....	72
Tabel 4.5	Perbandingan Karakteristik Pelat dengan Variasi Penambahan <i>Aluminum Powder</i>	75

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Pengujian Porositas	81
Lampiran 2. Hasil Pengujian Densitas	83
Lampiran 3. Hasil Pengujian Fleksural	85
Lampiran 4. Hasil Pengujian Konduktivitas	87
Lampiran 5. Spesifikasi Resin Epoksi	89
Lampiran 6. Spesifikasi Epoksi <i>Hardener</i>	90
Lampiran 7. Spesifikasi Grafit EAF	91
Lampiran 8. Spesifikasi Metanol	92
Lampiran 9. Tabel Densitas Air	93
Lampiran 10. Peralatan yang Digunakan Pada Penelitian	95

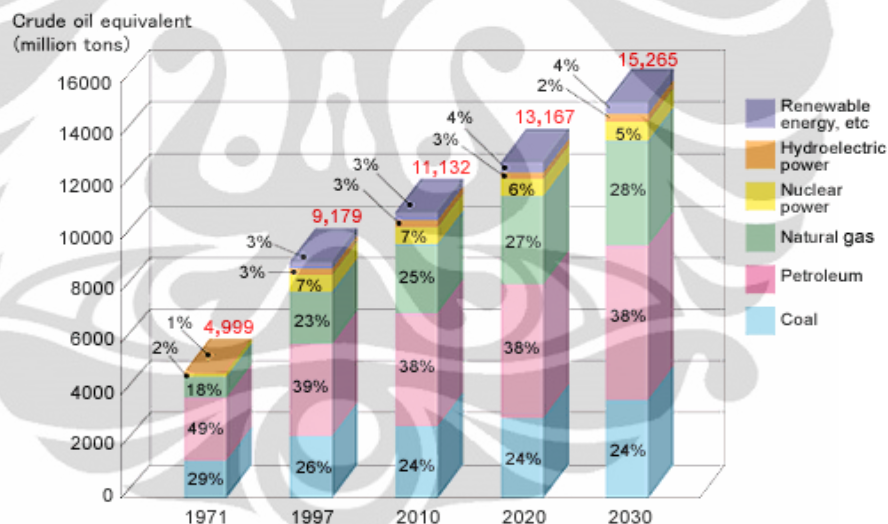
BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketersediaan sumber energi fosil yang semakin menipis untuk memenuhi kebutuhan konsumsi energi dunia menimbulkan perdebatan global untuk mencari sumber alternatif energi potensial. Seiring dengan terus meningkatnya populasi penduduk dunia serta laju pertumbuhan ekonomi dan teknologi yang terus berkembang dengan pesat mendorong semakin cepatnya terjadi krisis energi.

Sebagaimana diketahui, minyak bumi dan batu bara merupakan energi yang tidak dapat diperbaharui (*unrenewable resources*) namun masih merupakan sumber energi utama seperti terlihat pada Gambar 1.1 di bawah ini.



Gambar 1.1 Tren dan Perkiraan Kebutuhan Energi Dunia^[1]

Gambar 1.1 menunjukkan nilai sesungguhnya konsumsi energi dunia mulai tahun 1971 sampai 2011 dan prediksi konsumsi energi sampai dengan tahun 2030 dengan menghitung rata-rata peningkatan konsumsi energi per tahun. Energi merupakan kebutuhan yang vital bagi masyarakat untuk menyokong pertumbuhan, pembangunan berkelanjutan, dan aktivitas ekonomi. Namun, disisi lain penggunaan energi fosil juga memiliki dampak negatif pada lingkungan

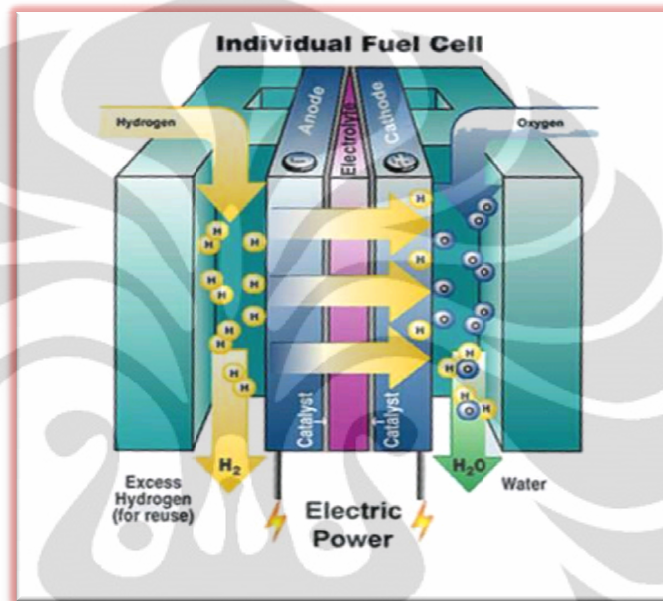
karena bahan bakar fosil menghasilkan pembakaran yang berkontribusi besar terhadap pemanasan global.

Berbagai riset dan teknologi menjadi sorotan dunia khususnya negara-negara maju untuk mencari sumber energi alternatif sebagai pengganti energi fosil. Namun, berbagai persoalan timbul dalam upaya melakukan konversi ini, mulai dari biaya yang mahal, teknologi proses, sampai kuantitas dari energi alternatif tersebut untuk memenuhi kebutuhan dari total energi yang diperlukan. Beberapa sumber daya energi alternatif yang potensial untuk dikembangkan sebagai solusi permasalahan tersebut di antaranya adalah energi sel surya (*solar cell*), energi panas bumi (*geothermal*), energi angin, energi nuklir dan energi hidrogen atau yang lebih dikenal sebagai sel tunam (*fuel cell*)^[2].

Energi fosil berasal zat-zat renik yang terdekomposisi pada lapisan batuan bumi selama berjuta-juta tahun lalu sehingga energi fosil ini tidak dapat diperbarui^[3]. Sumber energi fosil, yang juga merupakan sumber utama bahan bakar, akan mencapai kelangkaan apabila dilihat dari permintaan energi yang terus meningkat di negara-negara maju dan berkembang^[4]. Selain itu, energi bahan bakar fosil yang digunakan saat ini bersifat *unsustainable* dimana suatu saat bahan bakar fosil ini akan habis sehingga tidak bisa memenuhi permintaan energi yang akan selalu meningkat. Oleh karena itu, diperlukan langkah konkrit sebagai tantangan memenuhi kebutuhan energi dengan memperhatikan aspek lingkungan yakni mengurangi emisi gas rumah kaca. Sebagai upaya mengantisipasi ketidakmampuan energi fosil beberapa dekade mendatang untuk dapat memenuhi kebutuhan energi global, diperlukan pengembangan energi alternatif lebih baik. Salah satu dari energi alternatif potensial yang sedang dikembangkan adalah sel tunam atau yang biasa disebut *fuel cell*.

Fuel cell memiliki kelebihan dari sumber energi alternatif lain dari segi efektivitas, kebisingan yang rendah, serta ramah lingkungan sehingga sesuai dengan *issue* pemanasan global yang gencar saat ini. *Fuel cell*, sebagai sebuah sistem pembangkit listrik, menghasilkan energi dari reaksi kimia dari pencampuran gas hidrogen (H₂) yang berasal dari air dengan oksigen (O₂) dari udara. *Fuel cell* tidak mengalami *discharged* dan akan terus menghasilkan energi

seiring suplai bahan bakar secara simultan terhadapnya^[5]. Prinsip kerja *fuel cell* adalah kebalikan dari elektrolisis. Elektrolisis memisahkan H_2O menjadi H_2 dan O_2 . *Fuel cell* bekerja dengan gas hidrogen (H_2) sebagai sumber energi dikombinasikan dengan oksigen (O_2), secara elektrokimia menghasilkan energi listrik sebagai hasil utama, air (H_2O) dan panas sebagai hasil sampingan seperti yang terlihat pada Gambar 1.2



Gambar 1.2 Skema kerja *Fuel Cell*^[6]

Pada *fuel cell*, proses kimia yang disebut pertukaran ion terjadi didalam elektrolit dan hasilnya adalah listrik, air dan panas. *Fuel cell* menghasilkan energi listrik tanpa adanya pembakaran dari bahan bakarnya sendiri, sehingga tidak ada polusi yang mengakibatkan kerusakan lingkungan.

Jenis dari *fuel cell* berbeda untuk setiap tahap pengembangannya. Klasifikasi utama dari *fuel cell* dilihat dari tipe elektrolit yang digunakan dalam sel yaitu ; *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)^[5].

Salah satu dari jenis *fuel cell* yang mulai dikembangkan yaitu *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC). PEMFC merupakan terobosan untuk aplikasi *mobile* dan transportasi karena memiliki keunggulan dibandingkan

sumber energi listrik lain seperti efisiensi dan rapat arus tinggi, temperatur operasi rendah, suplai bahan bakar yang baik juga mempunyai *lifetime* yang tinggi^[7].

Pada PEMFC, digunakan material berupa membran polimer, katalis elektroda, dan juga pelat bipolar. Katalis elektroda berfungsi untuk mempercepat terjadinya reaksi sel baik pada anoda maupun katoda. Membran polimer berfungsi sebagai elektrolit yang menghantarkan proton ke katoda dan menghalangi elektron dari anoda menuju katoda^[8]. Membran merupakan konduktor yang sangat baik, karena hanya menggunakan air sehingga meminimalisir masalah korosi. Pelat bipolar merupakan bagian dari struktur sistem *fuel cell* yang memiliki fungsi sebagai pengatur pendistribusian bahan bakar *fuel cell* (gas hidrogen-oksigen), pengumpul arus listrik yang dihasilkan sistem *fuel cell*, dan sebagai struktur penguat (*integrity*) susunan *fuel cell*. Pelat bipolar berfungsi sebagai penghubung elektrik antara dua elektroda dengan kutub yang berbeda, mendistribusikan gas reaktan (hidrogen dan oksigen), penghantar elektron dari anoda ke katoda, penghantar panas dari dan menuju elektroda mengalirkan produk akhir dalam bentuk air dari tiap sel, penghalang perpindahan gas antar sel, dan menjaga stabilitas struktur dari PEMFC itu sendiri^[9].

Banyak hal menyebabkan PEMFC belum dapat diproduksi secara massal juga dikomersialisasi seperti biaya produksi yang tinggi dan sulitnya tempat penyimpanan serta pendistribusian gas hidrogen. Untuk memotong biaya produksi sebuah PEMFC, perlu dilakukan pengurangan biaya bahan baku dan produksi, salah satunya yaitu pelat bipolar. Pelat bipolar sendiri merupakan komponen utama pada PEMFC yang memenuhi sekitar 80% volume *fuel cell*, 70% bobot *fuel cell*, dan 60% biaya produksi^[9].

Pelat bipolar yang terbuat dari logam umumnya memiliki nilai konduktivitas yang sangat tinggi, dan tahan terhadap beban kejut dan getaran. Namun, pelat bipolar yang dihasilkan cenderung terlalu berat sehingga kurang *portable*, mudah terkorosi, dan biaya manufakturnya menjadi mahal untuk satu keseluruhan rangkaian *fuel cell*. Untuk mengatasi masalah tersebut, dikembangkan pelat bipolar berbasis komposit dengan material penyusun antara lain grafit EAF dan *carbon black* sebagai *filler*, aditif *aluminium powder* untuk meningkatkan

kondutivitas listrik dari pelat bipolar dan matriks berupa polimer resin termoset, mengingat jenis polimer ini memiliki sifat pendukung, seperti densitas yang rendah, harga yang relatif lebih murah, sifat mekanik yang baik, ketahanan yang baik terhadap korosi, kimia dan kelembaban, tidak ada emisi penguapan, penyusutan yang rendah selama pemanasan, kestabilan dimensi yang baik, sifat termal, adesif, dan listrik yang baik.

Ditengah maraknya isu mengenai pencemaran lingkungan dan guna memanfaatkan limbah sisa hasil produksi, maka penggunaan grafit *Electric Arc Furnace* (EAF) atau elektroda busur listrik limbah proses peleburan baja sangatlah tepat. Selain penggunaan bahan baku yang murah, diperlukan proses fabrikasi komposit pelat bipolar yang sederhana, cepat, dan murah. Proses fabrikasi yang memenuhi persyaratan tersebut adalah melalui proses *hot blending* dan *compression moulding*.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan mendasar dalam mengembangkan PEMFC yaitu mahalnya biaya produksi sebuah pelat bipolar. Material polimer menjadi salah satu solusi karena memiliki rasio perbandingan berat yang kecil sehingga berat pelat bipolar dari 80% total berat PEMFC dapat direduksi sehingga biaya produksi dapat berkurang. Namun, polimer sebagai pelat bipolar umumnya memiliki nilai konduktivitas rendah, sehingga perlu ditambahkan suatu aditif untuk meningkatkan sifat konduktivitasnya. Salah satu aditif yang biasa ditambahkan yaitu *aluminium powder*. *Aluminium powder* dengan sifat konduktivitas listrik yang lebih tinggi dari material penyusun lainnya diharapkan dapat meningkatkan sifat konduktif dan mekanis dari pelat bipolar yang dihasilkan.

Pada umumnya, sifat material komposit dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, yang salah satunya telah disebutkan di atas yaitu material penyusun^[14]. Selain itu, sifat material komposit juga dapat dipengaruhi dari fasa yang terdispersi dalam matriks. Distribusi partikel grafit, *carbon black*, dan aluminium juga dapat mempengaruhi konduktivitas listrik dari pelat bipolar. *Carbon black* diharapkan dapat terdispersi dengan baik dan membentuk jaringan antar karbon dalam polimer yang berfungsi sebagai sirkuit elektrik sehingga dengan mudah dapat mengalirkan arus listrik dan mengurangi efek isolator dari polimer.

Matriks yang digunakan dalam pembuatan pelat bipolar ini adalah epoksi resin dan penguat (*reinforced*) berupa grafit EAF dan *carbon black*. Pada penelitian ini, akan dilihat pengaruh penambahan *aluminium powder* (0.87-1.74%wt) sebagai aditif. Untuk mendapatkan pelat bipolar dengan konduktivitas listrik yang tinggi, akan dilakukan pengujian komposisi dari *epoxy resin*, grafit EAF, *carbon black* dan *aluminium powder* yang paling optimum.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini secara khusus, antara lain:

1. Mengetahui pengaruh penambahan *superfine aluminium powder* sebagai aditif terhadap karakteristik pelat bipolar yang dibuat.
2. Mendapatkan komposisi optimum dari grafit EAF, *carbon black*, dan *aluminium powder* yang akan digunakan sebagai pelat bipolar PEMFC.
3. Mengembangkan material komposit untuk pelat bipolar PEMFC yang memiliki nilai ekonomis yang tinggi dan karakteristik yang optimum dan dapat diproduksi secara massal.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

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

1. Total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit adalah 144 gram.
2. Polimer termoset (resin epoksi) yang digunakan sebesar 20% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit, dengan perbandingan resin epoksi:hardener, yaitu 1:1.
3. Grafit EAF dan *carbon black* yang digunakan sebesar 80% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit, dengan perbandingan komposisi grafit: (*carbon black* + *aluminium powder*), yaitu 95%:5%.
4. Pembuatan bakalan dengan metode mixing grafit EAF dan *carbon black* menggunakan *planetary ball mill* kemudian dilakukan *hot blending* pada temperatur 100°C selama \pm 15 menit dengan variasi *aluminium powder* (0.87%, 1.09%, 1.30%, 1.52%, dan 1.74%) yang dicampur dengan epoksi

resin dan kemudian dicampur dengan hardener dan dilanjutkan proses *compression moulding* dengan tekanan sebesar 55 MPa selama 4 jam sehingga menghasilkan pelat bipolar siap uji.

5. Pengujian terhadap sampel yang telah dibuat dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan, antara lain pengujian konduktivitas listrik (*four point probe testing* ASTM B193), porositas (ASTM C20), densitas (ASTM D792), dan fleksural (ASTM D790).

1.5 Sistematika Penulisan

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

BAB 1: PENDAHULUAN

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

BAB 2: TEORI PENUNJANG

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

BAB 3: METODOLOGI PENELITIAN

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

BAB 4: HASIL DAN PEMBAHASAN

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

BAB 5: KESIMPULAN

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

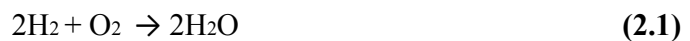
BAB 2

TEORI PENUNJANG

2.1 *Fuel Cell*

Salah satu energi alternatif potensial sebagai pengganti energi fosil adalah *fuel cell*. *Fuel cell* adalah perangkat konversi energi yang akan mengubah hidrogen dan oksigen menjadi energi listrik, dan secara bersamaan menghasilkan air (H₂O) dan panas dalam prosesnya. *Fuel Cell* tidak memerlukan sistem pengisian ulang, tidak seperti pada baterai, dimana energi akan terus dihasilkan selama bahan bakar diberikan^[4]. *Fuel cell* berpotensi secara signifikan sebagai strategi untuk perubahan global ke arah yang lebih baik yaitu dalam meningkatkan efisiensi bahan bakar serta menurunkan ketergantungan terhadap energi fosil. *Fuel cell* dengan bahan bakar utama hidrogen (H₂) menjanjikan untuk dijadikan solusi jangka panjang karena bersifat efisien, *sustainable*, ramah lingkungan serta mampu mereduksi gas buang penyebab pemanasan global. Rangkaian *fuel cell* juga tidak mempunyai bagian yang bergerak/ bergetar (bila dibandingkan sistem piston pada bahan bakar minyak) dan sama sekali tidak menimbulkan polusi. Sehingga pada kondisi yang ideal, sistem ini tahan uji^[8].

Fuel cell adalah seperangkat alat yang menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar untuk menghasilkan elektron, proton, panas, dan air^[10]. Secara sederhana, konversi energi yang terjadi pada perangkat *fuel cell* dapat digambarkan pada persamaan reaksi berikut^[10] :



Bahan bakar hidrogen dimasukkan dari anoda pada sistem *fuel cell* dan oksigen dari udara melewati sel dan menembus katoda. Pada satu unit *fuel cell*, selain elektroda terdapat elektrolit yang akan membawa muatan-muatan listrik dari satu elektroda ke elektroda lain, serta katalis yang akan mempercepat reaksi di elektroda. Katalis akan mengurai molekul hidrogen (H₂) menjadi proton (H⁺) dan elektron (e⁻) yang akan melewati jalan yang berbeda menuju katoda. Proton

akan melewati elektrolit dan elektron menghasilkan arus yang dapat digunakan sebelum mencapai katoda dan bersatu kembali dengan hidrogen dan oksigen untuk membentuk molekul air murni dan panas^[9].

Air dan panas yang dihasilkan setiap jenis *fuel cell* merupakan hasil sampingan berdasarkan reaksi kimia yang terjadi di katoda dan anoda, yaitu^[9]:



Pada sistem *fuel cell*, sumber gas oksigen berasal dari udara sedangkan sumber gas hidrogen berasal dari reaksi reformer hidrokarbon yang disimpan dalam suatu tangki atau tabung pada sistem tersebut. Hidrogen mempunyai hambatan besar, yaitu sulit untuk disimpan dan dipindahkan karena molekul H₂ yang kecil sehingga sulit untuk dicairkan dan mudah sekali terbakar. Gas hidrogen dapat diperoleh dari penguraian metanol menjadi gas CO dan hidrogen. Gas CO dioksidasi menjadi CO₂ dan air sedangkan gas hidrogen sebagai bahan bakar akan dialirkan ke anoda, sedangkan oksigen sebagai zat oksidan akan dialirkan ke katoda.

Kelebihan *fuel cell* dan juga keterbatasannya antara lain^[4] :

1. Mengurangi konsumsi energi fosil dan meningkatkan ketersediaan suplai energi suatu negara
2. Dapat meningkatkan ketersediaan energi listrik
3. Biaya operasi yang rendah: efisiensi dari sistem *fuel cell* akan mengurangi secara signifikan *energy bill* (dalam hal produksi massal *fuel cell*)
4. Daya produksi konstan: menghasilkan listrik dengan jumlah yang tetap
5. Bahan bakar yang digunakan tersedia dalam jumlah banyak : hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂)
6. Tidak bising pada saat operasi

Fuel cell diklasifikasi berdasarkan jenis elektrolit, tipe bahan bakar dan oksidan yang digunakan, serta temperatur/kondisi operasi. Jenis elektrolit yang

digunakan dapat berbentuk cairan atau padatan. Perbedaan antar jenis *fuel cell* tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

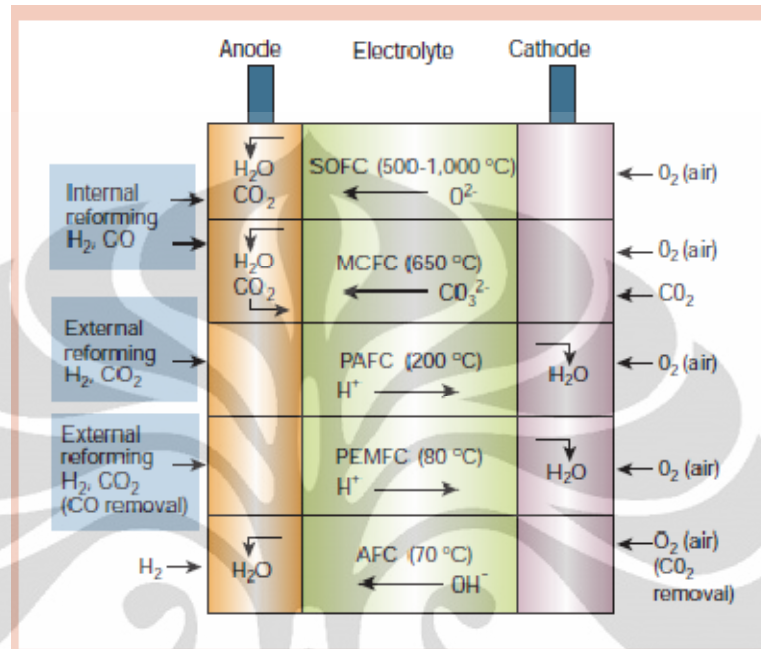
Tabel 2.1 Klasifikasi *Fuel cell*^[10]

Jenis	Temperatur Operasi	Elektrolit	Karakterisitk	Penggunaan
<i>Polymer Electrolyte Membrane (PEMFC)</i>	60-100°C	Polimer elektrolit H ⁺	Kerapatan energi tinggi, memiliki kepekaan terhadap CO (<100ppm)	Kendaraan (sedan, bis, minivan), stasiun pembangkit panas
<i>Alkaline Fuel Cell (AFC)</i>	60-120°C	KOH	Efisiensi tinggi, memilii kepekaan terhadap CO ₂	Pesawat ruang angkasa, kendaraan
<i>Direct Methanol (DMFC)</i>	60-120°C	Elektrolit polimer H ⁺	Efisiensi sistem tinggi, peka terhadap hasil oksidasi pada anoda	Kendaraan
<i>Phosporic Acid (PAFC)</i>	160-200°C	<i>Phospor Acid (H⁺)</i>	Efisiensi energi terbatas, peka terhadap CO (<1.5% Vol)	Stasiun pembangkit panas, kendaraan
<i>Molten Carbonate (MCFC)</i>	500-650 °C	<i>Molten Carbonate (CO₃²⁻)</i>	Problem korosi	Stasiun pembangkit energi panas, pembangkit energi listrik
<i>Solide Oxide (SOFC)</i>	800-1000 °C	Lapisan keramik (O ²⁻)	Efisiensi sistem tinggi	Pembangkit energi panas dan dengan turbin gas

Sumber : *Introduction to Fuel Cell Technology*

Dari tabel diatas, dapat dilihat bahwa keenam jenis *fuel cell* menggunakan sumber energi yang berbeda sehingga menghasilkan emisi yang berbeda pula.

