



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI KOMPOSIT PELAT
BIPOLAR PEMFC DENGAN PENAMBAHAN 0 - 0,87 %wt
*ALUMINUM POWDER***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

OKY SIMBOLON

0706268796

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 : Oky Simbolon

NPM : 0706268796

Tanda Tangan : 

Tanggal : 07 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

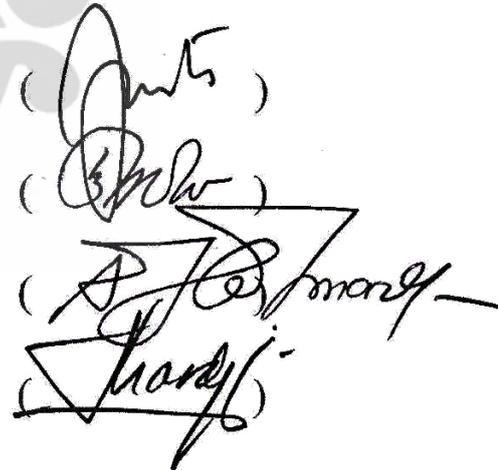
Skripsi ini diajukan oleh,

Nama : Oky Simbolon
NPM : 0706268796
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : **PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI
KOMPOSIT PELAT BIPOLAR PEMFC
DENGAN PENAMBAHAN 0 - 0,87 %wt
ALUMINUM POWDER**

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. Sri Harjanto
Penguji 2 : Dr. Ir. Akhmad Herman Y. M. Phil. Eng



(Signature 1)
(Signature 2)
(Signature 3)
(Signature 4)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 07 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa. Atas berkat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan tepat waktu. Penulisan skripsi yang berjudul “Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Pelat Bipolar PEMFC dengan Penambahan 0 - 0,87 %wt *Aluminum Powder*” dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Teknik dari Departemen Metalurgi dan Material pada 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 besar penulis, yaitu papa, mama, dan kakak-kakak yang telah membantu secara moril dan materil.
4. Staf akademik Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
5. Staf non-akademik Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
6. Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, yang telah menyediakan waktu sebagai operator pengujian, tempat, serta arahan selama penelitian yang dilakukan oleh penulis
7. Mahasiswa Metalurgi dan Material Universitas Indonesia angkatan 2007.
8. Pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

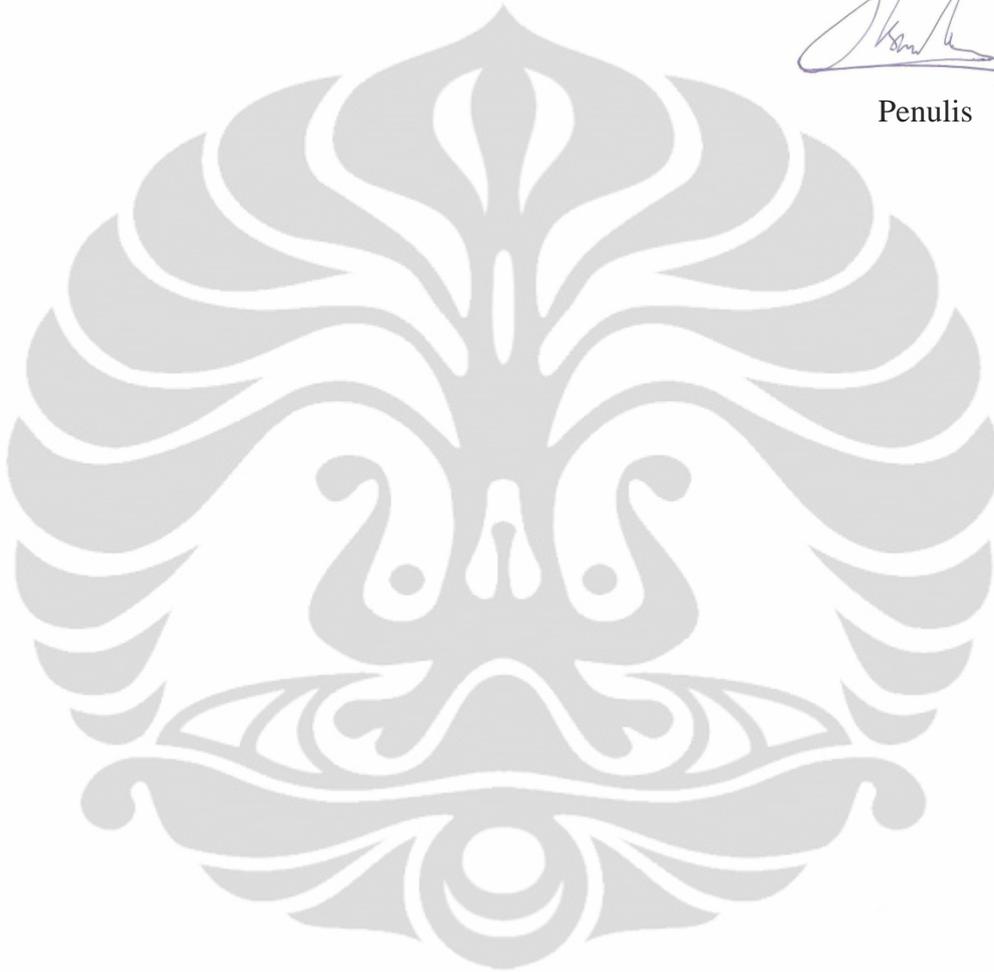
Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini terdapat banyak kekurangan dan kesalahan dikarenakan keterbatasan ilmu yang dimiliki penulis.

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, 07 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 : Oky Simbolon
NPM : 0706268796
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 :

Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Pelat Bipolar PEMFC dengan
Penambahan 0 - 0,87 %wt *Aluminum Powder*

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 : 07 Juni 2011

Yang menyatakan,



(Oky Simbolon)

ABSTRAK

Nama : Oky Simbolon
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Pelat Bipolar PEMFC dengan Penambahan 0 - 0,87 % wt *Aluminium Powder*

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) merupakan sumber energi alternatif yang menjanjikan dengan menggunakan H