Akibatnya, reaksi yang terjadi pada anoda dan katoda dari masing-masing sel tidak sama, sesuai dengan bahan bakar yang digunakan, seperti yang dijelaskan pada Gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1 Reaksi Anoda dan Katoda pada Berbagai Jenis *Fuel cell*^[8]

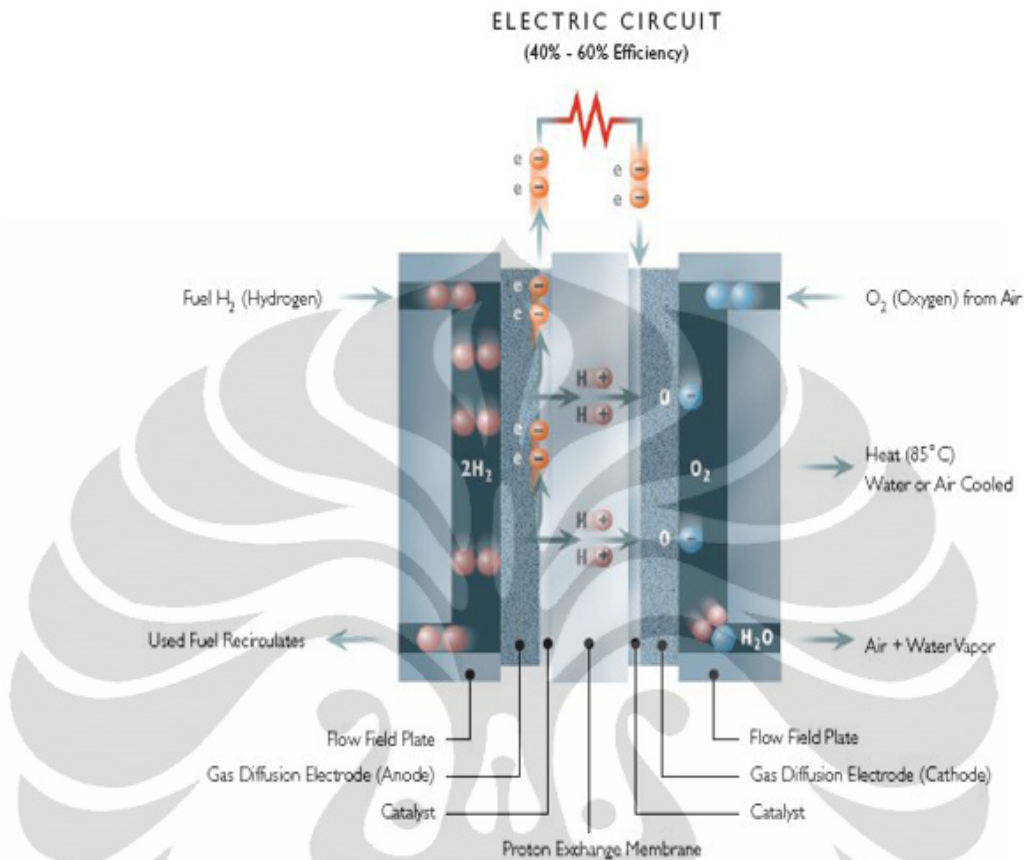
Sumber: *Materials for fuel-cell technologies*

2.2 *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)*

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang menggunakan membran pertukaran *solid state* untuk memisahkan elektrodanya. Membran ini pertama kali ditemukan oleh seorang ilmuwan yang bernama William Grubbs pada tahun 1959^[11]. Grubs menemukan bahwa tanpa adanya asam yang kuat pada membran ini maka membran tersebut akan mampu untuk memindahkan kation dan proton ke katoda^[11].

PEMFC memiliki banyak keunggulan, antara lain masalah korosi minimal meskipun dioperasikan pada pH 2-3, konduktor yang baik, waktu pakai yang panjang mencapai 11.000 jam, ramah lingkungan, tidak bising, temperatur aplikasi yang relatif rendah, suplai bahan bakar yang baik^[9].

Secara skematis PEMFC terlihat seperti pada Gambar 2.2 berikut:



Gambar 2.2 Prinsip kerja PEMFC^[12]

Sumber: *Modeling Optimizes Fuel Cells*

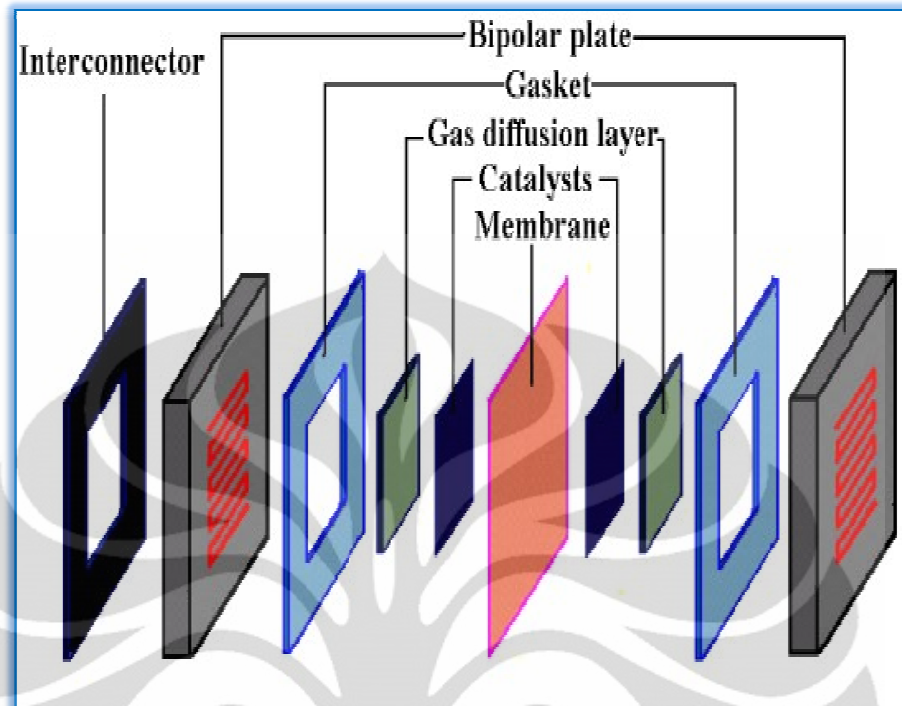
Hidrogen dan oksigen akan bereaksi menghasilkan energi listrik. Selain itu, pada saat yang bersamaan terbentuk air (H_2O) dan panas sebagai hasil sampingan. Gas hidrogen masuk ke dalam sisi anoda dari *fuel cell*, yang kemudian dialirkan melalui katalis dengan memberikan tekanan. Molekul H_2 akan terpecah menjadi dua proton H^+ dan dua elektron e^- setelah bersentuhan dengan logam platina yang berfungsi sebagai katalis^[13]. Dua proton H^+ tersebut bergerak menuju katoda dengan menembus membran tipis berpori yang dibantu oleh adanya medan listrik pada membran, sedangkan elektron yang terkonduksi di anoda akan keluar melalui *external load* karena terhalang oleh membran menuju sisi katoda dari *fuel cell* dan dipergunakan untuk menghasilkan energi listrik^[14]. Gas oksigen akan dialirkan melalui katalis dan menarik dua proton H^+ melalui membran sehingga akan bereaksi menghasilkan molekul air (H_2O).

Secara umum, keunggulan yang dimiliki oleh *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) yaitu tingkat efisiensi energi yang tinggi, densitas energi yang tinggi, dapat digunakan pada temperatur pengoperasian yang rendah, suplai bahan bakar yang tepat serta dapat digunakan untuk jangka waktu pemakaian yang cukup lama^[7]. Keunggulan yang dimiliki oleh PEMFC secara terperinci adalah sebagai berikut:

1. PEMFC mempunyai elektrolit padat yang memberikan ketahanan yang sangat baik terhadap gas
2. Temperatur operasi PEMFC yang rendah memungkinkan waktu *start up* yang cepat
3. PEMFC tidak memiliki konstituen sel yang bersifat korosif
4. PEMFC cocok digunakan terutama untuk situasi dimana hidrogen murni dapat digunakan sebagai bahan bakar
5. *Stack* PEMFC mudah untuk disusun sehingga mudah untuk digunakan dalam berbagai aplikasi
6. Kapasitas daya listrik yang dihasilkan oleh PEMFC cukup bervariasi mulai dari 0,1 watt – 100 kW
7. PEMFC dapat beroperasi pada densitas arus yang sangat tinggi dibandingkan dengan jenis *fuel cell* yang lainnya

Disamping kelebihan yang dimiliki PEMFC, terdapat pula keterbatasan yaitu rentang temperatur kerja yang sempit membuat pengaturan panas menjadi sulit, khususnya pada rapat arus yang tinggi. Selain itu, PEMFC sangat sensitif terhadap unsur CO, sulfur, dan amonia. Permasalahan ini dapat dihindari dengan mengurangi rapat arus yang digunakan dan meningkatkan katalis elektroda^[5]. PEMFC juga mengalami keterbatasan terhadap bahan bakar yang digunakan, yaitu hidrogen, mengingat kadar H₂ di udara cukup rendah dan biaya pembuatannya masih mahal^[10].

2.2.1 Struktur PEMFC



Gambar 2.3 Skema struktur komponen PEMFC^[16]

Sumber: <http://www.energi.kemi.dtu.dk/English/Projects/fuelcells.aspx>

Komponen penyusun PEMFC terdiri dari membran solid polimer sebagai elektrolit dan elektoda (anoda dan katoda) karbon yang mengandung katalis perak, pelat bipolar, pelat penutup (*end plate*) dan pengumpul arus. Setiap komponen yang tersusun didalam PEMFC memiliki fungsi masing-masing dan saling mendukung satu sama lain untuk menghasilkan energi listrik di dalam *fuel cell*^[9].

Fungsi masing-masing komponen penyusun PEMFC dapat dilihat pada Tabel 2.2 sebagai berikut.

Tabel 2.2 Komponen Utama dalam PEMFC^[9]

Komponen	Material	Fungsi
Membrane Electrolyte Assembly (MEA)	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Solid polymer electrolyte</i> terimpregnasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda 2. <i>Porous carbon paper</i> atau <i>cloth</i> untuk digunakan sebagai <i>gas diffusion layer</i> (GDL) 	<p>Terdiri dari 2 elektroda, 1 <i>membrane electrolyte</i>, dan 2 <i>gas diffusion layer</i>. <i>Membrane</i> (dengan sebuah <i>gas barrier</i>) memisahkan reaksi $\frac{1}{2}$ sel dan mengijinkan proton mengalir dari anode ke katode.</p> <p>Lapisan katalis yang menyebar pada elektroda meningkatkan setiap reaksi $\frac{1}{2}$. GDL juga mendistribusikan gas ke katalis pada <i>membrane</i>, mengirimkan elektron dari area aktif ke pelat bipolar, dan membantu dalam pengelolaan air.</p>
Pelat Bipolar	Grafit, <i>stainless steel</i> , atau material <i>thermoplastic</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mendistribusikan gas melewati area aktif dari <i>membrane</i> 2. Mengirimkan elektron dari anoda pada 1 pasang elektroda menuju ke katoda pada pasangan elektroda selanjutnya 3. Membawa air dari setiap sel
End Plate	Material dengan kekuatan mekanik yang baik (baja ataupun paduan aluminium).	Memungkinkan penyusunan terintegrasi di dalam tumpukan PEMFC.
Pengumpul Arus	Logam dengan kontak elektrik & konduktivitas yang baik (Cu).	Mengumpulkan dan memindahkan arus dari tumpukan PEMFC ke sirkuit eksternal.

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

2.2.2 Pelat Bipolar

Pelat bipolar atau disebut juga *flow field plate* merupakan komponen utama dalam sistem operasi PEMFC yang berfungsi untuk mengumpulkan dan mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda. Sebagai komponen utama dalam PEMFC, pelat bipolar berkontribusi terhadap 80% dari volume PEMFC, 70% dari

berat PEMFC serta 60% dari biaya fabrikasi PEMFC^[9]. Hal ini berarti bahwa reduksi ukuran, berat dan biaya fabrikasi pelat bipolar PEMFC dapat difokuskan pada pemilihan material serta metode fabrikasi yang tepat. Pelat bipolar harus dibuat tipis, ringan, ekonomis, dan mudah dibentuk guna mengoptimalkan fungsinya^[17].

Pelat bipolar berfungsi dalam mengumpulkan arus dari masing-masing *Membran Electrolite Assembly* (MEA) yang terletak di antara pelat anoda dan pelat katoda. 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*. Pelat bipolar biasanya dibuat dari bahan grafit, logam seperti aluminium, baja tahan karat (*stainless steel*), paduan titanium paduan nikel, atau dapat juga dibuat dari material komposit seperti terlihat pada Gambar 2.4 dibawah ini.



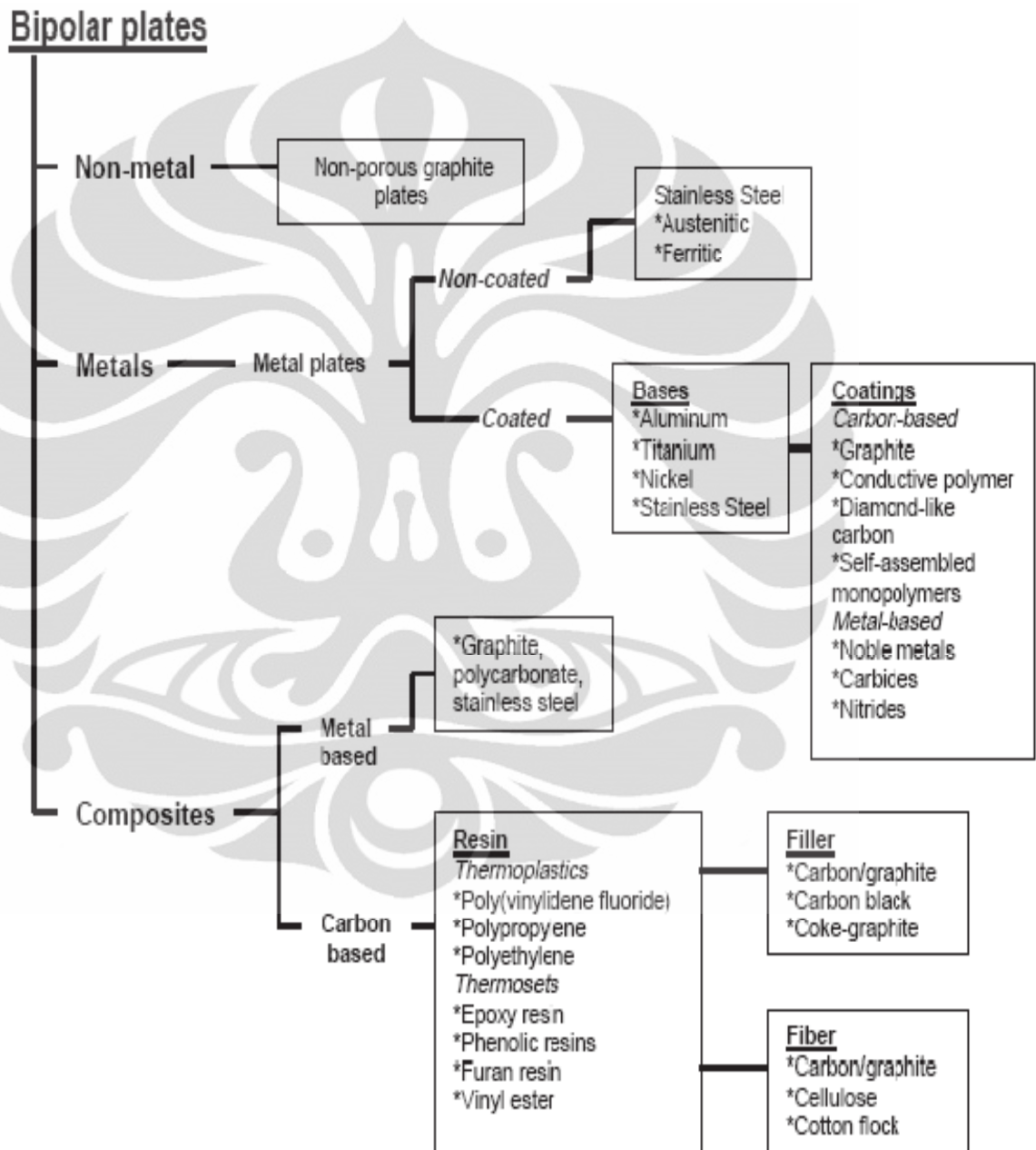
Gambar 2.4 Pelat Bipolar^[18]

Material dasar penyusun pelat bipolar memiliki sifat tertentu yang membedakan proses fabrikasi, biaya produksi, serta aplikasi dari pelat bipolar tersebut. Fungsi utama pelat bipolar dalam *fuel cell* adalah sebagai berikut^[9]:

1. Mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda dan katoda
2. Mengalirkan elektron ke seluruh sirkuit *fuel cell*
3. Menyatukan rangkaian *fuel cell* yang dilengkapi voltase (rangkaian *fuel cell* tergantung pada bentuk pelat bipolar)
4. Memisahkan oksigen dan bahan bakar gas lainnya
5. Mengalirkan dan mendistribusikan gas ke elektroda secara merata
6. Membuang air hasil reaksi

7. Berperan sebagai konduktor panas dan memindahkan panas dari elektroda ke saluran pendingin
8. Berperan sebagai penguat mekanik sekaligus penahan membran tipis dan elektroda dan sebagai penjepit rangkaian *fuel cell*.

Jenis-jenis material penyusun pelat bipolar terlihat pada Gambar 2.5 berikut ini.



Gambar 2.5 Klasifikasi Pelat Bipolar Berdasarkan Material Penyusunnya^[19]

Sumber: *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (2005) 1297–1302

Untuk dapat diaplikasikan sebagai pelat bipolar, spesifikasi yang harus dipenuhi mengacu pada standardisasi *Department of Energy* (DOE), USA, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 Target Teknis *Department of Energy* (DOE), USA untuk Karakteristik Pelat Bipolar^[20]

Characteristic	Units	Status 2005	2010 target	2015 target
<i>Cost</i>	\$/kW	10	5	3
<i>Weight</i>	kg/kW	0.36	< 0.4	< 0.4
<i>H₂ permeation</i>	cm ³ sec ⁻¹ cm ⁻²	< 2.6 x 10 ⁻⁶	< 2.6 x 10 ⁻⁶	< 2.6 x 10 ⁻⁶
<i>Corossion</i>	μA/cm ²	< 1 ^d	< 1 ^d	< 1 ^d
<i>Electrical Conductivity</i>	S/cm	> 600	> 100	> 100
<i>Resistivity</i>	Ohm cm ²	< 0.02	0.01	0.01
<i>Flexural</i>	Mpa	> 34	> 25	> 25
<i>Flexibility</i>	% deflection at mid-span	1.5 to 3.5	3 to 5	3 to 5

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

a) Pelat Bipolar Berbasis Grafit

Pelat bipolar yang telah banyak digunakan dan dikembangkan pada sistem PEMFC adalah pelat berbasis grafit, yang memberikan beberapa keuntungan dalam hal ketahanan terhadap korosi, menghasilkan konduktivitas panas dan listrik yang baik, dan memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan pelat logam. Namun, sifat mekanik yang dihasilkan buruk, karena pelat ini sangat getas dan berpori. Akibatnya, pelat ini membutuhkan suatu proses permesinan yang kompleks dan mengkonsumsi waktu yang lebih lama sehingga menyebabkan peningkatan biaya produksi^[8].

Selain itu, karena sifatnya yang getas, pelat bipolar harus lebih tebal untuk menghasilkan kekuatan mekanis yang cukup baik ketika dilakukan proses pengerjaan pelat dan perakitan *fuel cell*. Oleh karena itu, berat dan volum dari pelat bipolar berbasis grafit menjadi lebih besar dan menyebabkan susunan sel yang dihasilkan menjadi lebih berat. Hal ini akan meningkatkan biaya produksi

dari pelat (sekitar > US\$10/pelat) sehingga menjadi pertimbangan dalam penggunaannya pada transportasi^[9].

b) Pelat Bipolar Berbasis Logam

Penggunaan material logam pada pelat bipolar PEMFC memberikan banyak keuntungan pada aplikasi transportasi, diantaranya biaya produksi yang rendah, dan memiliki sifat konduksi termal dan mekanis yang baik^[13]. Akan tetapi, pelat bipolar logam akan mudah mengalami korosi atau pelarutan dari unsur lain pada penggunaan di lingkungan yang memiliki pH sekitar 2-3 dan temperatur operasi sekitar 80°C. Ion logam yang terlarut akan mengganggu membran sehingga konduktivitas yang dihasilkan menjadi rendah^[19]. Selain itu, lapisan oksida (produk korosi) yang terbentuk di permukaan pelat akan meningkatkan resistivitas listrik dan menurunkan energi listrik yang dihasilkan. Untuk mengatasi hal ini, maka digunakan dua jenis material logam, yaitu :

i. Tanpa pelapis (*non-coated*)

Material logam yang termasuk dalam jenis ini adalah *stainless steel* (SS). Material SS memiliki kekuatan yang relatif tinggi, stabil terhadap lingkungan kimia, permeabilitas gas rendah, dapat diproduksi secara massal dan biaya produksi yang rendah. Diantara kelebihan tersebut, *stainless steel* memiliki ketahanan korosi yang jauh lebih baik dari material logam lainnya (tanpa pelapisan). Biasanya, *stainless steel* yang digunakan adalah tipe *austenitic* (AISI 349) dan *ferritik* (AISI 446), yang memiliki kandungan Cr yang tinggi sehingga dapat meminimalkan terjadinya fenomena korosi^[19].

ii. Dengan pelapis (*coated*)

Material yang biasa digunakan dalam aplikasi ini adalah aluminium, titanium dan nikel. Untuk meningkatkan ketahanan korosi dari material logam tersebut, maka perlu dilakukan suatu perlakuan khusus, yaitu dengan membentuk suatu lapisan pada permukaan pelat, dengan menggunakan material yang tahan korosi dan konduktif (seperti kisi titanium nitrida)^[9]. Dalam proses ini, koefisien dari ekspansi termal yang terbentuk antara logam dasar dan lapisan harus sama sehingga mengurangi pembentukan pori – pori kecil yang dapat menyebabkan korosi. Biasanya jenis pelapisan yang digunakan ada dua, yaitu dengan menggunakan karbon dan logam. Pelapisan dengan karbon, meliputi grafit,

polimer konduktif dan intan. Sedangkan logam, meliputi logam mulia, logam nitrida dan logam karbida^[19].

c) Pelat Bipolar Berbasis Komposit

Pelat bipolar berbasis komposit dikelompokkan menjadi dua, yaitu *metal base composite* dan *carbon base composite*. Pada *carbon base composite* biasanya menggunakan polimer *thermoplastic*, seperti *polypropylene* dan *polyethylene*, maupun polimer termoset, seperti resin epoksi, resin *phenolic*, dan *vinil ester*. Selain itu, pada *carbon composite bipolar plate* biasa ditambahkan bahan pengisi (*filler*) maupun serat (*fiber*) bertujuan untuk meningkatkan sifat dari pelat bipolar^[9].

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

1. Memiliki stabilitas kekuatan yang cukup baik untuk menahan beban kompresi
2. Memiliki berat dan volum yang rendah
3. Memiliki nilai konduktivitas termal dan listrik yang tinggi
4. Permeabilitas gas yang rendah untuk hidrogen
5. Memiliki ketahanan kimia dan korosi yang baik
6. Harga material dan proses yang relatif kecil

Material komposit berbasis karbon dengan matriks berupa polimer lebih sesuai untuk mencapai sifat yang diinginkan dari suatu pelat bipolar^[21]. Pengembangan material komposit berbasis karbon untuk digunakan dalam pembuatan pelat bipolar sedang mengalami peningkatan karena material ini memiliki berat yang lebih ringan dibandingkan material lain, seperti *stainless steel*, aluminium, maupun grafit, harga yang relatif lebih murah, dan tahan terhadap korosi. Polimer yang digunakan sebagai matriks dapat berasal dari

golongan *thermoplastic* atau termoset yang kemudian dapat dicampur dengan bahan pengisi konduktif, seperti *carbon black*, serat karbon, grafit, atau logam paduan dengan titik lebur rendah^[4]. Setiap material memiliki keuntungan dan kerugian masing-masing seperti terlihat pada Tabel 2.4

Tabel 2.4 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Beberapa Material sebagai Pelat Bipolar^[19]

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

Sumber : *Bipolar Plate for PEM Fuel Cells – From Materials to Processing*

Perbandingan nilai konduktivitas dari material pelat bipolar dapat dilihat pada Tabel 2.5

Tabel 2.5 Perbandingan Nilai Konduktivitas dari Material Pelat Bipolar^[22]

Material	Konduktivitas (S/cm)
Polimer	1
Grafit	10^3
Komposit polimer / grafit	10

Sumber: *Fuel Cells Fundamentals The Materials Science of Renewable Energy*

2.3 Material Komposit

Material komposit didefinisikan sebagai suatu material rekayasa yang tersusun atas kombinasi antara dua jenis material konstituen atau lebih di mana kombinasi ini terjadi dalam skala makroskopis^[23]. Secara umum kombinasi antara dua jenis material atau lebih dapat terjadi pada skala makroskopis ataupun pada skala mikroskopis. Apabila kombinasi antara dua jenis material atau lebih terjadi pada skala mikroskopis maka kombinasi ini dinamakan paduan (*alloy*). Sementara apabila kombinasi tersebut terjadi pada skala makroskopis maka dinamakan komposit^[23]. 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*). Antara matriks dan penguat harus memiliki ikatan yang baik untuk mendapatkan sifat yang diinginkan. Selain itu, pada matriks harus terbentuk fasa terdispersi untuk meningkatkan kekuatan dan sifat-sifat lainnya. Fungsi dari matriks yang digunakan adalah sebagai berikut^[23]:

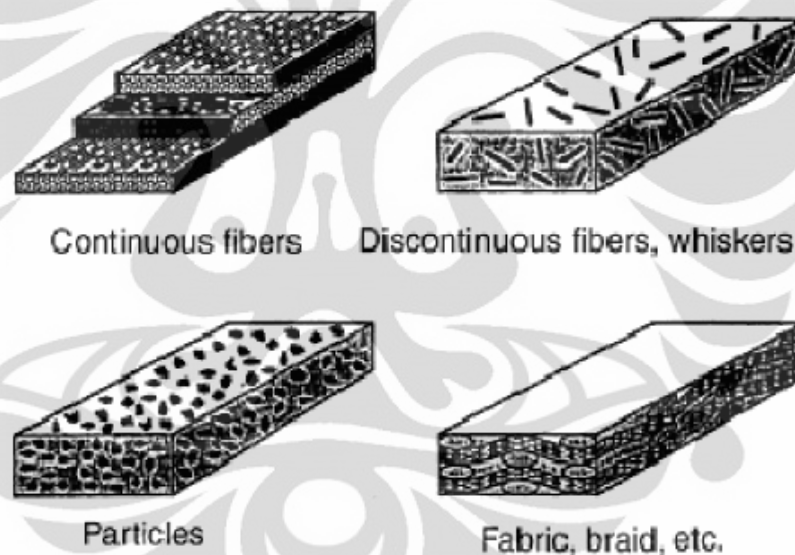
- a. Mengikat komponen didalam material komposit dan menentukan stabilitas terhadap temperatur operasi pada komposit
- b. Melindungi penguat dari keausan dan kontak dengan lingkungan
- c. Sebagai media transfer tegangan untuk membantu mendistribusikan tegangan
- d. Menyediakan ketangguhan dan kekuatan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

- e. Mengatur orientasi dari penguat dan jarak pada struktur komposit

Penguat (*reinforcement*) pada umumnya ditambahkan dalam jumlah kecil namun dapat meningkatkan sifat dari material komposit secara signifikan. Secara umum fungsi penguat (*reinforcement*) dalam material komposit adalah sebagai berikut^[23]:

- a) Sebagai penguat (*reinforcement*) dalam komposit
- b) Sebagai media penanggung beban
- c) Meningkatkan kekuatan material komposit
- d) Meningkatkan ketangguhan material komposit

Pada Gambar 2.6 dapat dilihat berbagai jenis penguat yang terdispersi pada suatu matriks.



Gambar 2.6 Jenis Penguat yang Terdistribusi pada Matriks Komposit^[23]

Sifat dari sebuah material komposit dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor yang mempengaruhinya antara lain:

1. Material penyusun

Jenis material yang digunakan sebagai matriks dan penguat pada komposit, berpengaruh terhadap sifat akhir dari material komposit yang dihasilkan.

2. Jumlah material yang digunakan

Komposisi antara matriks dan penguat, sebaiknya seimbang karena jika jumlah material penguat lebih banyak dari matriks, maka sifat yang dihasilkan tidak mencapai nilai optimum. Pengaruh jumlah material terhadap

sifat komposit, seperti modulus elastisitas dan densitas, dapat diprediksi dengan menggunakan *rule of mixture*.

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.5)$$

$$\rho = \frac{m_c}{v_c} = \frac{m_f + m_m}{V_f + V_m + V_v} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{\rho_f V_f + \rho_m V_m} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{1} \quad (2.6)$$

Dimana :

E_c = modulus elastisitas komposit [Pa]

E_f = modulus elastisitas penguat [Pa]

E_m = modulus elastisitas matriks [Pa]

V_c = fraksi volum komposit

V_f = fraksi volum penguat

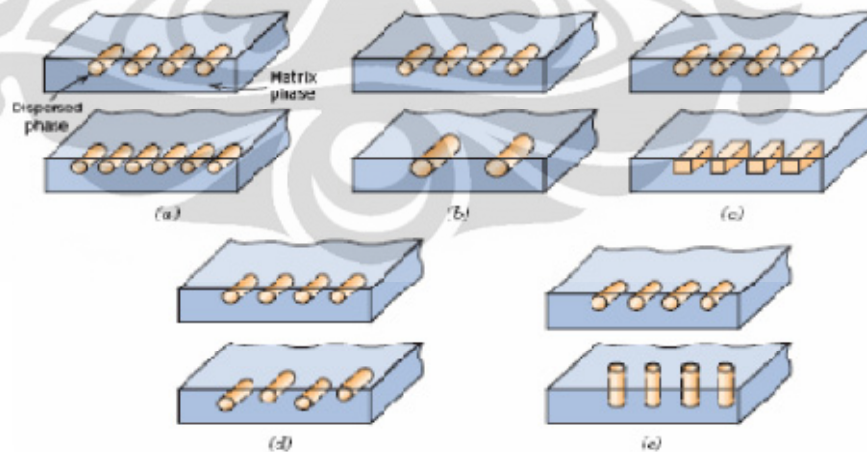
V_m = fraksi volum matriks

ρ_c = densitas komposit [g/cm^3]

ρ_f = densitas penguat [g/cm^3]

ρ_m = densitas matriks [g/cm^3]

3. Bentuk Fasa Yang Terdispersi



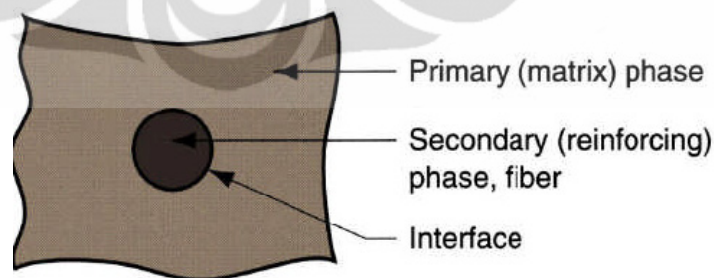
Gambar 2.7 Parameter dari Bahan Pengisi pada Komposit :

(a) Konsentrasi; (b) Ukuran; (c) Bentuk; (d) Distribusi; (e) Orientasi ^[24]

Fasa yang terdispersi (terlihat pada Gambar 2.7) dalam matriks juga mempengaruhi sifat komposit, baik dari distribusi, konsentrasi, orientasi, ukuran maupun bentuk dari fasa.

- a. Fasa yang terdistribusi secara acak akan memiliki sifat yang lebih baik.
 - b. Semakin banyak fasa yang terdispersi dalam matriks, maka akan menghasilkan sifat mekanis yang lebih baik.
 - c. Pada sistem komposit, penguat dengan orientasi yang searah dengan pembebanan akan mampu memberikan sifat mekanis yang lebih baik terhadap pembebanan tersebut.
 - d. Fasa yang memiliki bentuk silinder lebih baik karena tidak mempunyai tegangan sisa sehingga lebih tahan terhadap pembebanan.
 - e. Ukuran fasa yang kecil lebih baik karena mampu menahan dan mentransfer beban.
4. Ikatan antarmuka dan antarfasa

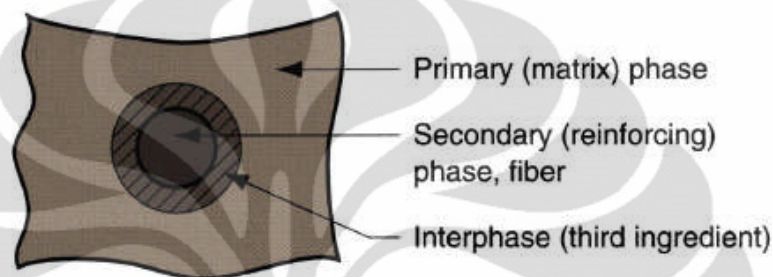
Ikatan antara penguat dan matriks memiliki peranan yang besar dalam penentuan sifat komposit. Hal ini berkaitan erat dengan fenomena antarmuka dan interfasa. Ikatan antarmuka adalah ikatan yang terbentuk antara dua fasa yang berbeda. Ikatan antarmuka berfungsi sebagai media transfer beban dari matriks dan penguat. Semakin luas bidang sentuh antara permukaan, semakin besar efek yang dihasilkan dari ikatan tersebut sehingga dapat meningkatkan sifat ikatan dari material komposit yang diinginkan. Ikatan antarmuka ini mempengaruhi kekuatan, kekakuan, ketahanan mulur, dan degradasi akibat lingkungan pada material komposit. Ikatan antarmuka dapat dilihat pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Ikatan Antarmuka^[23]
Sumber : *Composites-ASM Handbook*

Interfasa adalah sebuah fenomena dimana terbentuk sebuah lapisan fasa ketiga dalam suatu ikatan antarmuka. Interfasa dapat terbentuk apabila ikatan

antarmuka dari konstituen penyusun sangat baik dan mampu berdifusi sehingga akan menciptakan daerah baru, yang biasa disebut fasa ketiga. Untuk mendapatkan ikatan interfasa dari dua material yang berbeda, maka dapat dilakukan dengan menambahkan suatu aditif. Fasa ketiga yang terbentuk akan memiliki sifat gabungan dari kedua fasa pembentuknya sehingga sangat berpengaruh terhadap sifat komposit yang terbentuk. Ikatan interfasa dapat dilihat pada Gambar 2.9



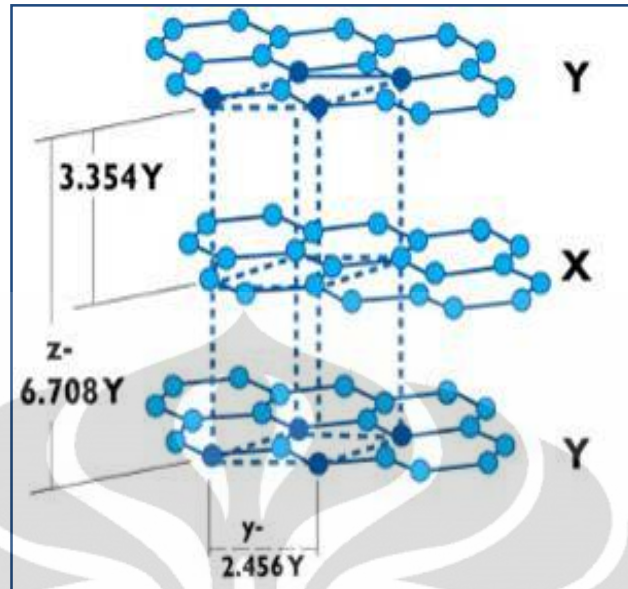
Gambar 2.9 Ikatan Interfasa^[23]
 Sumber : *Composites-ASM Handbook*

2.4 Material Penyusun Pelat Bipolar

Material penyusun utama yang digunakan adalah grafit EAF dan *carbon black* sebagai *filler*, resin epoksi sebagai matriks, dan *superfine aluminium power* sebagai aditif.

2.4.1 Grafit EAF

Grafit, sebagaimana berlian, adalah bentuk alotropi karbon, karena kedua senyawa ini mirip namun karakteristik struktur atomnya dapat mempengaruhi sifat kimiawi dan fisiknya. Atom-atom karbon pada grafit tersusun secara heksagonal yang membentuk kisi planar dengan ikatan antar lapisan yang lemah, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.10



Gambar 2.10 Struktur Kristal Grafit^[25]

Grafit terdiri atas lapisan atom karbon dan berwarna kelabu. Akibat delokalisasi elektron antarpermukannya, grafit dapat berfungsi sebagai konduktor listrik. Grafit dinamai oleh Abraham Gottlob Werner pada tahun 1789 dengan mengambil kata dari bahasa Yunani^[25].

Grafit digolongkan menjadi dua jenis, yaitu grafit alami dan grafit sintetis. Grafit sintetis lebih murni dibandingkan grafit alami. Grafit sintetis merupakan produk yang dibuat dari material karbon amorf melalui proses perlakuan khusus pada kondisi temperatur tinggi. Grafit digunakan sebagai material komposit karena memiliki konduktivitas listrik dan panas yang baik, serta memiliki sifat-sifat pelumasan (lubrikasi) yang baik. Karena strukturnya yang berlapis, grafit memberi sifat kekakuan dan dimensi yang stabil terhadap polimer^[11].

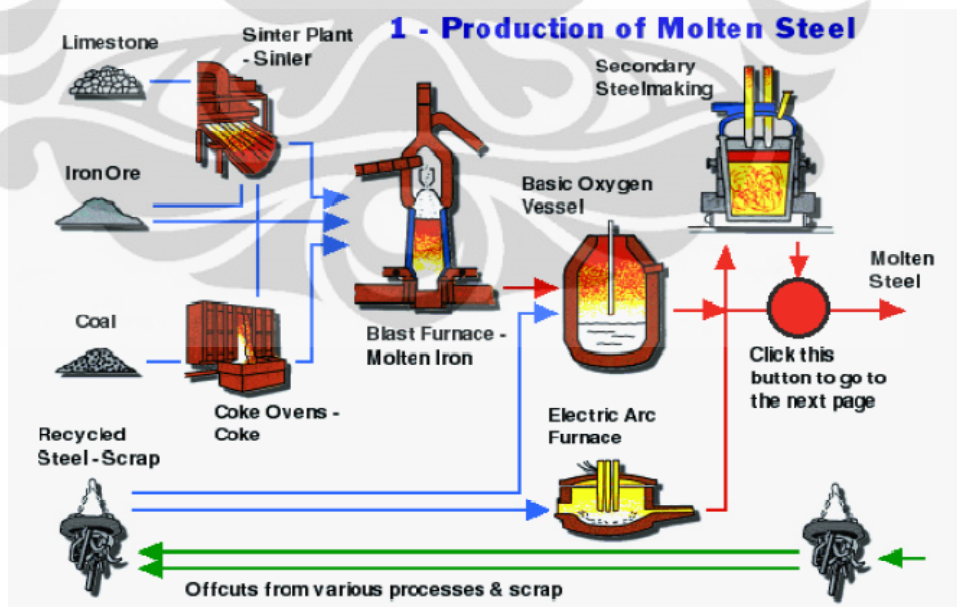
Kisi yang terbentuk biasanya memiliki kekakuan yang tinggi, tetapi mudah mengalami pergeseran antar lapisan. Struktur yang seperti ini, grafit akan menghasilkan sifat yang unik sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi, baik sebagai material utama maupun material *filler*. Adapun sifat kimia dan fisika dari grafit adalah^[26]:

1. Memiliki konduktivitas panas dan listrik yang sangat baik
2. Memiliki sifat lubrikasi yang baik pada tekanan dan temperatur yang tinggi
3. Ketahanan oksidasi dan daya tahan terhadap unsur kimia tinggi

4. Kemampuan untuk mengikat molekul kimia diantara lapisan grafit
5. Ramah terhadap lingkungan

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

Untuk aplikasi peleburan besi dan baja, khususnya dengan menggunakan tungku busur listrik, dibutuhkan suatu elektroda yang berfungsi untuk menghantarkan arus yang besar sehingga dapat melebur besi spons (*sponge iron*) dan besi tua (*scrap*) sebagai bahan baku utama pembuatan besi dan baja. Tujuan tersebut dapat tercapai dengan menggunakan material yang memiliki konduktivitas tinggi sehingga dapat menghasilkan busur listrik. Oleh karena itu, grafit dipilih sebagai material utama untuk aplikasi elektroda. Grafit yang digunakan adalah grafit sintesis yang diperoleh dengan memanaskan karbon pada temperatur tinggi seperti Gambar 2.11

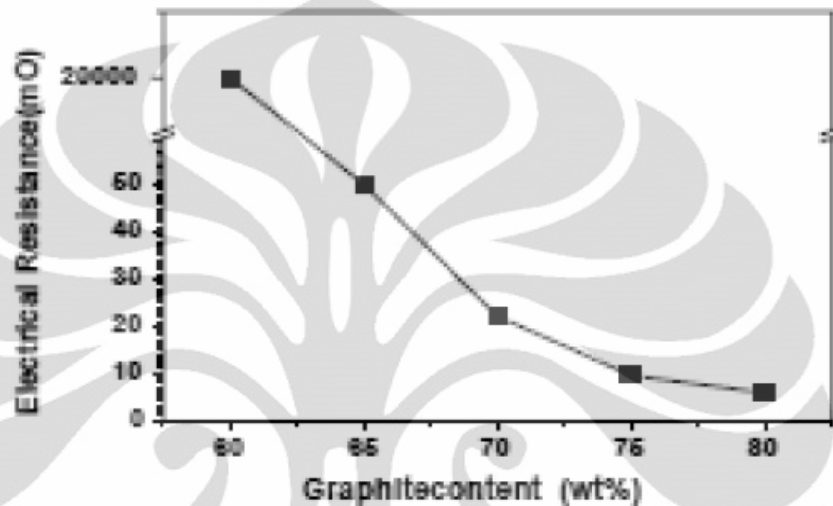


Grafit
EAF

Gambar 2.11 Tungku Busur Listrik^[27]
Sumber: <http://www.materials.qmul.ac.uk/indvisit/2003/>

Pada penelitian ini, grafit limbah proses peleburan, digunakan sebagai material penguat pada sistem komposit dikarenakan harganya yang murah

dibandingkan grafit sintesis dan dapat berpotensi mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah elektroda^[21]. Grafit berfungsi sebagai penguat konduktif yang dapat mengurangi resistansi listrik pada pelat bipolar komposit. Selain itu, grafit dapat meningkatkan koefisien friksi, serta meningkatkan konduktivitas termal. Gambar 2.12 menunjukkan pengaruh penambahan grafit terhadap resistansi listrik dari pelat bipolar.



Gambar 2.12 Pengaruh Penambahan Grafit terhadap Resistansi dan Konduktivitas Listrik^[28]

Sumber: *Journal of Power Sources* 134 (2004) 7–17

Ukuran, arah, dan bentuk dari partikel grafit yang digunakan akan mempengaruhi sifat dari komposit yang dihasilkan, terutama konduktivitas listrik. Grafit yang memiliki arah orientasi partikel yang tegak lurus terhadap arah penekanan pada saat pencetakan akan memiliki nilai konduktivitas yang lebih baik dibandingkan dengan arah orientasi yang sejajar dengan arah penekanan. Selain itu, kekuatan fleksural dari grafit yang berbentuk partikel (*spherical*) lebih baik dibandingkan grafit berbentuk serpih (*flake*), karena tegangan yang diterima oleh grafit akan tersebar merata di seluruh permukaannya, sehingga regangan yang terjadi akan semakin kecil^[29].

Pada Tabel 2.6 terlihat bahwa semakin kecil ukuran dari partikel, akan menurunkan nilai konduktivitasnya, namun secara tidak langsung akan meningkatkan kekuatan fleksuralnya.

Tabel 2.6 Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel Grafit^[29]

Sample	Particle Size	Direction	Bulk Electrical Conductivity (S/cm)	Thermometric Conductivity [W/(m.°C)]	Flexural Strength (MPa)
Spherical Graphite	44-63 μm	//	84	18.9	39.5
		\perp	387.3	71.9	
	$\leq 44 \mu\text{m}$	//	60	12.5	44
		\perp	326.9	61.4	
Flake-like Graphite	44-63 μm	//	76	20.3	35
		\perp	566.5	113	
	$\leq 44 \mu\text{m}$	//	45.8	13	39.8
		\perp	420.3	105.5	

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

2.4.2 Carbon Black

Carbon black merupakan padatan karbon amorf yang dibentuk dengan proses deposisi dari partikel padat dalam fasa gas. Proses deposisi tersebut terjadi karena pembakaran tidak sempurna dari hidrokarbon cair^[30]. 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^[30].

Struktur yang terbentuk memiliki pori dengan volum tertentu, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13



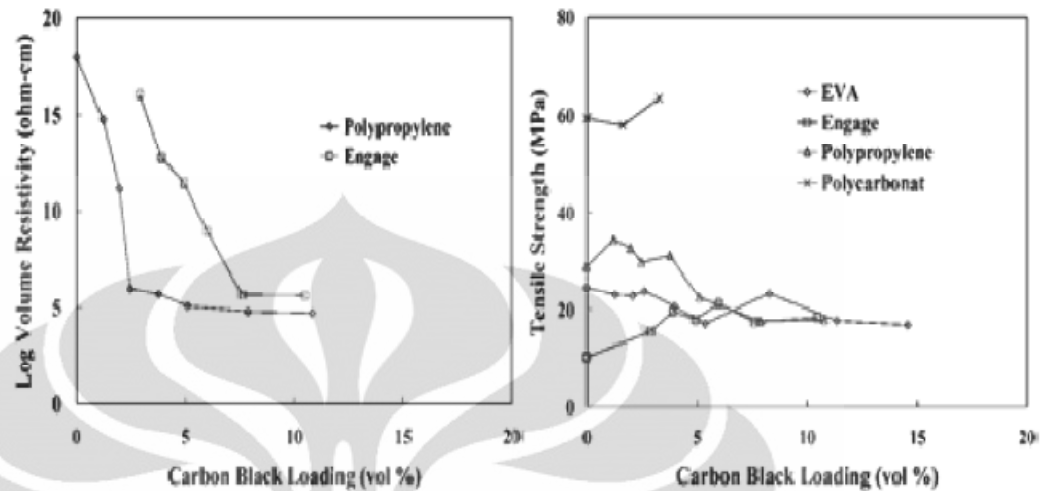
Gambar 2.13 Struktur *Carbon Black* ^[30]

Pada sistem komposit, dispersi *carbon black* akan membentuk jaringan antar karbon dalam polimer. Jaringan ini berfungsi sebagai sirkuit elektrik sehingga dengan mudah dapat mengalirkan arus listrik. Oleh karena itu, adanya penambahan *carbon black* pada material komposit yang akan dibuat akan meningkatkan sifat konduktivitas listrik dari pelat bipolar. Jaringan tersebut juga mampu meningkatkan kemampuan proses komposit dan sifat mekanisnya. Namun perlu diketahui ketika komposisi *carbon black* terlalu besar pada suatu matriks maka akan terbentuk pengelompokan atau aglomerasi *carbon black* dan jaringan tidak terbentuk dengan baik^[31].

Umumnya, sifat *carbon black* berhubungan dengan proses pelarutan yang bergantung pada ukuran dan struktur partikel^[32]. Ukuran dari partikel dan luas permukaan akan menentukan sifat yang dihasilkan dari *carbon black*. Ukuran partikel yang kecil akan memiliki luas permukaan yang tinggi sehingga akan lebih mudah untuk dibasahi dan dapat dengan mudah larut ketika dicampur dengan material lain daripada *carbon black* yang memiliki ukuran yang besar dengan luas permukaan yang kecil. Struktur *carbon black* yang besar akan lebih mudah larut daripada struktur *carbon black* yang kecil karena memiliki bidang terpadat yang rendah sehingga ketika *carbon black* dicampurkan dengan polimer resin, maka resin akan mengisi bidang kosong dari karbon dan membentuk ikatan kimia yang baik.

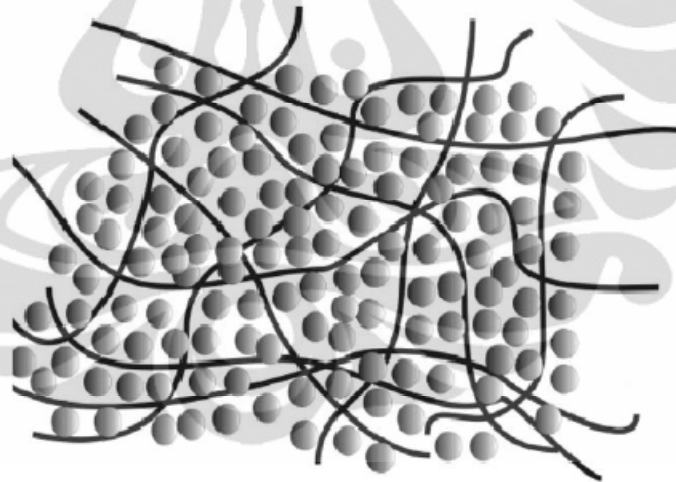
Penambahan *carbon black* yang terlalu banyak akan menurunkan sifat mekanis dari pelat bipolar (terlihat pada Gambar 2.14) karena *carbon black*

memiliki struktur yang berpori sehingga beban yang diterima oleh pelat menjadi berkurang dan porositas yang dihasilkan juga akan meningkat.



Gambar 2.14 Pengaruh Penambahan *Carbon Black*^[33]

Skematik komposit yang mengandung bahan pengisi konduktif dalam jumlah besar dapat dilihat pada Gambar 2.15



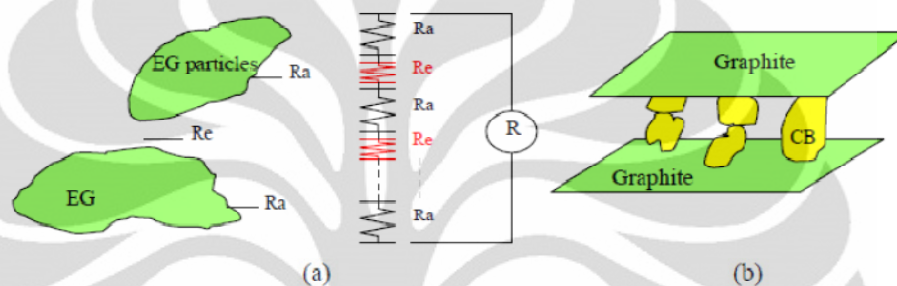
Gambar 2.15 Skematik Komposit yang Mengandung Bahan Pengisi Konduktif dalam Jumlah Besar (• = Bahan Pengisi Konduktif dan □ = Adhesive)^[34]

Sumber: *The effect of particle size gradation of conductive fillers on the conductivity and the flexural strength of composite bipolar plate*

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.

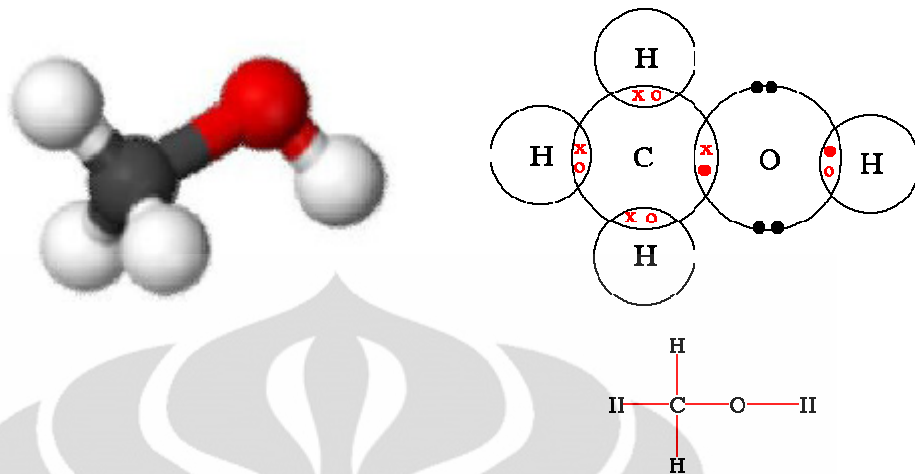
Resistansi total pada pelat bipolar komposit berasal dari resistansi jarak antar agregat (*inter-aggregate space*), R_e , seperti diilustrasikan Gambar 2.16^[13]. Oleh karena itu, partikel *carbon black* akan menjadi penghubung tambahan antar lapisan grafit yang akan mengakibatkan nilai resistansi R_e menurun^[13].



Gambar 2.16 Ilustrasi Skematik dari (a) Berbagai Hambatan Tersusun secara Seri, (b) Partikel *Carbon Black* Ditempatkan di antara Lapisan Grafit untuk Mengurangi Nilai Hambatan R_e ^[13]

2.4.3 Metanol

Metanol merupakan pelarut organik polar berfungsi sebagai pelarut dan pengencer untuk resin epoksi serta *hardener* bertujuan agar epoksi dapat bercampur baik dengan grafit. Dengan adanya metanol, daya pembasahan epoksi terhadap grafit meningkat dan dapat membasahi seluruh permukaan grafit sehingga ikatan yang terbentuk antara epoksi, grafit, dan *carbon black* menjadi lebih kuat. Struktur dari metanol dapat dilihat pada Gambar 2.17



Gambar 2.17 Struktur Metanol^[35]

Adapun sifat umum dari metanol dapat dilihat pada Tabel 2.7

Tabel 2.7 Sifat Umum Metanol^[35]

<i>Molecular formula</i>	CH ₃ OH
<i>Molar mass</i>	32.05 g/mol
<i>Appearance</i>	<i>Colorless liquid</i>
<i>Density</i>	0.791 g/cm ³
<i>Melting point</i>	-97°C, -142.9°F (176 K)
<i>Boiling point</i>	64.7°C, -184.4°F (337.8K)
<i>Solubility in water</i>	<i>miscible</i>

2.4.4 Resin Epoksi

Epoksi merupakan salah satu jenis termoset yang tidak dapat menerima siklus pemanasan dan pendinginan secara kontinu, seperti jenis termoplastik. Ketika dipanaskan pada tahap awal, polimer ini akan melunak dan mampu mengalir di dalam cetakan. Namun, pada temperatur yang tinggi, epoksi akan mengalami reaksi kimia sehingga menjadi keras dan tidak mampu kembali ke bentuk semula dan jika dipanaskan ulang, epoksi tidak mampu melunak kembali melainkan akan terdegradasi^[14]. Resin epoksi mengandung sejumlah grup epoksi, yang secara sederhana disusun oleh dua atom karbon dan satu atom oksigen yang termasuk kedalam jenis *thermoset*. Struktur dasar dari resin epoksi terlihat pada Gambar 2.18.

Secara umum, polimer jenis *thermoset* terdiri dari dua penyusun, yaitu susunan resin dan *curing agent*. Epoksi dapat direaksikan dengan hardener agar menghasilkan reaksi *curing* dan menjadi *hard* polimer, yang mempunyai fungsi utama untuk membasahi seluruh permukaan grafit (*matriks*) agar terjadi ikatan *interface* yang baik. Reaksi *curing* ini dapat meningkatkan performa dari epoksi itu sendiri, yaitu dapat meningkatkan titik luluh, kekakuan, dan ketahanan terhadap pelarut. *Curing agent* yang digunakan pada golongan epoksi dapat berupa reaktan atau katalis yang memicu terjadinya ikatan jaring silang. Secara umum, struktur dasar epoksi dapat dilihat pada Gambar 2.18



Gambar 2.18 Struktur Dasar Epoksi^[28]

Sumber : *Preparation, Electrical, Mechanical, and Thermal Properties of Composite Bipolar Plate for A Fuel Cell*

Resin epoksi memiliki beberapa keunggulan dan kelemahan seperti yang terlihat pada Tabel 2.8

Tabel 2.8 Keunggulan dan Kelemahan Resin epoksi^[37]

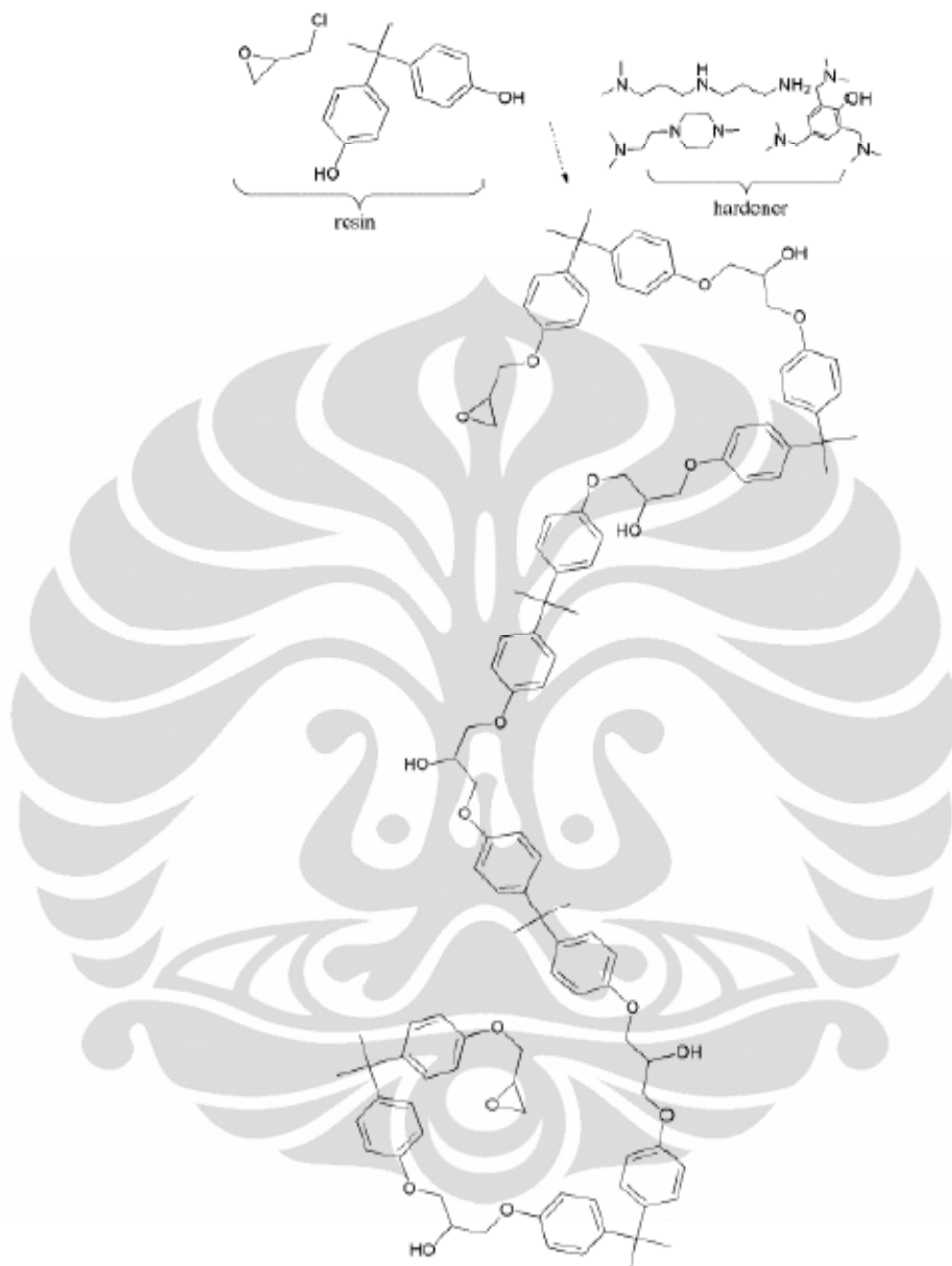
Keunggulan	Kelemahan
1. Mampu mengikat dengan gaya adhesi antara karbon dengan resin secara baik	1. Berbahaya karena mengandung racun kimia
2. Kemungkinan terjadinya penyusutan selama polimerisasi sangat kecil	2. Daya penyerapan terhadap air sangat tinggi
3. Ketahanan terhadap reaksi kimia sangat baik	3. Sulit untuk menggabungkan antara kekuatan dan ketahanan terhadap suhu tinggi
4. Kekuatan tinggi dan fleksibilitas yang rendah	4. Polimerisasinya lambat
5. Ketahanan terhadap <i>creep</i> dan <i>fatigue</i> yang bagus	
6. Sifat elektriknya baik	

Sumber : *Modern Plastics Handbook 2000*

Pada material komposit, epoksi sering digunakan sebagai material utama atau matriks dibandingkan dengan polimer lainnya. Hal ini dikarenakan epoksi

memiliki daya isi dan menjadi penguat yang baik pada sistem komposit. Selain itu reaksi yang terjadi antara epoksi resin dengan unsur lain tidak memerlukan daya pembasahaan yang banyak sehingga proses pencampuran pun lebih sederhana. Selain non reaktif terhadap reaksi kimia, juga sebagai isolator yang baik untuk sifat elektrikalnya^[26]. Oleh karena itu, diperlukan penambahan material lain untuk meningkatkan konduktivitasnya pada aplikasi PEMFC. Kelebihan lain dari epoksi yaitu kemampuan pemrosesannya (*processability*), harganya yang murah, ketahanan korosi tinggi, sifat mekanis dan termal yang baik, serta penyusutan (*shrinkage*) yang rendah pada saat *curing*. Resin epoksi mengandung *strained three-membered epoxide rings* dan berbagai reaktan reaktif dan *cross-linking agents*. Sifat akhir dari termoset tidak hanya tergantung pada struktur dari resin epoksi tetapi juga jenis dan jumlah dari *curing agents*. Kecepatan *curing* dari sistem epoksi dikontrol dari proses *curing*, jenis dan konsentrasi dari katalis, serta polimerisasi kimia.

Pada komponen pelat bipolar, epoksi resin dicampurkan dengan *hardener* dengan tujuan untuk menghasilkan reaksi *curing* sehingga diperoleh matriks polimer yang kuat dan mempunyai sifat mekanis yang baik. Biasanya, proses *curing* yang dilakukan dengan pemberian panas akan menghasilkan polimer yang tahan terhadap kimia dan panas yang baik daripada proses *curing* pada temperatur ruang^[26]. Adapun reaksi antara epoksi resin dan *hardener* adalah seperti Gambar 2.19 berikut.

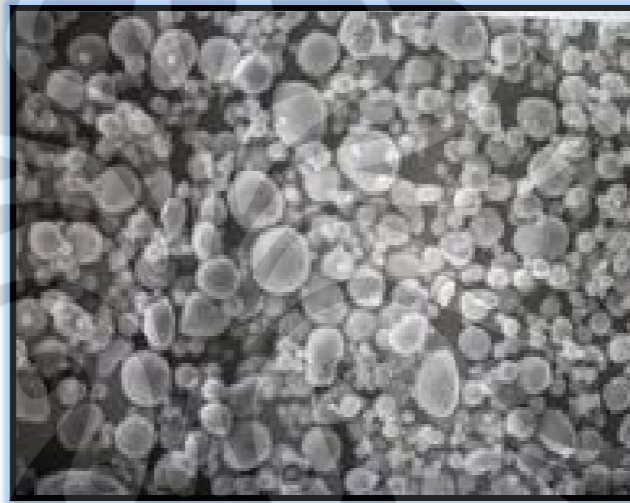


Gambar 2.19 Reaksi antara epoksi resin dan *hardener*^[26]

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

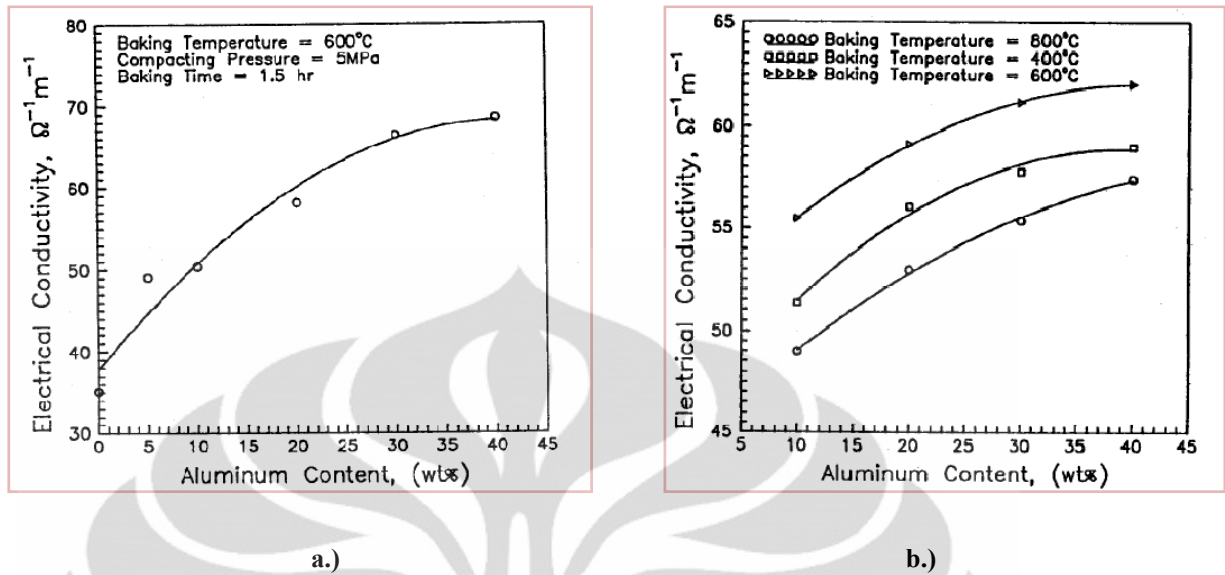
2.4.5 *Superfined Aluminium Powder*

Variasi *aluminium fine powder* ditambahkan ke dalam pelat bipolar bertujuan sebagai aditif untuk meningkatkan sifat mekanis dan konduktivitas dari pelat bipolar yang dihasilkan. Penampakan serbuk aluminium yaitu berwarna perak dan sangat ringan. *Aluminium powder* memiliki ukuran partikel yang simetris, *tap density*, berbentuk spheroid sempurna dan kandungan pengotor yang sangat kecil seperti pada Gambar 2.20 berikut.



Gambar 2.20 Bentuk partikel *aluminium powder*^[38]

Grafrit yang diperkuat dengan partikel metal yakni *aluminium powder* akan meningkatkan nilai dari konduktivitas listrik^[39]. Pada percobaan tersebut dilakukan pembuatan sampel dengan menggunakan grafit putih (300 mesh, densitas 2.05 g/cm^3) dan Aldrich *aluminium powder* (200 mesh, densitas 2.7 g/cm^3). Variasi *aluminium powder* yang digunakan yaitu 5 sampai 40 wt %. Setelah dilakukan pencampuran, bakalan dimasukkan dalam cetakan dan dilakukan kompaksi dengan *hydraulic machine* pada variasi tekanan 2.5 sampai 12.5 MPa. Waktu kompaksi dijaga konstan selama 3 menit dan diberikan variasi temperatur pencetakan. Hasil dari percobaan dapat dilihat pada Gambar 2.21



Gambar 2.21 a.) Efek dari kandungan aluminium terhadap nilai konduktivitas listrik elektroda grafit b.) Variasi nilai konduktivitas listrik dari elektroda grafit dengan temperatur pencetakan^[39]

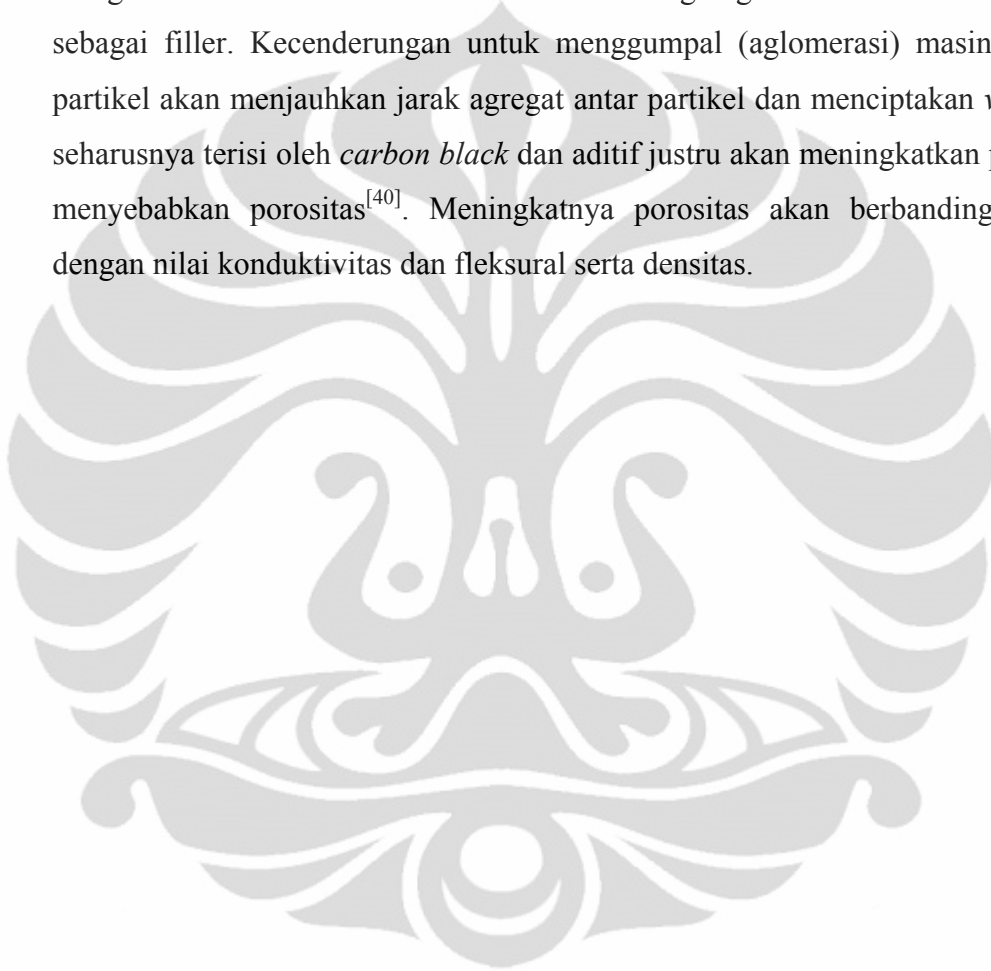
Pada Gambar 2.24 a.) memperlihatkan bahwa seiring dengan kenaikan aluminium pada grafit, nilai konduktivitas juga akan meningkat. Pada gambar 2.24 b.) ditunjukkan bahwa konduktivitas listrik terbaik dihasilkan temperatur 600°C dan pada temperature 800°C konduktivitas akan menurun karena pada temperatur > 600°C grafit cenderung teroksidasi dan aluminium mencapai titik lebur sehingga terbentuk *void* dan terjadi difusi aluminium yang menyebabkan pori dan menaikkan nilai porositas^[39].

Penelitian pengaruh penambahan 0-10 %wt *aluminium powder* pada pembuatan pelat bipolar aplikasi PEMFC dengan metode *compression molding* pada tekanan 30 MPa dengan temperature 70°C selama 4 jam juga menunjukkan bahwa nilai konduktivitas, porositas dan kekuatan fleksural meningkat sampai pada penambahan 2 %wt aluminium yang dikurangi dari total 80 %wt *filler* (grafit + *carbon black*)^[40].

Nilai optimum yaitu pada penambahan aluminium sebesar 2 %wt dengan nilai konduktivitas listrik 0,29 S/cm, porositas 0,455 %, dan kekuatan fleksural 22,75 MPa. Penambahan diatas 2 %wt aluminium menunjukkan penurunan pada nilai densitas, konduktivitas, dan kekuatan fleksural dari pelat bipolar yang

dihasilkan dan menaikkan nilai porositas sampai 545,91 % dari porositas awal yaitu 0,220 %^[40].

Aluminium memiliki sifat konduktivitas listrik sehingga diharapkan penambahannya sebagai aditif akan meningkatkan nilai konduktivitas listrik pelat bipolar. Namun, pada proses pencampuran, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai karakteristik distribusi aluminium dengan grafit EAF dan *carbon black* sebagai filler. Kecenderungan untuk menggumpal (aglomerasi) masing-masing partikel akan menjauhkan jarak agregat antar partikel dan menciptakan *void* yang seharusnya terisi oleh *carbon black* dan aditif justru akan meningkatkan pori yang menyebabkan porositas^[40]. Meningkatnya porositas akan berbanding terbalik dengan nilai konduktivitas dan fleksural serta densitas.



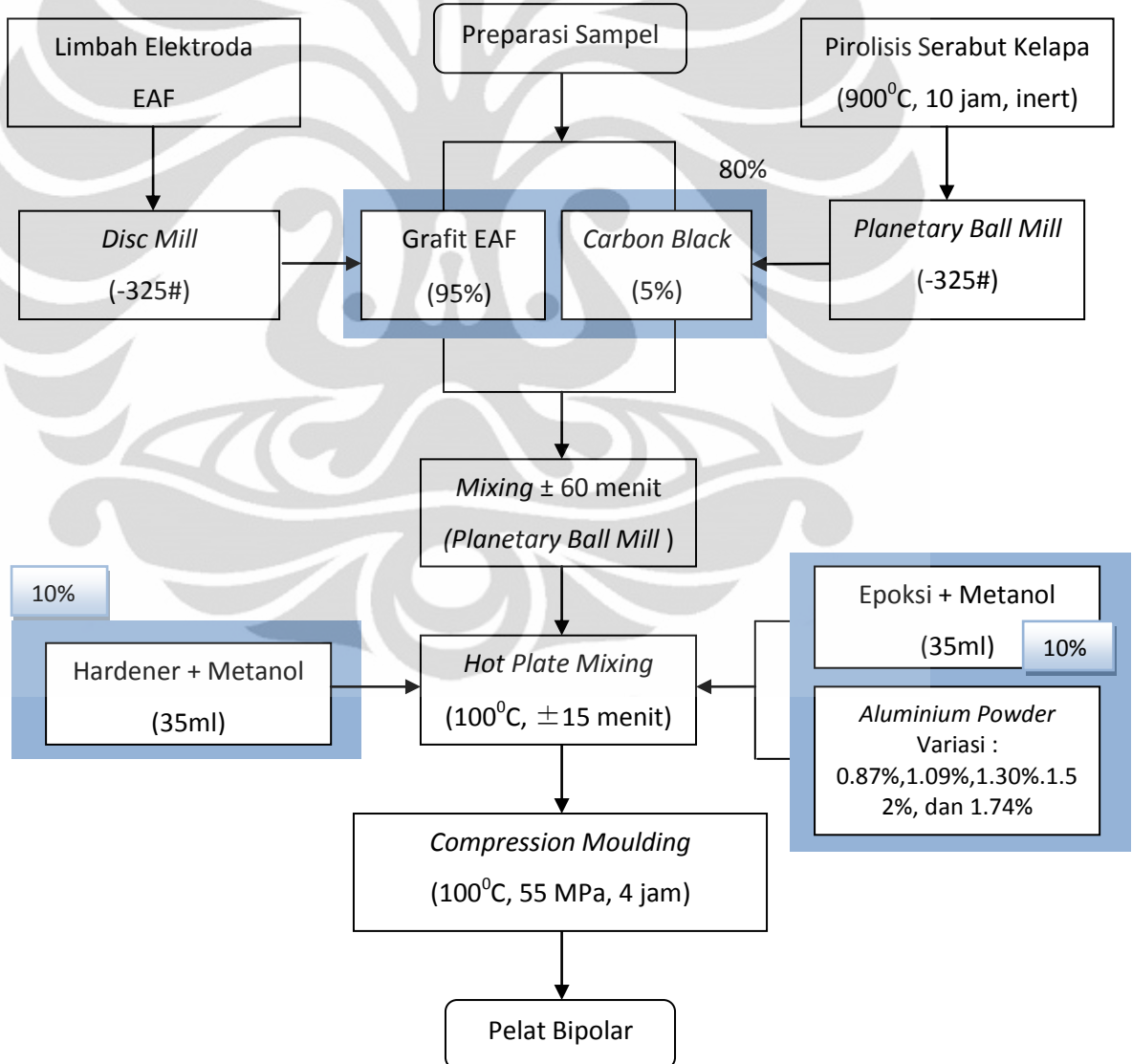
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1.1 Diagram Alir Fabrikasi Sampel

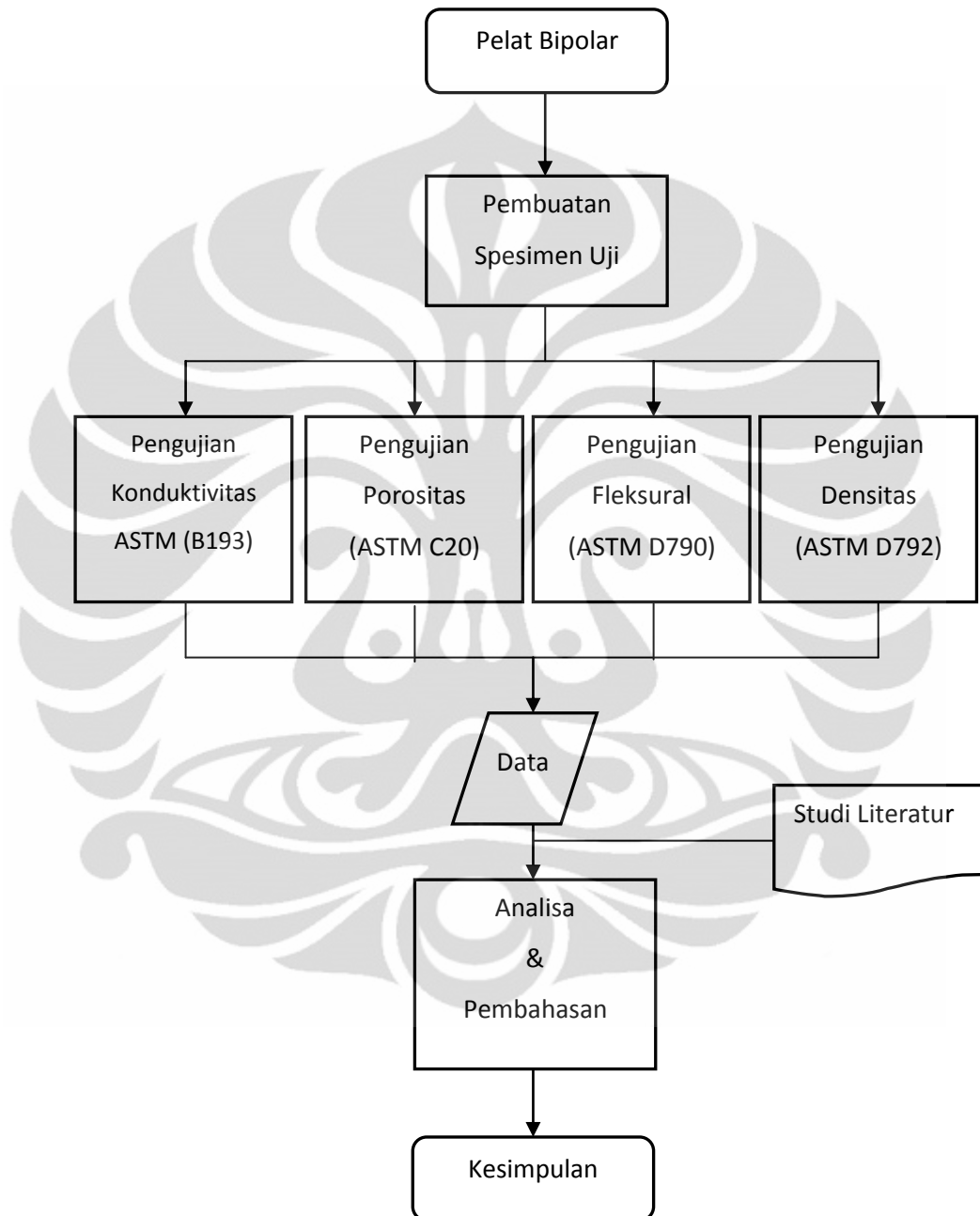
Gambar 3.1 dibawah ini menjelaskan diagram alir penelitian dari pembuatan pelat bipolar komposit.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian (Fabrikasi Pelat Bipolar)

3.1.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel

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



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (Karakterisasi Pelat Bipolar)

3.2 Komposisi Pelat Bipolar dan Variabel Penelitian

Pada Table 3.1 dibawah ini dijabarkan komposisi bahan penyusun sampel serta variasi *aluminium powder* yang digunakan yang ditandai dengan kode sampel yang berbeda.

Tabel 3.1 Komposisi Pelat dan Variasi *Aluminium powder* pada Proses *Compression Moulding*

Bahan (Total 144 gram)		Satuan	Kode Formulasi Sampel				
			1	2	3	4	5
Resin Epoksi	20%	Wt %	50	50	50	50	50
		Gr	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
Resin Hardener		Wt %	50	50	50	50	50
Gr		14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	
Grafit EAF	80%	Wt %	95	95	95	95	95
		Gr	109.44	109.44	109.44	109.44	109.44
		µm	44	44	44	44	44
Carbon Black		Wt %	4.13	3.91	3,70	3,48	3,26
		Gr	4.76	4.51	4.26	4.01	3.76
		µm	44	44	44	44	44
Aluminium powder		Wt %	0.87	1.09	1.30	1.52	1.74
		Gr	1	1.25	1.5	1.75	2
	µm	44	44	44	44	44	

Konversi % massa aluminium dalam satuan gram

$$\text{massa aluminium} = \frac{\% \text{ massa aluminium}}{100\%} \times \text{massa filler}$$

- Sampel 1 (0.87%) = 0.87/100 x 115.2 = 1.00 gram
- Sampel 2 (1.09%) = 1.09/100 x 115.2 = 1.25 gram
- Sampel 3 (1.30%) = 1.30/100 x 115.2 = 1.50 gram
- Sampel 4 (1.52%) = 1.52/100 x 115.2 = 1.75 gram
- Sampel 5 (1.74%) = 1.74/100 x 115.2 = 2.00 gram

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Peralatan

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

- Preparasi
 1. Gergaji Besi
 2. Palu
 3. Mortar
 4. Masker
 5. Sarung Tangan
 6. *Planetary Ball Mill*
- Pembuatan
 1. Timbangan Digital
 2. Beaker glass 100 ml dan 1000 ml
 3. Pipet Volume
 4. Gelas Ukur
 5. *Spatula*
 6. *Mixer*
 7. Mesin *Hot Plate*
 8. Cetakan Pelat ukuran 15 cm x 15 cm
 9. Tissue
 10. *Hydraulic Pressure Machine*
- Karakterisasi
 1. Kertas Amplas 200#, 500#, dan 1000#
 2. Penggaris
 3. Kamera Digital
 4. Jangka Sorong
 5. *Thermometer*
 6. Oven
 7. Alat Uji Kekuatan lentur, *UTM T22K JJ-Loyd Instrument* (Bending 3 titik – ASTM D 790)

8. Alat Uji Konduktivitas *Veeco FPP 5000- four point probe detector* (ASTM B 193)
9. Alat Uji Porositas (ASTM C 20)
10. Alat Uji Densitas (ASTM D 792)

3.3.2 Bahan

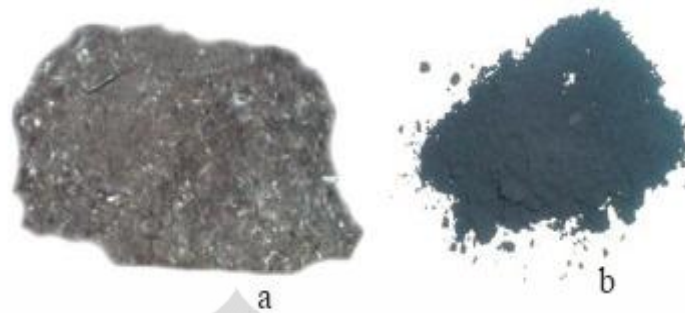
Pada penelitian ini, material dasar yang digunakan untuk membuat pelat bipolar adalah material komposit, berupa resin epoksi sebagai matriks, grafit EAF dan *carbon black powder* sebagai *filler* serta *aluminium powder* sebagai aditif. Resin epoksi diencerkan bersama *aluminium powder* dengan menggunakan pelarut metanol. Resin dan hardener yang digunakan memiliki kekentalan tinggi, sehingga digunakan metanol sebagai pelarut organik untuk mengencerkan bahan-bahan tersebut agar nantinya dapat bercampur baik dengan bahan-bahan pengisi konduktif ketika proses pencampuran. Massa total dari masing-masing material penyusun yang dibutuhkan untuk membuat sebuah pelat bipolar adalah 144 gram.

3.3.2.1 Grafit EAF

Pada penelitian ini digunakan grafit EAF (*Electric Arc Furnace*) sisa peleburan baja PT.Krakatau Steel. Ukuran partikel dari grafit yang digunakan adalah -325 mesh (kurang dari 44 μm). Ukuran tersebut diperoleh setelah bongkahan grafit EAF ditumbuk dan digerus menggunakan alat *disc mill* dan *planetary ball mill* untuk kemudian diayak. Berat grafit yang digunakan adalah 95% dari keseluruhan 80% total berat bahan pengisi konduktif yang digunakan. Perhitungan jumlah grafit yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.1

3.3.2.2 Carbon Black

Carbon black (CB) berfungsi sebagai material konduktif pada komposit. *Carbon black* dengan permukaan yang halus akan mampu mengantarkan arus listrik dan membentuk jaringan karbon konduktif. Pada penelitian ini *carbon black* yang dipakai dihasilkan dari pirolisis serat alami (serabut kelapa). Proses tersebut dilakukan dalam oven pada temperatur $\pm 900^\circ\text{C}$ selama ± 10 jam. *Carbon black* dihaluskan sampai membentuk serbuk dengan ukuran partikel kurang dari 325 mesh (kurang dari 44 μm).



Gambar 3.3 (a) Serabut kelapa sebelum pirolisis; (b) Carbon black setelah di-milling dan ayak

Berat *carbon black* yang digunakan adalah 5% dari keseluruhan 80% total berat bahan pengisi konduktif yang digunakan.

3.3.2.3 Resin Epoksi

Pada penelitian ini, polimer termoset yang digunakan yaitu resin epoksi (*Bhispenol A-epichlorohydrin*) dan *hardener* (*Polyaminoamide*) dengan merek dagang Eposchön. Epoksi *hardener* digunakan karena polimer epoksi memerlukan sebuah *coupling agent* yang berfungsi sebagai stimulan terjadinya proses polimerisasi dengan baik pada suhu ruang, sedangkan resin epoksi berfungsi untuk mengikat bahan-bahan pengisi konduktif, seperti grafit EAF dan *carbon black*. Tabel 3.2 dan 3.3 berikut adalah spesifikasi dari resin epoksi dan epoksi *hardener* yang digunakan dalam penelitian.

Tabel 3.2 Spesifikasi Polimer Epoksi Resin Eposchon

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

Tabel 3.3 Spesifikasi Polimer Epoksi Hardener Eposchon

Sifat	Nilai
Kekuatan tarik (kgf/cm²)	410
Kekuatan fleksural (kgf/cm²)	810
Kekuatan tekan (kgf/cm²)	740
Kekuatan geser adesif (kgf/cm²)	160

Pada penelitian ini digunakan resin dan *hardener* dengan rasio berat 1:1. Secara keseluruhan resin epoksi yang digunakan adalah 20% dari total berat bahan-bahan yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar.

3.3.2.4 Metanol

Penggunaan metanol pada penelitian ini berfungsi sebagai pengencer resin epoksi dan *hardener*, sebelum dicampurkan dengan bahan-bahan pengisi konduktif. Pengenceran epoksi dan *hardener* menggunakan metanol akan meningkatkan homogenisasi pembasahan matriks terhadap bahan penguat. Metanol yang mudah menguap tidak akan menyisakan senyawa pengotor yang dapat mengganggu keseimbangan reaksi pada saat proses pencampuran. Volum metanol yang digunakan untuk melarutkan sangat menentukan karakteristik dari komposit pelat bipolar yang dihasilkan. Jika kadar metanol terlalu banyak, maka tingkat kelarutan resin epoksi dan *hardener* akan semakin tinggi sehingga menyebabkan bakalan akan menjadi semakin basah. Begitu juga sebaliknya, jika metanol yang digunakan sedikit, bakalan yang dihasilkan cenderung kering. Hal ini berpengaruh pada saat proses pencetakan, jika bakalan terlalu kering dapat menyebabkan komposit pelat bipolar yang dihasilkan memiliki permukaan yang buruk dan bersifat rapuh. Oleh sebab itu, diperlukan ketelitian dalam proses *hot mixing* untuk memastikan bahwa bakalan yang akan dicetak tidak terlalu basah juga tidak terlalu kering. Pada penelitian ini, metanol yang digunakan yaitu 35 ml untuk masing-masing resin epoksi dan *hardener*. Berikut ini merupakan spesifikasi metanol yang dipakai.

Tabel 3.4. Spesifikasi metanol

Formula	CH ₃ OH
Massa	32,05 g/mol
Penampakan	Cairan tidak berwarna
Densitas	0,7918 g/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

3.3.2.5 Superfine Aluminum Powder

Variasi *aluminium fine powder* ditambahkan ke dalam pelat bipolar bertujuan sebagai penguat untuk meningkatkan sifat mekanis dan konduktivitas dari pelat bipolar yang dihasilkan. Spesifikasi Aluminium yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.5

Tabel 3.5 Spesifikasi Aluminium Powder

Spesifikasi Aluminium Powder	
Rumus kimia	Al
Massa molar	26.98 g/mol
Temperatur Penyalaan	400°C
Kelarutan dalam air	20°C
Titik leleh	660°C
Densitas	2.70 g/cm ³ (20 °C)
Titik didih	2467 °C
Ukuran partikel	44 µm

3.4 Proses Pembuatan Pelat

3.4.1 Proses Penghalusan Grafit EAF dan Carbon Black

Untuk proses pembuatan pelat bipolar dalam penelitian ini, diperlukan grafit EAF dan *carbon black* dengan spesifikasi partikel-artikel halus (serbuk). Grafit awal yang didapat berupa bongkahan besar sisa dari peleburan baja sehingga dilakukan proses *crushing* untuk menjadikan bongkahan yang besar tersebut menjadi bongkahan-bongkahan yang lebih kecil. Untuk mendapatkan

grafit yang sesuai spesifikasi, dilakukan proses *milling* pada bongkahan yang lebih kecil menggunakan *plantary ball mill*. Dari proses ini, didapat grafit menjadi partikel-partikel halus berukuran 44 μm . Setelah itu, dilakukan proses *shieving* untuk mendapatkan partikel grafit yang homogen yaitu 44 μm . Sedangkan *carbon black*, kondisi awal bahan sudah merupakan partikel halus berukuran 149 μm sehingga hanya dilakukan proses *milling* dan *shieving* untuk memperoleh ukuran partikel homogen 44 μm .

3.4.2 Penimbangan

Masing-masing bahan yang telah sesuai spesifikasi kemudian ditimbang menggunakan timbangan digital untuk mendapatkan ukuran yang tepat dari setiap bahan penyusun pelat bipolar untuk setiap sampel uji. Pada penelitian ini, total berat komposisi penyusun kelima sampel uji bernilai sama. Adapun proses penimbangannya adalah sebagai berikut:

1. Hidupkan tombol “on” pada alat
2. Lakukan kalibrasi alat pada kondisi angka 0
3. Letakan cawan atau wadah pada timbangan dan kondisikan kembali pada angka 0
4. Letakkan bahan yang hendak ditimbang pada cawan atau wadah
5. Timbang bahan sesuai berat yang telah ditentukan
6. Ulangi untuk sampel 2-5

3.4.3 Proses Pencampuran

Proses pencampuran (*mixing*) dilakukan dari bahan-bahan yang telah ditimbang sebelumnya sesuai dengan komposisi berat tiap sampel uji. Proses ini sangat menentukan karakteristik akhir dari pelat bipolar yang dihasilkan. Diharapkan dengan proses pencampuran yang baik, komponen-komponen penyusun material komposit dapat terdistribusi secara merata pada setiap bagian dari pelat bipolar yang dihasilkan. Masing-masing komponen dicampur dengan menggunakan *mixer* hingga terbentuk bakalan yang homogen. Langkah-langkah yang dilakukan pada proses ini sebagai berikut:

1. Masukkan grafit EAF dan *carbon black* ke dalam *beaker glass* 1 L, kemudian diaduk hingga merata selama ± 10 menit (*room temperature*)

Universitas Indonesia

2. Encerkan resin epoksi beserta *aluminium powder* sesuai dengan perhitungan berat tiap sampel dengan menggunakan methanol sebanyak 35 ml dalam *beaker glass*
3. Pada beaker glass lain, encerkan *hardener* dengan menggunakan metanol sebanyak 35 ml
4. Masukkan resin epoksi dan *aluminium powder* yang telah tercampur merata dengan metanol ke dalam *beaker glass* 1 L yang telah berisi bahan pengisi konduktif, kemudian *mixing* selama ± 5 menit
5. Masukkan *hardener* yang telah tercampur merata dengan metanol ke dalam *beaker glass* 1 L yang telah berisi bahan pengisi konduktif dan resin epoksi, kemudian *mixing* selama ± 5 menit
6. Kemudian dilanjutkan proses *hot mixing* diatas *hot plate* pada temperatur 100°C selama ± 15 menit sampai membentuk bakalan yang siap dicetak. Proses tersebut bertujuan untuk menghilangkan metanol pada bakalan agar struktur pelat bipolar tidak berpori.



Gambar 3.4 Hasil Pencampuran Bahan-Bahan Penyusun Komposit

3.4.4 Proses Pencetakan

Pada proses ini, bakalan dimasukkan ke dalam cetakan berukuran 15x15 cm. Bakalan diratakan menggunakan pelat perata agar tersebar secara merata di dalam cetakan sehingga menghasilkan pelat dengan ketebalan seragam. Kemudian, cetakan diletakkan pada *hydraulic pressure machine* untuk dilakukan proses *compression moulding* pada temperatur 100°C dengan tekanan 55 Mpa selama 4 jam. Kemudian, cetakan dibiarkan selama 12 jam untuk pendinginan agar tidak terjadi pelengkungan dan perubahan dimensi pada pelat bipolar yang dihasilkan. Prosedur pencetakan adalah sebagai berikut:

1. Bersihkan seluruh bagian cetakan dengan menggunakan lap kering atau tisu kemudian oleskan bagian permukaan alas dan tutup cetakan menggunakan oli secara merata
2. Masukkan bakalan hasil pencampuran ke dalam cetakan hingga merata.
3. Tutup cetakan dan pindahkan ke dalam *hydraulic pressure machine*
4. Atur tekanan pada mesin *hydraulic* sebesar 55 MPa dengan temperatur 100°C
5. Operasikan mesin selama 4 jam dengan mengontrol tekanan stabil pada 55 MPa
6. Matikan *heater* dan biarkan 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

Gambar 3.5 menunjukkan jenis dan bentuk cetakan yang digunakan pada penelitian ini, serta penempatan cetakan tersebut pada *hydraulic pressure machine* pada saat dilakukan proses pencetakan pelat bipolar



Gambar 3.5 Cetakan yang Digunakan (Kiri) dan Penempatan Cetakan pada Mesin *Hydraulic Pressure Machine* (Kanan)

3.4.5 Pembuatan Spesimen Uji

Dari pelat bipolar yang dihasilkan, kemudian dibagi menjadi tiga bagian untuk pembuatan sampel uji yaitu:

1. Sampel untuk pengujian konduktivitas, dibuat dengan ukuran 2x2 cm sebanyak 6 buah. Tiap sampel diampas permukaannya dengan grit 150#, 500# dan 1000#, hingga mencapai ketebalan $\pm 0,3$ cm agar arus yang ditembakkan pada permukaan sampel dapat ditangkap, sehingga bisa didapatkan nilai konduktivitas yang akurat
2. Sampel untuk pengujian densitas dan porositas, dibuat sampel dengan ukuran 2x2 cm sebanyak 6 buah untuk masing-masing variabel



Gambar 3.6 Sampel Uji Konduktivitas, Densitas, dan Porositas

3. Sampel untuk pengujian kekuatan fleksural, dibuat dengan ukuran 12x1,3x 0,3 cm sebanyak 5 buah. Masing-masing sampel diampas permukaannya hingga rata agar menghilangkan retak mikro ataupun sumber konsentrasi

tegangan (seperti bekas pemotongan) yang dapat menyebabkan inisiasi retak, sehingga akan dihasilkan nilai kekuatan fleksural yang lebih akurat

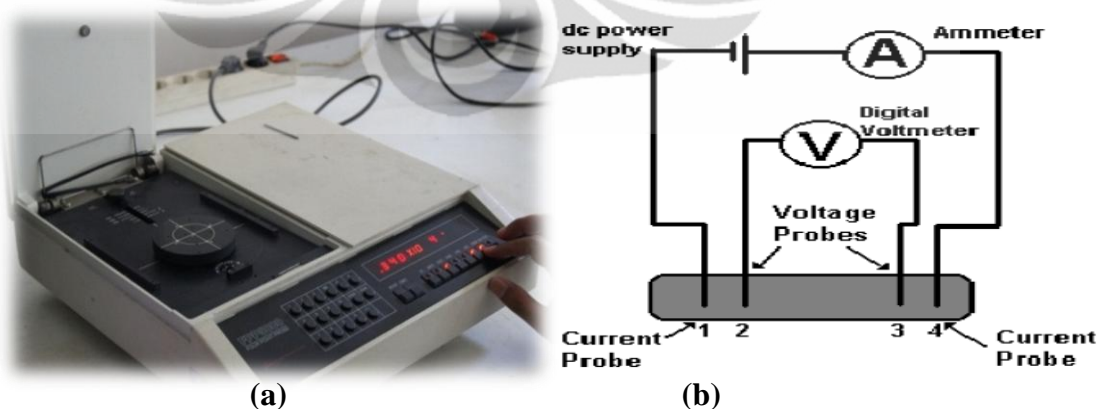


Gambar 3.7 Sampel Uji Fleksural

3.4.6 Proses Karakterisasi Material Pelat Bipolar

3.4.6.1 Pengujian Konduktivitas

Pengujian konduktivitas ini mengacu pada ASTM B193 dimana pengujian ini sangat penting untuk dilakukan mengingat fungsi utama dari pelat bipolar, yakni sebagai pengumpul dan pembawa elektron dari anoda ke katoda. Dari pengujian ini dapat diketahui sejauh mana pelat bipolar mampu menghantarkan arus listrik. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat digital *four point probe test* (Veeco FPP 5000), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.8 (a). Prinsip kerja dari alat ini ditunjukkan pada Gambar 3.8 (b). Alat ini terdiri dari empat buah kawat. Arus akan mengalir melalui kawat no.1 dan 4. Apabila sampel memiliki tahanan terhadap aliran dari arus listrik, maka akan terjadi penurunan tegangan karena arus mengalir sepanjang sampel. Penurunan tegangan ini terjadi pada kawat 2 dan 3 yang kemudian diukur dengan *voltmeter* digital.



Gambar 3.8 (a) Mesin Veeco FPP 5000 - *Four Point Probe Test* dan (b) Ilustrasi Skematis dari Mesin *Four Point Probe Test*

Adapun prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut:

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

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

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

dimana,

σ = nilai konduktivitas (S/cm)

ρ = resistivitas (Ω .cm)

3.4.6.2 Pengujian Densitas

Pengujian dilakukan dengan menggunakan prinsip Archimedes, dimana massa di udara akan berbeda dengan massa di dalam air akibat adanya gaya ke atas dari sampel. Pengujian ini dilakukan berdasarkan prosedur standar pengujian ASTM D792. Adapun prosedur dari pengujian densitas secara bertahap adalah sebagai berikut:

1. Sampel ditimbang pada temperatur ruang dan diperoleh massa kering dari sampel
2. Kemudian sampel dicelupkan dalam *beaker glass* berisi air. Pencelupan ini harus dilakukan hingga seluruh permukaan sampel berada di tengah-tengah *beaker glass*, dan tidak boleh menyentuh dasar dan pinggir dari *beaker glass*, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.9

Universitas Indonesia



Gambar 3.9 Penimbangan Sampel di Air

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

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

dimana,

A = massa sampel di udara (gr)

B = massa sampel di dalam air (gr)

ρ air = rapat massa air pada suhu tertentu 28.5°C (0.996089 gr/cm³)

ρ sampel = densitas sampel (gr/cm³)

3.4.6.3 Pengujian Porositas

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

1. Sampel dikeringkan dengan cara dipanaskan dalam *oven* pada temperatur 100°C selama 1 jam dengan tujuan untuk menghilangkan uap air, minyak, maupun cairan yang menempel

2. Sampel yang telah dikeringkan kemudian ditimbang pada temperatur ruang, setelah itu dicatat berat sampel sebagai berat kering (D)
3. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam *beaker glass* berisi air yang telah dipanaskan pada temperatur 100°C di atas *hot plate* selama 2 jam dan sampel tidak boleh menyentuh bagian dasar dari dinding *beaker glass*, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.10. Hal ini dimaksudkan agar air masuk dan mengisi melalui pori-pori yang ada



Gambar 3.10 Sampel Dipanaskan Dalam Air Pada Temperatur 100°C

4. Kemudian sampel direndam dalam air dingin selama 12 jam
5. Sampel yang telah direndam selama 12 jam, kemudian ditimbang di dalam air, dan dicatat berat sampel sebagai berat-gantung (*suspended weight*) (S).
6. Pengujian dilanjutkan dengan menghilangkan air yang ada pada permukaan sampel dengan menggunakan kain katun dan sekali lagi dilakukan penimbangan pada temperatur ruang dan dicatat berat sampel sebagai berat jenuh (*saturated weight*) (Sw).

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

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

dimana,

S_w = *Saturated Weight* (gr)

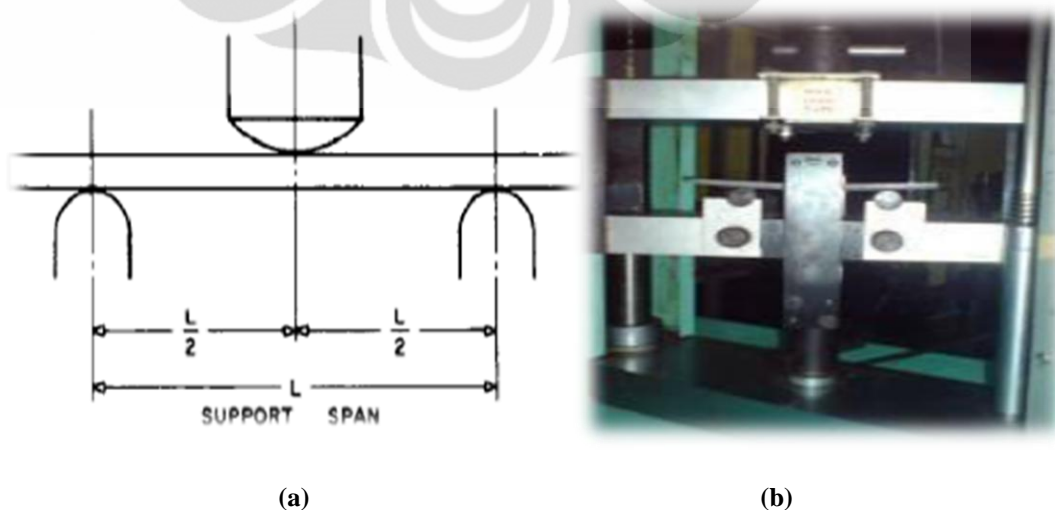
$D = \text{Dry Weight (gr)}$

$S = \text{Suspended Weight (gr)}$

3.4.6.4 Pengujian Fleksural

Pengujian fleksural bertujuan untuk mengetahui ketahanan dari pelat bipolar terhadap beban tekan. Pengujian ini sangat penting untuk dilakukan karena akan menentukan performa dari pelat bipolar ketika digunakan pada berbagai aplikasi, mengingat pelat bipolar banyak mendapatkan tekanan dari gas yang masuk maupun yang keluar dari sistem sel bahan bakar. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM D790. Pengujian dilakukan dengan metode *three point bending*, dimana beban akan diberikan pada bagian tengah sampel uji, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.11. Ukuran dari sampel uji adalah $12 \times 1,3 \times 0,3$ cm.

Prinsip dari pengujian ini adalah sampel diletakkan di antara dua penahan, kemudian penekanan dilakukan ketika mesin bergerak ke atas, sehingga sampel uji mengalami pembebanan pada bagian tengah dari sampel tersebut dengan kecepatan pembebanan yang konstan hingga sampel patah. Pengujian ini menggunakan mesin *Universal Testing Machine (UTM) T22K* dengan menggunakan panjang penahan 65 mm, diameter *punch* 3,2 mm dan kecepatan pembebanan yang diberikan 1,5 mm/menit. Gambar 3.11b menunjukkan proses pengujian fleksural dengan menggunakan mesin UTM.



Gambar 3.11 (a) Skema Pengujian Fleksural dan (b) Proses Pengujian Fleksural

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

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

dimana,

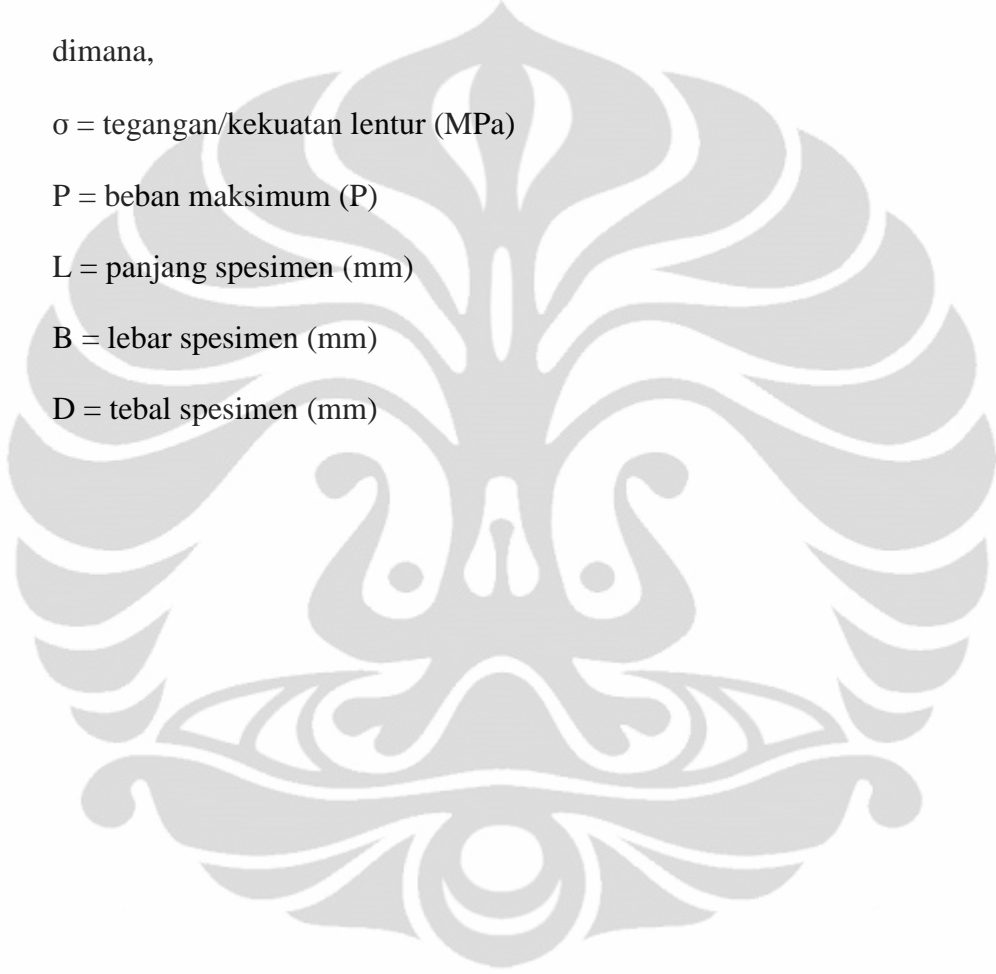
σ = tegangan/kekuatan lentur (MPa)

P = beban maksimum (P)

L = panjang spesimen (mm)

B = lebar spesimen (mm)

D = tebal spesimen (mm)



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Preparasi Sampel

Sebelum melakukan pengujian untuk karakterisasi pelat bipolar, terlebih dahulu dilakukan rangkaian proses preparasi yaitu preparasi grafit EAF, preparasi *carbon black*, pencampuran bahan (*mixing*), pencetakan, dan pembuatan sampel uji. Preparasi grafit EAF terdiri dari rangkaian proses *crushing*, *milling*, dan *screening*. Preparasi *carbon black* terdiri dari *crushing*, *milling* dan *screening*. Preparasi *aluminium powder* yaitu dengan proses *screening*. Hasil dari proses tersebut berpengaruh terhadap sifat akhir dari pelat bipolar.

4.1.1 Hasil Preparasi Grafit EAF

Tujuan dari preparasi grafit EAF adalah untuk mereduksi ukuran dari bentuk awal grafit berupa bongkahan menjadi partikel-partikel berukuran $\leq 44 \mu\text{m}$. 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 Hasil Preparasi *Carbon Black*

Preparasi awal *carbon black* berupa pembuatan *carbon black* dengan proses pirolisis melalui pemanasan pada temperatur tinggi (900°C selama 10 jam). Hasil kemudian direduksi melalui penumbukan dan pengayakan menjadi berukuran $\leq 44 \mu\text{m}$.



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

Gambar 4.2 diatas memperlihatkan bentuk awal *carbon black* berupa serabut berwarna hitam kecokelatan merupakan hasil dari proses pirolisis serat alami (serabut kelapa). Setelah melalui proses selanjutnya, seperti pada gambar 4.2 b, didapatkan *carbon black* berbentuk partikel berwarna hitam.

4.1.3 Hasil Pencampuran

Setelah grafit EAF, *carbon black*, dan aluminium selesai dipreparasi, kemudian selanjutnya dilakukan proses pencampuran (*mixing*). Pencampuran pada penelitian ini pertama dimulai dengan proses *mixing* antara grafit EAF dengan *carbon black* yang masing-masing memiliki ukuran partikel $\leq 44 \mu\text{m}$. Pencampuran antara grafit EAF dan *carbon black* dilakukan dalam jar menggunakan mesin *planetary ball mill* dengan kecepatan 360 rpm selama 60 menit seperti pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Pencampuran grafit EAF dan *carbon black* menggunakan jar *planetary ball mill*

Tujuan dari pencampuran adalah agar kedua partikel dapat terdistribusi secara merata disetiap bagian sebelum proses pembuatan bakalan. Kemudian

grafit EAF dan *carbon black* yang sudah dicampur ditambahkan lagi dengan menggunakan resin epoksi yang sudah dilarutkan *aluminium powder*. Selanjutnya ditambahkan *hardener* yang dilarutkan menggunakan pelarut metanol dan dilakukan pencampuran dengan dan tanpa pengaplikasian panas. Pencampuran bertujuan untuk mendapatkan bakalan homogen yang siap untuk dicetak. Pada Gambar 4.4 berikut memperlihatkan hasil pencampuran awal dan hasil pencampuran akhir dari bahan.



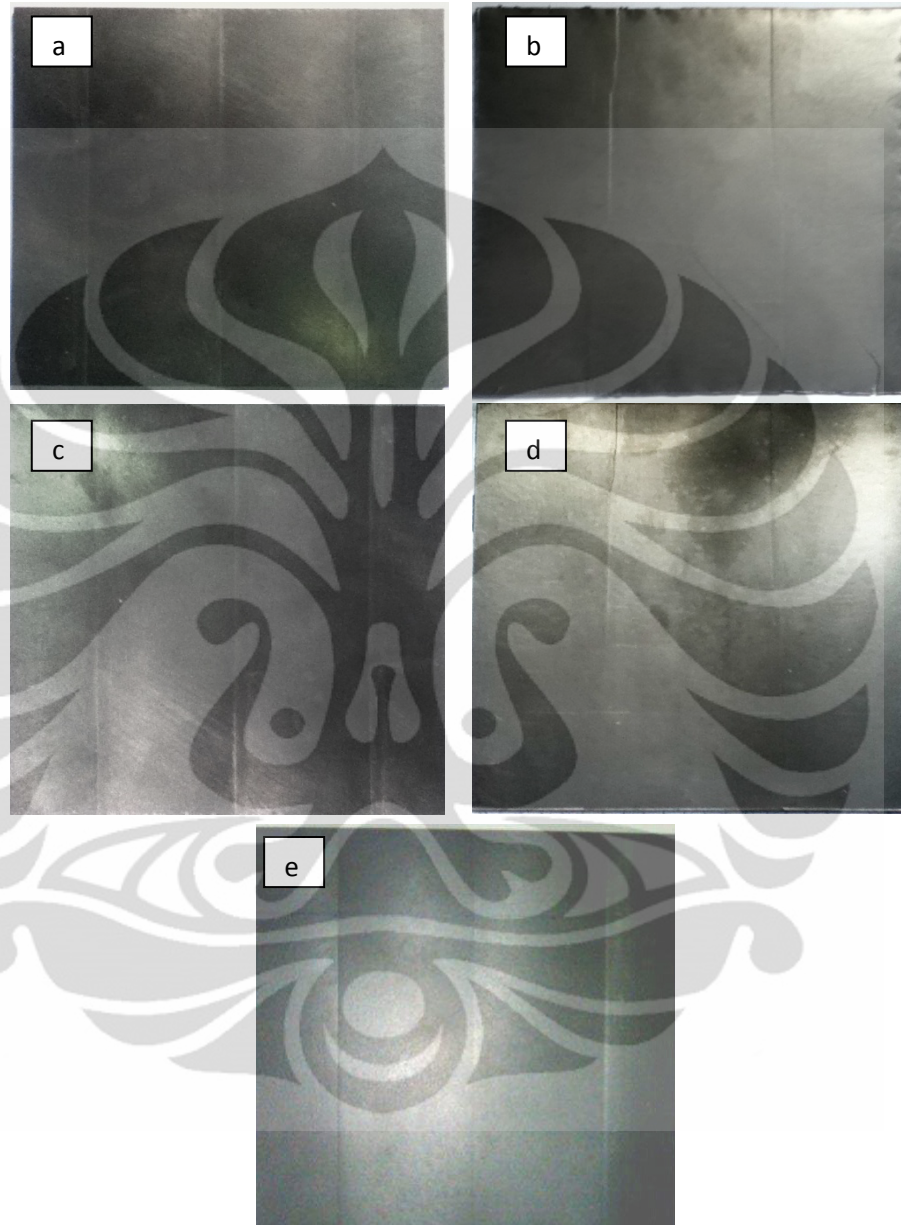
Gambar 4.4 a.) Hasil pencampuran sebelum proses *hot plate* b.) Hasil bakalan setelah proses *hot plate*

4.2 Pengamatan Visual Pelat Bipolar Hasil Pencetakan

Pada penelitian ini dibuat lima pelat bipolar menggunakan metode *compression molding* dengan tekanan 55 MPa dan suhu cetakan konstan 100°C. Setelah selesai dilakukan proses pencampuran, langkah berikutnya adalah pencetakan. Bakalan homogen yang telah terbentuk, dimasukkan ke dalam cetakan yang berukuran 150 x 150 x ± 4,7 mm, kemudian dilakukan pemerataan sebelum proses pencetakan.

Formulasi sampel untuk kelima sampel pelat bipolar yaitu dengan penambahan *aluminium powder* dengan dikurangi massa penguat *carbon black* sebesar 5% dari total 80% massa grafit dan *carbon black* dengan perbandingan 1gr:4.76gr, 1.25gr:4.51gr, 1.5gr:4.26gr, 1.75gr:4.01gr, dan 2gr:3,76gr. Ukuran partikel grafit EAF, *carbon black*, dan *aluminium powder* yang dipakai pada penelitian ini masing-masing sebesar $\leq 44 \mu\text{m}$.

Gambar 4.5 menunjukkan penampakan pelat bipolar yang dihasilkan pada variasi 1-2 gram *aluminium powder*.



Gambar 4.5 Pelat Bipolar yang Dihasilkan pada Variasi Penambahan *Aluminum Powder* : a.) 0.87%wt, b.) 1.09%wt, c.) 1.30%wt, d.) 1.52%wt, dan e.)1.74%wt

Pada permukaan pelat bipolar, terdapat partikel aluminium berwarna putih pada seluruh permukaan. Hal tersebut menunjukkan secara visual partikel aluminium yang ditambahkan terdistribusi cukup baik pada proses pembuatan bakalan. Secara umum bahwa permukaan dari pelat bipolar cukup halus, hanya

Universitas Indonesia

beberapa bagian dari sampel yang sedikit mengalami retak seperti pada sampel dengan penambahan 1.09%wt aluminium. Dimensi panjang dan lebar dari pelat yang terbentuk sesuai dengan dimensi cetakan yang menandakan bahwa bakalan mengisi rongga cetakan dengan baik.

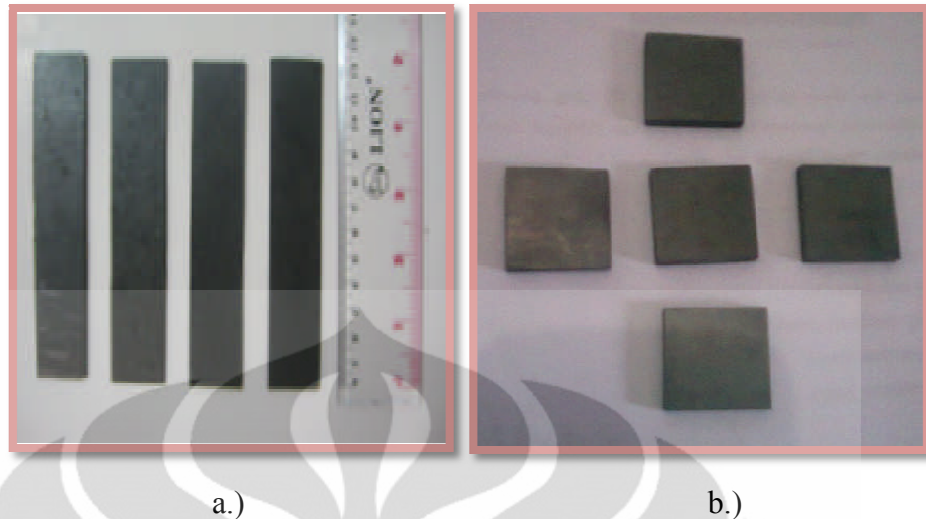
Permukaan dari pelat bipolar cukup halus dan rata, hal tersebut menandakan proses *curing* terjadi sampai ke permukaan pelat bipolar. Ketebalan dari pelat bipolar yang dihasilkan berkisar antara 2-4 mm. Ketebalan pelat yang berbeda antar sisi berlawanan menyebabkan pelat terlihat memiliki kemiringan. Hal ini terjadi penempatan bakalan yang tidak merata pada cetakan sehingga saat pembebanan, distribusi penekanan menjadi tidak merata sehingga dihasilkan ketebalan pelat bipolar yang berbeda. Perbedaan ketebalan tidak berpengaruh signifikan terhadap sifat dari pelat, selama proses pencampuran bakalan berlangsung dengan baik.

Selain itu, pada permukaan pelat bipolar terbentuk suatu garis-garis vertikal yang ditimbulkan oleh permukaan dari cetakan yang digunakan. Garis-garis yang terdapat pada permukaan pelat bipolar yang tidak rata tersebut harus dihilangkan dan dihaluskan dengan pengampelasan pada saat pembuatan sampel uji. Salah satu pengaruhnya adalah pada pengujian fleksural, jejak garis yang tidak rata tersebut dapat menjadi konsentrasi tegangan dan mempengaruhi nilai kekuatannya sehingga nilai yang didapatkan pada penelitian tidak valid.

Setting waktu penekanan pada proses *compression molding*, yaitu selama 4 jam diharapkan distribusi penekanan dapat tersebar secara merata sehingga faktor perataan bakalan yang tidak merata dapat diabaikan dimana tidak berpengaruh terhadap karakteristik pelat bipolar yang dihasilkan. Apabila setiap proses pembuatan pelat bipolar tersebut dijalankan dengan sangat baik dan teliti, akan didapatkan pelat yang mempunyai permukaan visual yang rata, tidak rapuh, serta minim cacat.

4.3 Hasil Pembuatan Spesimen Uji

Sebelum dilakukan proses pengujian, perlu dilakukan pembuatan sampel uji yang sesuai dengan standar pengujian. Sampel uji yang dihasilkan terlihat pada Gambar 4.6 dimana terdapat perbedaan dimensi antara sampel uji fleksural dengan sampel uji lainnya (konduktivitas, densitas, dan porositas).



Gambar 4.6 a.) Sampel uji Fleksural, b.) Konduktivitas, Densitas, dan Porositas

Untuk pengujian fleksural, dimensi sampel yang dibuat yaitu 12 x 1.3 cm sedangkan untuk pengujian konduktivitas, densitas dan porositas ukuran sampel yaitu 2 x 2 cm. Sampel uji untuk setiap pengujian diharapkan memiliki dimensi yang seragam agar hasil pengujian yang didapat optimum. Namun, kepresisian dari pembuatan sampel uji bukan menjadi satu parameter utama dari sifat mekanis pelat bipolar yang dihasilkan. Pembuatan bakalan yang baik juga parameter seperti temperatur, tekanan, dan waktu proses harus dioptimalkan karena kondisi tersebut akan berpengaruh terhadap sifat dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan^[13].

4.4 Pembahasan Hasil Pengujian Spesimen Uji

4.4.1 Pengujian Densitas

Reduksi berat dari pelat bipolar mutlak diperlukan agar dapat dihasilkan pelat bipolar dengan berat yang cukup ringan sehingga *fuel cell* dapat disusun (*stacking*) dengan jumlah yang optimal sehingga menghasilkan efisiensi *output* energi listrik yang cukup besar. Seperti yang telah disebutkan pada bab 1 bahwa pelat bipolar berpengaruh terhadap 80% volume, 70% berat, dan 60% biaya dari *fuel cell*^[11]. Pengujian densitas ini bertujuan untuk mengetahui massa jenis dari pelat bipolar yang telah dibuat.

Pelat bipolar dengan berat yang relatif ringan dapat dicapai dengan menjadikan densitas atau kerapatan massa dari pelat bipolar yang dihasilkan

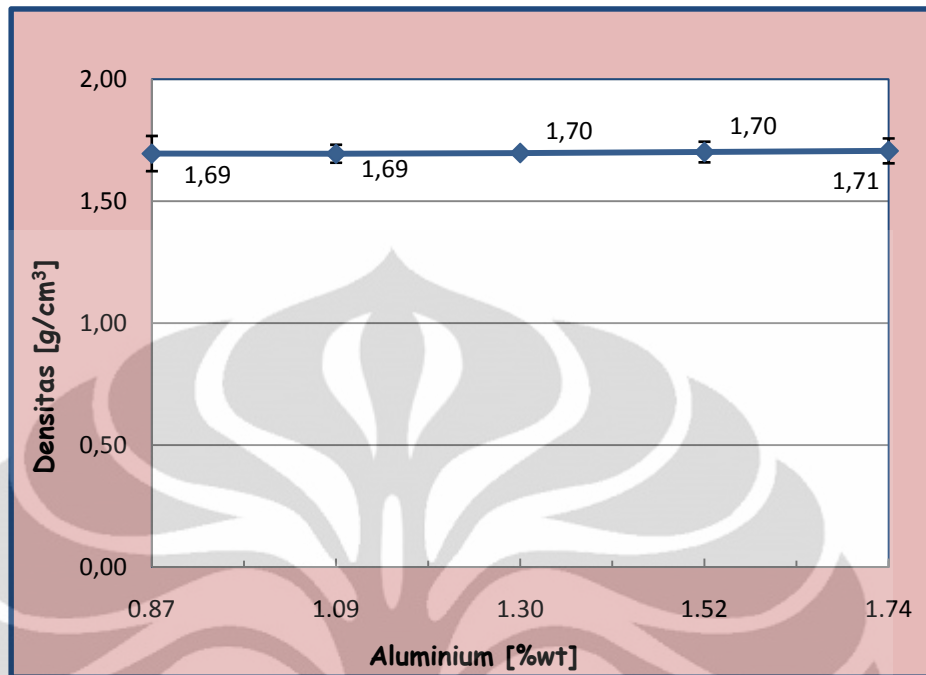
sebagai tolak ukur. Secara umum, parameter densitas berbanding lurus dengan parameter berat. Hal ini berarti bahwa semakin kecil nilai densitas suatu material maka berat atau massa dari material tersebut akan semakin kecil pula. Dengan mengurangi ukuran, berat, dan biaya pelat bipolar yang digunakan, maka dapat mengurangi biaya produksi dari PEMFC secara signifikan.

Hasil pengujian nilai densitas pelat bipolar untuk kelima formula penelitian dapat dilihat pada Tabel 4.1 di bawah ini:

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Densitas

Kode Sampel	Variasi aluminium [%wt]	Densitas [gr/cm³]
1	0.87	1,69
2	1.09	1,69
3	1.30	1,70
4	1.52	1,70
5	1.74	1,71

Dari tabel diatas, terjadi kenaikan nilai densitas seiring dengan kenaikan massa *aluminium powder* yang ditambahkan kedalam pelat bipolar sebagai *aditif*. Hal ini telah sesuai dengan perhitungan secara teoritis, dimana densitas dari *aluminium powder* (2,7 gr/cm³) yang lebih besar dari densitas grafit (1,66-1,72 gr/cm³) dan *carbon black* (1,2-1,3 gr/cm³) akan meningkatkan densitas dari pelat bipolar. Gambar 4.7, menunjukkan bahwa peningkatan massa aluminium pada pembuatan pelat bipolar sampai 1.74%wt, akan meningkatkan densitas pelat bipolar.



Gambar 4.7 Pengaruh Penambahan aluminium Terhadap Densitas

Hasil pengujian menunjukkan bahwa densitas paling rendah yaitu pada penambahan 0.87%wt dan 1.09%wt aluminium dengan nilai densitas 1,69 gr/cm³, sedangkan densitas paling tinggi yaitu pada pelat bipolar dengan penambahan aluminium sebesar 1.74%wt dengan nilai densitas 1,71 gr/cm³. Perbedaan nilai densitas ini terjadi karena adanya mekanisme pemadatan oleh tekanan disertai temperatur selama pencetakan^[41]. Pengaplikasian temperatur akan menguapkan metanol yang berfungsi sebagai pelarut resin epoksi dan *hardener*. 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^[13,28].

Penambahan *aluminium powder* lebih besar dari 2 %wt dari total 80 %wt *filler* pada pembuatan pelat bipolar aplikasi dengan metode *compression molding* dengan tekanan 30 MPa pada temperatur 70°C selama 4 jam cenderung menurunkan nilai densitas^[40]. Hal tersebut dikarenakan kandungan aluminium pada komposit, akan membentuk banyak poros dan *void* akibat partikel aluminium

cenderung beraglomerasi dan menyebabkan *void* sehingga nilai porositas meningkat dan menurunkan densitas^[40]. Namun, pada penambahan 0-2 wt% aluminium nilai densitas tidak menunjukkan perubahan penurunan yang terlalu besar. Hal tersebut sesuai dengan penelitian ini, dimana penambahan 0.87-1.74%wt *aluminium powder* cenderung tidak mempengaruhi nilai densitas pelat bipolar yang dihasilkan dikarenakan massa aluminium yang cenderung kecil tidak terlalu mempengaruhi struktur komposit.

Nilai densitas dari kelima formulasi sampel berada pada range yang berdekatan, sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan *aluminium powder* dengan massa sampai 1.74%wt sebagai aditif tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai densitas dari pelat bipolar yang dihasilkan, dimana pada penelitian serupa dengan material penyusun yang sama tanpa penambahan *aluminium powder*, nilai densitas pelat bipolar tetap dalam range 1,6 – 1,8 g/cm³^[21]. Nilai densitas yang dihasilkan telah memenuhi persyaratan DOE, USA untuk pelat bipolar, yaitu kurang dari 5 gr/cm³.

4.4.2 Pengujian Porositas

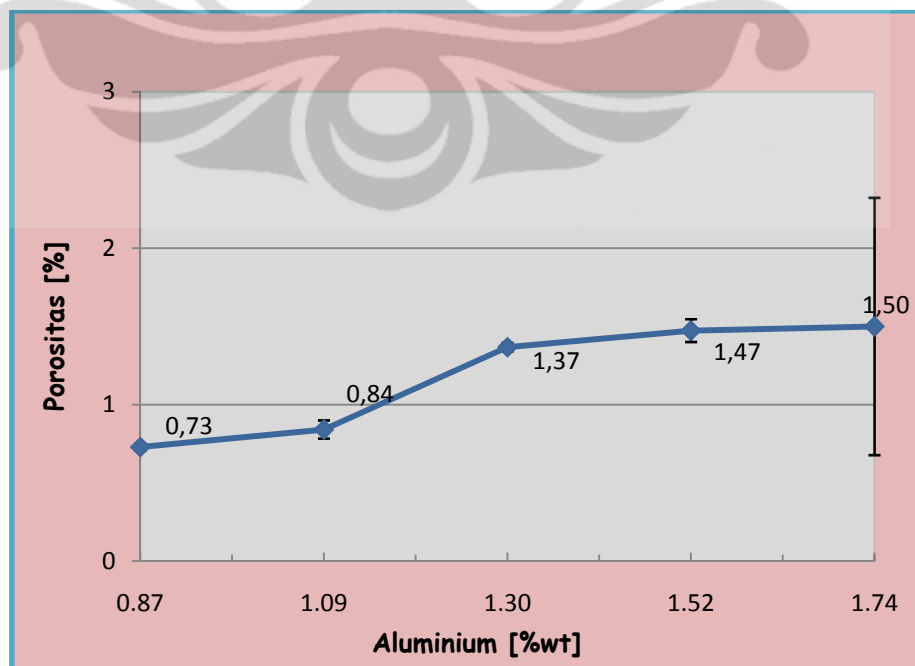
Pada pembuatan pelat bipolar, persentase porositas harus dibuat seminimal mungkin bertujuan agar tidak adanya gas lain yang masuk ke dalam sistem *fuel cell* (sifat impermeabilitas) yang dapat mengganggu performa dan kinerja dari sel tunam. Nilai porositas dari pelat bipolar yang kecil dapat meningkatkan efisiensi dan performa dari sel tunam. Dalam pembuatan pelat bipolar, 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.

Hasil pengujian porositas untuk kelima formulasi sampel yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.2

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Porositas

Kode Sampel	Variasi aluminium [%wt]	Porositas [%]
1	0.87	0,73
2	1.09	0,84
3	1.30	1,37
4	1.52	1,47
5	1.74	1,50

Porositas dapat terjadi karena adanya penguapan metanol ketika proses *compression moulding* pada pencetakan pelat bipolar. Gambar 4.8 menunjukkan secara umum bahwa seiring kenaikan dari massa *aluminium powder* yang ditambahkan ke dalam pelat bipolar, maka nilai porositas cenderung meningkat. Hal ini dapat terjadi akibat *aluminium powder* tidak terdistribusi merata bersama grafit dan *carbon black*. Peningkatan penambahan *aluminium powder* pada komposit akan cenderung menyebabkan distribusi partikel menjadi tidak merata sehingga terjadi aglomerasi yang menyebabkan void sehingga terdapat banyak pori pada matriks dan menaikkan nilai porositas^[40].



Gambar 4.8 Pengaruh Penambahan Aluminium Terhadap Porositas

Selain itu *carbon black* itu sendiri juga memiliki struktur yang mirip seperti porositas. Oleh karena itu jika *carbon black* ditambahkan pada pelat bipolar, maka nilai porositasnya akan semakin naik sehingga penggunaan *carbon black* harus dibatasi^[33]. Jarak kerapatan partikel yang semakin renggang akan meningkatkan porositas karena kerapatan ikatan partikel tidak optimum.

Penurunan tingkat porositas secara langsung akan berpengaruh terhadap sifat mekanis dan nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan berkaitan dengan berkurangnya jarak antar agregat bahan pengisi untuk menghasilkan penurunan nilai resistivitas pada daerah antar agregat sehingga berkontribusi dalam peningkatan nilai konduktivitas^[14]. Hal lain yang terjadi adalah ketersediaan daerah/jalur konduktivitas elektron (*electron conductivity path*) yang semakin banyak sehingga kondisi ini berpengaruh dalam peningkatan nilai konduktivitas listrik^[13].

Nilai porositas tertinggi sebesar 1.50% yaitu pada penambahan 1.74%wt aluminium dan nilai porositas terendah yaitu pada penambahan 0.87%wt aluminium sebesar 0.73%. Porositas ini lebih besar dari percobaan serupa pada penambahan 2%wt aluminium^[40]. Hal ini dapat disebabkan oleh parameter penelitian seperti tekanan dan proses pencampuran. Tekanan yang digunakan cukup tinggi yaitu 55 MPa mengacu pada penelitian yang dilakukan sebelumnya^[21], dimana pada variabel tekanan tersebut, didapatkan sifat mekanis yang optimum. Tekanan yang sangat tinggi menyebabkan peristiwa pemadatan yang terlalu tinggi sehingga epoksi tidak dapat mengisi rongga-rongga yang terbentuk akibat penguapan metanol yang terjadi sehingga daerah yang seharusnya diisi oleh epoksi menjadi kosong dan berongga serta menyebabkan terjadinya porositas^[21].

Proses pencampuran yang kurang baik juga dapat menyebabkan kenaikan nilai porositas. Metode pencampuran yang digunakan pada penelitian ini cukup sederhana yaitu dengan menggunakan *mixer* sehingga memungkinkan proses pencampuran tersebut belum dapat mendistribusikan partikel aluminium secara merata dengan partikel grafit EAF dan *carbon black* dan cenderung beraglomerasi sehingga banyak terdapat rongga-rongga kosong yang menyebabkan *void* dan menaikkan nilai porositas.

Dapat disimpulkan, pembuatan pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC dengan penambahan lebih besar dari 1.09%wt aluminium tidak disarankan karena nilai porositas cenderung besar dan tidak sesuai dengan target DOE yaitu $< 1\%$.

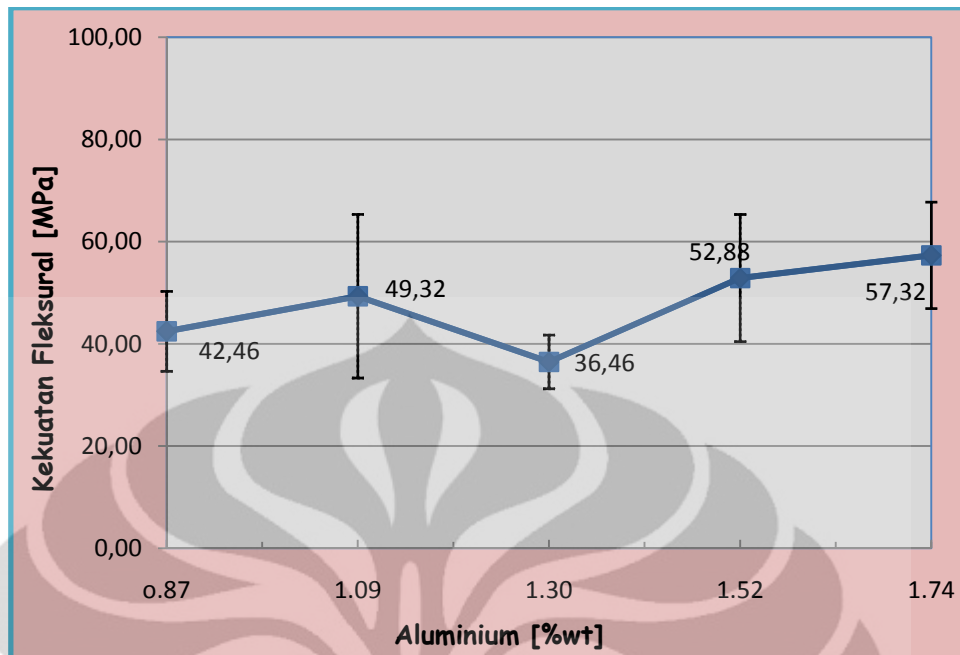
4.4.3 Pengujian Fleksural

Pengujian fleksural dilakukan pada pelat bipolar untuk mengetahui nilai ketahanan suatu pelat bipolar terhadap suatu beban tekan. Sesuai dengan persyaratan teknis *Department of Energy* (DOE), USA untuk karakteristik pelat bipolar yang ditunjukkan pada Tabel 2.3^[20], maka sebuah pelat bipolar harus memiliki kekuatan fleksural lebih besar dari 25 MPa. Pengujian fleksural penting dilakukan untuk mengetahui kekuatan dari pelat bipolar menahan tekanan gas dari segala arah. Hasil pengujian dari kekuatan pelat bipolar dengan variasi penambahan *aluminium powder* dapat dilihat pada Tabel 4.3 dibawah ini

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kekuatan Fleksural

Kode Sampel	Variasi Aluminium [%wt]	Kekuatan Fleksural [MPa]
1	0.87	42,46
2	1.09	49,32
3	1.30	36,46
4	1.52	52,88
5	1.74	57,32

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa secara umum penambahan *aluminium powder* akan meningkatkan nilai kekuatan fleksural. Pada penambahan 1.30%wt aluminium, terjadi anomali penurunan kekuatan fleksural, dan kemudian nilai kekuatan fleksural akan kembali naik pada penambahan 1.52%wt aluminium sampai dengan 1.74%wt.



Gambar 4.9 Pengaruh Penambahan Aluminium Terhadap Kekuatan Fleksural

Ketika daya pembasahan yang terjadi baik, maka diperlukan gaya yang lebih besar untuk dapat memutuskan ikatan antara antarmuka matriks dan bahan pengisi^[13]. Jika dilihat dengan hasil pengujian fleksural, maka kekuatan fleksural dari sampel 1.30%wt *aluminium powder* sudah memenuhi standar karena nilainya sudah lebih dari 25 MPa. Distribusi penyebaran antar partikel yang tidak merata dimungkinkan sebagai penyebab nilai kekuatan fleksural sampel dengan 1.30%wt *aluminium powder* tidak sebaik sampel dengan variasi lainnya.

Ketika proses pencampuran tidak maksimal, pengelompokan *carbon black* dan aluminium dapat terjadi dimana partikel-partikel *carbon black* dan aluminium akan berkumpul pada daerah tertentu dan tidak tersebar secara merata sehingga meningkatkan ketidakhomogenan yang menyebabkan penurunan terhadap sifat mekanis pelat bipolar yang dihasilkan.

Seperti diketahui fungsi dari penambahan *carbon black* adalah untuk mengisi *void* yang terbentuk oleh grafit, sehingga porositasnya berkurang. Walaupun dilakukan penambahan *carbon black* dengan ukuran partikel yang kecil, dimana memiliki luas permukaan yang lebih besar, struktur tersebut yang masih dapat menyebabkan terbentuknya pori, sehingga sifat mekanis yang dihasilkan masih belum optimal^[33].

4.4.4 Pengujian Konduktivitas

Pelat bipolar merupakan komponen utama dalam PEMFC harus bersifat konduktif atau dengan kata lain memiliki nilai konduktivitas listrik cukup tinggi. Hal ini mutlak diperlukan karena pelat bipolar sebagai pengumpul dan pembawa elektron dari anoda ke katoda dengan baik sehingga efisiensi kerja yang dimiliki oleh PEMFC menjadi optimal. Target nilai konduktivitas listrik yang harus dimiliki oleh pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC sesuai dengan yang ditetapkan oleh DOE USA adalah minimal 100 S/cm. Nilai konduktivitas listrik ini dapat dicapai dengan pemilihan material serta desain pemrosesan material yang tepat.

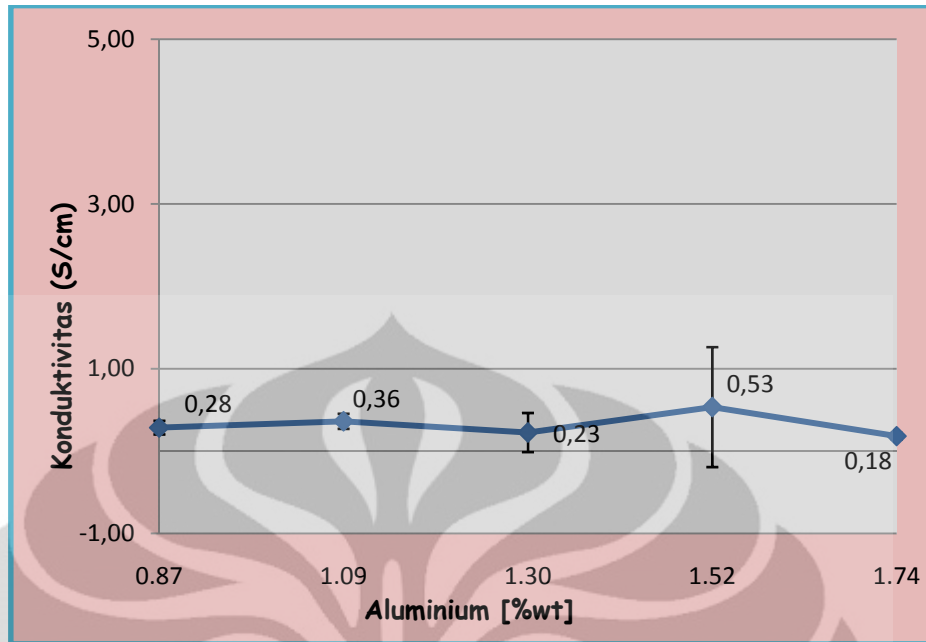
Dari hasil pengukuran resistivitas atau hambatan dengan menggunakan alat *four point probe*, maka akan didapatkan nilai konduktivitas (S/cm) pelat bipolar yang dapat dilihat pada Tabel 4.4

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik

Kode Sampel	Variasi Aluminium [%wt]	Konduktivitas Listrik [S/cm]
1	0.87	0,28
2	1.09	0,36
3	1.30	0,23
4	1.52	0,53
5	1.74	0,18

Penambahan *aluminium powder* sampai 2%wt pada proses pembuatan pelat bipolar aplikasi PEMFC dengan metode *compression molding* menggunakan tekanan 30 MPa pada 70°C selama 4 jam akan meningkatkan konduktivitas listrik pada komposit^[40].

Sifat dari aluminium yang memiliki konduktivitas listrik yang lebih baik dari grafit, dapat menaikkan konduktivitas. Namun, kadar aluminium yang tinggi justru akan menurunkan nilai konduktivitas dikarenakan meningkatkan porositas dan menyebabkan korosi permukaan^[40]. Gambar 4.10 menunjukkan bahwa pada penambahan *aluminium powder* sebesar 1.52%wt mendapatkan nilai konduktivitas listrik optimum dari pelat bipolar.



Gambar 4.10 Pengaruh Aluminium Terhadap Konduktivitas Listrik

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa konduktivitas listrik dari pelat bipolar mengalami penurunan pada variasi penambahan 1.30%wt *aluminium powder* dan kemudian mengalami kenaikan yang cukup tinggi pada penambahan 1.52%wt sebesar 0.53 S/cm. Nilai ini lebih baik dari proses pembuatan pelat bipolar aplikasi PEMFC dengan menggunakan parameter proses tekanan 30 MPa, temperatur 70°C selama 4 jam^[40].

Peningkatan nilai konduktivitas yang cukup signifikan juga dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Salah satunya yakni adanya partikel *carbon black* yang berukuran lebih kecil bertindak sebagai penghubung tambahan antar lapisan grafit, yang akan mengakibatkan nilai resistansi menurun^[28], dan hal tersebut ekuivalen dengan peningkatan sifat konduktivitas listrik. Untuk setiap variabel, pengujian konduktivitas listrik dilakukan pada 5 sampel berbeda dengan nilai deviasi setiap sampel cukup jauh.

Distribusi *carbon black* yang tidak merata dan adanya porositas yang tinggi dapat meningkatkan nilai resistansi listrik. Apabila distribusi *carbon black* dan aluminium dalam matriks dapat lebih merata, maka nilai konduktivitas listrik pelat bipolar dapat semakin tinggi. Selain itu, dengan berkurangnya ukuran partikel akan terjadi peningkatan pengumpulan (aglomerasi) dari partikel-partikel tersebut^[28], sehingga dimungkinkan akan terjadi ketidakseragaman karakteristik

yang dihasilkan dari keseluruhan bagian pelat bipolar yang dihasilkan. Semakin besar jarak rambatan aliran listrik maka nilai hambatan akan semakin tinggi^[31]. Peningkatan luas permukaan *carbon black* yang dijelaskan di atas memungkinkan untuk meminimalisasi jarak antar agregat (grafit dan *carbon black*), sehingga membentuk hubungan tambahan antar partikel grafit dan dapat mengurangi resistansi pada daerah antar agregat^[13].

Pada pembuatan komposit dengan menggunakan matriks berupa polimer dapat menyebabkan adanya kemungkinan partikel grafit terlapisi oleh lapisan tipis dari resin epoksi yang digunakan sehingga menghasilkan nilai konduktivitas listrik yang rendah dari komposit^[13]. Berbeda halnya ketika digunakan bahan pengisi grafit yang memiliki struktur berlapis dan jaringan (*network*) seperti pada *expanded graphite* (EG). Pada grafit dengan struktur tersebut tahapan interkalasi dari resin epoksi pada struktur poros grafit dapat terjadi dengan lebih sempurna, sehingga menghasilkan nilai konduktivitas listrik yang lebih tinggi^[13]. Hal tersebut dikarenakan grafit dengan struktur berlapis dan jaringan akan membentuk fraksi yang besar bagi daerah/jalur konduktivitas elektron, yang tidak terjadi pada grafit dengan struktur partikel^[13]. Selain itu, luas permukaan yang dimiliki oleh grafit dengan struktur partikel lebih kecil dibandingkan dengan grafit berstruktur lapisan dan jaringan. Hal tersebut dapat menjadi alasan mengapa nilai konduktivitas listrik yang dihasilkan pada masing-masing pelat bipolar masih dibawah target yang ditetapkan untuk pelat bipolar^[13].

4.5 Perbandingan Sifat Pelat Bipolar

Berdasarkan hasil karakterisasi pelat bipolar yang dilakukan, perbandingan nilai hasil pengujian dan karakterisasi terhadap seluruh formula penelitian dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 4.5 Perbandingan Karakteristik Pelat dengan Variasi Penambahan *Aluminium Powder*

Variasi Penambahan Aluminium [%wt]	Karakteristik Pelat Bipolar			
	Densitas [gr/cm ³]	Kekuatan Fleksural [MPa]	Porositas [%]	Konduktivitas [S/cm]
0.87	1,69	42,46	0,73	0,28
1.09	1,69	49,32	0,84	0,36
1.30	1,69	36,46	1,37	0,23
1.52	1,70	52,88	1,47	0,53
1.74	1,71	57,32	1,50	0,18

Berdasarkan Tabel 4.5 diatas, pelat bipolar dengan sifat mekanis dan konduktivitas listrik yang cukup baik yaitu pelat bipolar dengan formulasi penambahan *aluminium powder* sebanyak 1.52%wt. Walaupun untuk nilai densitas dan porositas tidak sebaik sampel dengan formula lain, namun secara umum nilai densitas sudah berada diatas standar DOE yakni $< 5 \text{ gr/cm}^3$. Sedangkan untuk nilai kekuatan fleksural, semua pelat bipolar yang dihasilkan memiliki nilai kekuatan fleksural jauh dari standar yang ditetapkan DOE yakni pada rentang 36-58 MPa dimana target DOE sendiri yakni $> 25 \text{ MPa}$. Pelat bipolar dengan formulasi aluminium sebesar 1.74%wt memiliki kekuatan fleksural optimum sebesar 57,32 MPa dan nilai konduktivitas listrik optimum yaitu pada 1.52%wt aluminium sebesar 0,53 S/cm. Untuk porositas, hanya sampel dengan penambahan 0.87%wt dan 1.09%wt yang memiliki porositas dibawah 1%. Untuk sampel $> 1.09\%$ wt nilai porositas sudah tidak memenuhi standar.

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pengaruh variabel penambahan aluminium untuk mendapatkan komposisi ideal dari sifat akhir pelat bipolar komposit yang dihasilkan. Hasil pengujian yang cenderung naik turun menyebabkan parameter lain seperti metode pencampuran juga perlu dikembangkan untuk mendapatkan distribusi partikel yang lebih baik agar mendapatkan pelat bipolar dengan sifat mekanis dan konduktivitas listrik yang baik.

BAB 5

KESIMPULAN

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

1. Variasi penambahan 1.52%wt *aluminium powder* pada pembuatan pelat bipolar memberikan nilai konduktivitas tertinggi yaitu 0.53 S/cm dan kekuatan fleksural sebesar 52.88 MPa
2. Nilai densitas tertinggi yaitu 1.71 g/cm³ (1.74%wt *aluminum powder*) dan terendah 1.69 (0.87%wt dan 1.09%wt *aluminium powder*). Kelima pelat bipolar memiliki nilai densitas yang sudah memenuhi standar DOE, USA, yaitu kurang dari 5 gr/cm³.
3. Variasi penambahan *aluminium powder* cenderung meningkatkan nilai porositas pelat bipolar. Porositas minimum sebesar 0.73% (0.87%wt) dan maksimum 1.50% (1.74%wt)
4. Kekuatan fleksural kelima pelat bipolar yang dihasilkan dengan variasi penambahan penguat *aluminium powder* (0.87-1.74%wt) telah sesuai standar DOE, USA, yaitu ≥ 25 Mpa. Nilai minimum 36.46 MPa (1.3%wt) dan maksimum 57.32 Mpa (1.74%wt).
5. Dari penelitian ini, karakteristik yang telah memenuhi standar DOE yaitu nilai densitas (< 5 g/cm³) dan kekuatan fleksural (> 25 Mpa). Sedangkan untuk porositas sebagian belum memenuhi standar ($< 1\%$) dan untuk konduktivitas masih jauh dari standar yang telah ditetapkan (> 100 S/cm).

DAFTAR ACUAN

- [1] International Energy Agency. *Resources to Reserves - Oil and Gas Technologies for the Energy Markets of the Future* (IEA: 2005)
- [2] Diakses pada tanggal 5 Juni 2011 pukul 13.23 dari:
<http://www.esdm.go.id/berita/geologi/42-geologi/3450-gas-biogenik-sumber-energi-alternatif.html>
- [3] Diakses pada tanggal 2 April 2011 pukul 17.05 dari:
<http://id.shvoong.com/exact-sciences/physics/1837410-sumber-energialternatif/>
- [4] Stambouli A, Traversa E. *Fuel cells, an Alternative to Standard Sources of Energy*. University of Roma, 'Tor Vergata', Department of Chemical Science and Technology. Via Della Rierca Scientifica-00133, Roma, Italy. October 23rd 2001.
- [5] US. Department of Energy. *Fuel Cell Handbook 7th Edition*, EG & G Technical Services Inc., Morgantown, West Virginia, November 2004
- [6] Diakses pada tanggal 1 Juni 2011 pukul 16.00 dari:
<http://www.geni.org/globalenergy/library/articles-renewable-energy-transmission/h2-fuel-cell.shtml>
- [7] Listiani, Eniya Dewi. *Mass Transfer Study On Polymer Electrolyte Fuel Cell*. Seminar Nasional Teknologi. 2007
- [8] Steele, Brian C. H, and Angelika Heinzl. *Materials for fuel-cell technologies*. Insight Review Articles. November 2001
- [9] Yuhua Wang, *Thesis: Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*, University of Waterloo, Ontario, Canada. 2006
- [10] R Chris and S Scott. *Introduction to Fuel Cell Technology*. Notre Dame : U.S.A Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame, May 2003

- [11] Bimanyu, Taufik Arya. Skripsi: *Pengaruh Penambahan Tembaga Terhadap Sifat Mekanik Dan Konduktivitas Pelat Bipolar Komposit PP/C-Cu*. Fakultas Teknik, Departemen Metalurgi Dan Material. Universitas Indonesia. 2009
- [12] Xiao Zi Yuan, et al. *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells - From Materials to Processing*. National Research Council Canada, Institute for Fuel Cell Innovation, Vancouver, Department of Chemical and Biological Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC. Canada. February 8th 2006
- [13] Ling Du. *Dissertation: Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. The Graduate Faculty of University. May 2008
- [14] Jalani, Nikhil H. *Development of Nanocomposite Polymer Electrolyte Membranes for Higher Temperature PEM Fuel Cells*. Chemical Engineering, Worcester Polytechnic Institute. 2006
- [15] J.H. Hirschenhofer, et al, *Fuel Cell Handbook Fourth Edition*. Parsons Corporation. 1998
- [16] Diakses pada tanggal 16 Maret 2011 pukul 19.20 dari:
<http://www.fuelcells.org.au/Fuel-Cell-Education-NSW-Australia.htm>
- [17] Xianguo Li, and Imran Sabir. *Review of Bipolar Plates in PEM Fuel Cells: Flow-Field Designs*. Canada: University Avenue West. 2004
- [18] Diakses pada tanggal 25 April 2011 pukul 19.20 dari:
<http://journal.uui.ac.id/index.php/Teknoin/article/view/136/99>
- [19] Allen Hermanna, Tapas Chaudhuria, Priscila Spagnolb. *Bipolar plates for PEM fuel cells : A review*. Department of Physics, University of Colorado, National Renewable Energy Laboratory, Golden. USA. June 2nd 2005
- [20] DOE Hydrogen Program. *Next Generation Bipolar Plates for Automotive PEM Fuel Cells*. Annual Progress Report. 2007

- [21] Indrawati, Heny. *Pengaruh Tekanan terhadap Karakteristik Pelat Bipolar PEMFC Karbon-Karbon Komposit dengan Penambahan 5%wt Carbon Black*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2010
- [22] Joshua Hertz, GJ La O', Jungik Kim. *Fuel Cells Fundamentals The Materials Science of Renewable Energy*. 2006
- [23] *ASM Handbook Volume 21 Composite*. ASM Internasional. 2001
- [24] Callister, William D., Jr. *Materials Science and Engineering*. 7th ed. United States of America: University of Utah, 2007.
- [25] Diakses pada tanggal 23 Mei 2011 pukul 15.00 dari:
<http://id.wikipedia.org/wiki/Grafit>
- [26] Kakati, Biraj kumar and Dhanapati Deka. *Journal: Effect of Resin Matrix Precursor on the Properties of Graphite Composite Bipolar Plate for PEM Fuel Cell*. Department of Energy, Tezpur University, Assam, Napaam, Dist: Sonitpur, Tezpur, India, 2007
- [27] Suharno, Bambang, Bustanul Arifin. *Pembuatan Baja Pada EAF*. Departemen Metalurgi dan Material FTUI. 2009
- [28] Hsu-Chiang Kuan, et al.. *Preparation, Electrical, Mechanical and Thermal Properties of Composite Bipolar Plate for A Fuel Cell*. Journal of Power Sources. 2004
- [29] Zhang Jie, Zou Yan-wen, and H.E. Jun. *Influence of Graphite Particle Size and Its Shape on Performance of Carbon Composite Bipolar Plate*. China: Institute of Nuclear Energy and New Energy Technology, Tsinghua University, 2005
- [30] Weber, Erik H. *Development and Modeling of Thermally Conductive Polymer/Carbon Composites*. Michigan: Michigan Technological University, 1999
- [31] Dweiri, Radwan, and Jaafar Sahari. *Journal: Electrical properties of carbonbased polypropylene composites for bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)*. Department of Mechanical and

- Materials Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, Selangor, Malaysia. 2007
- [32] Diakses pada tanggal 17 Mei 2011 pukul 14.33 dari:
<http://www.moderndispersions.com/images/PLACE%20HOLDER%20FOR%20DISPERSION.pdf>
- [33] Jan-Chan Huang. *Carbon Black Filled Conducting Polymers and Polymer Blends*, Plastics Engineering Department, University of Massachusetts Lowell, Lowell, June 18th 2002
- [34] Shen Chunhui, Pan Mu, Yuan Runzhang. *The effect of particle size gradation of conductive fillers on the conductivity and the flexural strength of composite bipolar plate*. Wuhan University of Technology. Beijing, China. 2007
- [35] Diakses pada tanggal 5 Mei 2011 pukul 19.45 dari:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol>
- [36] Kakati Biraj, K, and Deka Dhanapati. *Effect of Resin Matrix Precursor on the Properties of Graphite Composite Bipolar plate for PEM Fuel Cell*. *Energy & Fuel* 21, 1681-1687. 2007
- [37] Harper.A. Charles. “*Modern Plastics Handbook 2000*”.Mc Graw-Hill published company. hlm 2.62. USA. 2000
- [38] Diakses pada tanggal 7 Mei 2011 pukul 18.15 dari:
<http://www.ymzfcg.com/showroom/yingkouhengda/>
- [39] Zahran, R.R. *Electrical Conductivity of Aluminium Reinforced Graphite Electrodes*. Departemen of Chemical Engineering, Qatar University. Doha, State of Qatar. 1993
- [40] Suhandi, Andi dkk. “*Effect of Aluminum Addition to Graphite Composite Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Application*”. The 12th International Conference On QiR, Bali, 4-7 July 2011
- [41] T. Derieth, et al. *Development of Highly Filled Graphite Compounds as Bipolar Plate Materials for Low and High Temperature PEM Fuel Cells*. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems* 11, page 21-29, 2008

Lampiran 1

Hasil Pengujian Porositas

Spesimen Uji	<i>Dry Weight (D)</i> [gr]	<i>Suspended Weight (S)</i> [gr]	<i>Saturated Weight (Sw)</i> [gr]	Porositas [%]	Porositas Rata-Rata [%]
Pelat Bipolar 1 (1.00gr (0.87%wt) Aluminium Powder)					
1	2.47	1.09	2.48	0.72	0.73
2	2.53	1.12	2.54	0.71	
3	2.38	1.05	2.39	0.75	
Pelat Bipolar 2 (1.25gr (1.09%wt) Aluminium Powder)					
1	2.12	0.99	2.13	0.88	0.84
2	2.08	0.92	2.09	0.86	
3	2.30	1.01	2.31	0.78	
Pelat Bipolar 3 (1.5gr (1.30%wt) Aluminium Powder)					
1	2.67	1.19	2.69	1.35	1.37
2	2.69	1.21	2.71	1.35	
3	2.71	1.28	2.73	1.40	
Pelat Bipolar 4 (1.75gr (1.52%wt) Aluminium Powder)					
1	2.38	1.06	2.40	1.52	1.47
2	2.36	1.04	2.38	1.52	
3	2.58	1.14	2.60	1.39	
Pelat Bipolar 5 (2.00gr (1.74%wt) Aluminium Powder)					
1	2.42	1.08	2.44	1.49	1.50
2	2.47	1.00	2.48	0.68	
3	2.44	1.15	2.47	2.33	

Contoh perhitungan data porositas sampel pelat bipolar 3 (1.30%wt Aluminium Powder):

$$\% \text{ Porositas} = \frac{S_w - D}{D - S} \times 100\% = \frac{2.69 - 2.67}{2.67 - 1.19} \times 100\% = 1.35\%$$



Lampiran 2

Hasil Pengujian Densitas

Spesimen Uji	Massa di Udara (A) [gr]	Massa dalam Air (B) [gr]	A-B [gr]	ρ Air [gr/cm ³] T = 28 ⁰ C	ρ Sampel [gr/cm ³]	ρ Sampel Rata-Rata [gr/cm ³]
Pelat Bipolar 1 (1.00gr (0.87%wt) Aluminium Powder)						
1	2.95	1.25	1.7	0,996232	1.729	1.695
2	2.66	1.1	1.56	0,996232	1.699	
3	2.22	0.95	1,27	0,996232	1.741	
4	2.58	1.08	1.5	0,996232	1.714	
5	2.85	1.02	1.83	0,996232	1.552	
6	2.39	1.02	1.37	0,996232	1.738	
Pelat Bipolar 2 (1.25gr (1.09%wt) Aluminium Powder)						
1	1.93	0.8	1.13	0,996232	1,702	1.695
2	269	1.1	1.59	0,996232	1,685	
3	1.69	0.7	0.99	0,996232	1,701	
4	1.78	0.69	1.09	0,996232	1,627	
5	2.3	0.97	1.33	0,996232	1,723	
6	2.38	1.01	1.37	0,996232	1,731	
Pelat Bipolar 3 (1.5gr (1.30%wt) Aluminium Powder)						
1	3.07	1.28	1.79	0,996232	1.709	1.697
2	3.01	1.24	1.77	0,996232	1.694	
3	3.1	1.28	1.82	0,996232	1.697	
4	2.95	1.22	1.73	0,996232	1.699	
5	2.93	1.21	1.72	0,996232	1.697	
6	3.12	1.28	1.84	0,996232	1.689	

Pelat Bipolar 4 (1.75gr (1.52%wt) Aluminium Powder)						
1	2.26	0.94	1.32	0,996232	1.706	1.702
2	2.69	1.07	1.62	0,996232	1.654	
3	2.58	1.05	1.53	0,996232	1.680	
4	2.00	0.88	1.12	0,996232	1.779	
5	2.38	0.99	1.39	0,996232	1.706	
6	2.20	0.90	1.3	0,996232	1.686	
Pelat Bipolar 5 (2.00gr (1.74%wt) Aluminium Powder)						
1	2.26	0.95	1.31	0,996232	1.719	1.706
2	2.30	1.01	1.29	0,996232	1.776	
3	2.44	0.94	1.5	0,996232	1.621	
4	2.47	1.03	1.44	0,996232	1.709	
5	2.29	0.94	1.35	0,996232	1.690	
6	2.44	1.03	1.41	0,996232	1.724	

Contoh perhitungan data densitas sampel pelat bipolar 3 (1.30%wt Aluminium Powder):

$$\rho \text{ sampel} = \frac{A}{A-B} \times \rho \text{ air} = \frac{3.07}{3.07-1.28} \times 0.996232 = 1.709 \text{ gr/cm}^3$$

Lampiran 3

Hasil Pengujian Fleksural

Spesimen Uji	Tebal (D) [mm]	Lebar (B) [mm]	Panjang (L) [mm]	Beban (P) [N]	Kekuatan Fleksural [MPa]	Kekuatan Fleksural Rata-Rata [MPa]
Pelat Bipolar 1 (1.00gr (0.87%wt) Aluminium Powder)						
1	3	13.5	120	24	35.56	42.46
2	3	13.0	120	32	49.23	
3	3	13.0	120	32	49.23	
4	3	13.4	120	24	35.82	
Pelat Bipolar 2 (1.25gr (1.09%wt) Aluminium Powder)						
1	3	14.5	120	27.2	37.52	49.32
2	3	15.0	120	32	42.67	
3	2	14.8	120	24	72.97	
4	1,5	14.5	120	8	44.14	
Pelat Bipolar 3 (1.5gr (1.30%wt) Aluminium Powder)						
1	3.5	14.0	120	32	33.59	36.46
2	3.5	13.9	120	33.6	35.52	
3	4	13.8	120	40	32.61	
4	3	14.5	120	32	44.14	
Pelat Bipolar 4 (1.75gr (1.52%wt) Aluminium Powder)						
1	3.7	14.2	120	43.2	40.00	52.88
2	3.6	13.8	120	44.8	45.09	
3	3.5	14.1	120	64	66.70	
4	3.4	14.6	120	56	59.72	

Pelat Bipolar 5 (2.00gr (1.74%wt) Aluminium Powder)						
1	3.6	14.3	120	48	46.62	57.32
2	3.4	14.0	120	46.4	51.61	
3	3.4	14.2	120	64	70.18	
4	3.5	13.9	120	57.6	60.89	

Contoh perhitungan data fleksural sampel pelat bipolar 3 (1.30%wt Aluminium Powder):

$$\sigma_f = \frac{3 PL}{2 BD^2} = \frac{3 \times 32 \times 120}{2 \times 14 \times 3,5^2} = \mathbf{33.59 MPa}$$

Lampiran 4

Hasil Pengujian Konduktivitas

Sampel	Pengujian Resistensi [Ω .cm]	Konduktivitas [S/cm]	Konduktivitas Rata-Rata [S/cm]
Pelat Bipolar 1 (1.00gr (0.87%wt) Aluminium Powder)			
1	4.74	0.21*	0.28
2	2.67	0.37*	
3	3.73	0.27*	
4	4.93	0.20	
5	6.95	0.14	
6	5.94	0.17	
Pelat Bipolar 2 (1.25gr (1.09%wt) Aluminium Powder)			
1	3.67	0.27*	0.36
2	2.81	0.36*	
3	2.2	0.45*	
4	1016	9.8×10^{-4}	
5	6.94	0.144	
Pelat Bipolar 3 (1.5gr (1.30%wt) Aluminium Powder)			
1	2.098	0.48*	0.23
2	5.13	0.19*	
3	231.25	4.3×10^{-3} *	
4	0.0869	11.50	
5	0.0837	11.93	
6	1530	6.5×10^{-4}	

Pelat Bipolar 4 (1.75gr (1.52%wt) Aluminium Powder)			
1	0.731	1.37*	0.53
2	4.796	0.20*	
3	40.07	0.025*	
4	0.12	8.01	
5	1500.67	6.6×10^{-4}	
6	1471	6.7×10^{-4}	
Pelat Bipolar 5 (2.00gr (1.74%wt) Aluminium Powder)			
1	5.39	0.185*	0.18
2	7.12	0.14*	
3	4.58	0.218*	
4	1083	9.2×10^{-4}	
5	0.13	7.18	
6	55.03	0.018	

Ket : * (Data yang dipakai berdasarkan deviasi minimum)


Contoh perhitungan data konduktivitas sampel pelat bipolar 3 (1.30%wt Aluminium Powder):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = 1/2.098 = 0.48 \text{ S/cm}$$

Lampiran 5

Spesifikasi Resin Epoksi

EP


Technical Information

Bakelite® EPR 174

Unmodified, liquid standard epoxy resin based on Bisphenol-A

Characteristics


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

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

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

Shelf Life
In sealed containers at room temperature at least one year. Bakelite® 0164/LV can likewise 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)	: 310
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. Duster Kencana
INDONESIA

Lampiran 7

Spesifikasi Grafit EAF

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

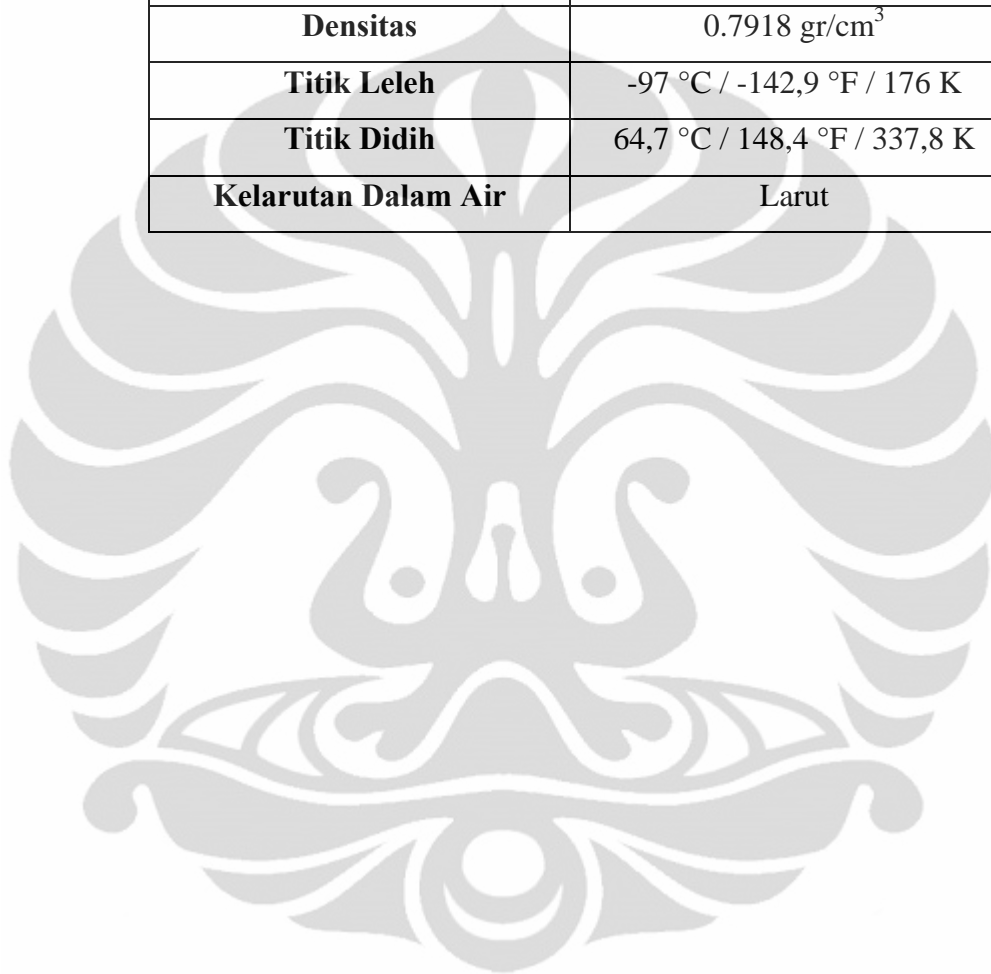
COMPLETE WITH ACCESSORIES :

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

MANUFACTURE :
 GENSUPP ELECTRODE-ARC-D406MMX1800MM-20-46KA

Lampiran 8
Spesifikasi Metanol

Formula	CH ₃ OH
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



Lampiran 9

Tabel Densitas Air (simetric.co.uk)



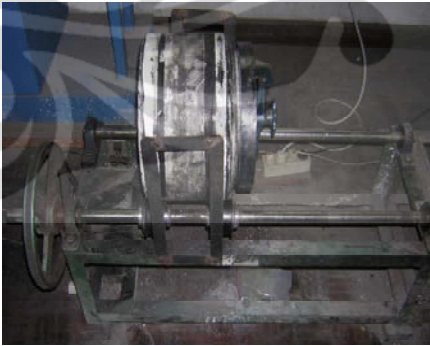
Densitas air (g/cm^3) di berbagai temperatur mulai dari 0° (*liquid state*) sampai 30.9°C dengan peningkatan 0.1°C





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

28	0.996232	0.996204	0.996175	0.996147	0.996118	0.996089	0.996060	0.996031	0.996002	0.995973
29	0.995944	0.995914	0.995885	0.995855	0.995826	0.995796	0.995766	0.995736	0.995706	0.995676
30	0.995646	0.995616	0.995586	0.995555	0.995525	0.995494	0.995464	0.995433	0.995402	0.995371
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9



Lampiran 10**Peralatan yang Digunakan Pada Penelitian**

Nama Alat	Foto Alat
Beaker glass	
Planetary Ball Mill	
Ball Mill (Alumina)	

Mesin Pengguncang	
Timbangan Digital	
<i>Mixer</i>	
<i>Hot Plate Magnetic Stirring</i>	

<p>Cetakan <i>Stainless Steel</i></p>	
<p>Mesin <i>Hot Press</i></p>	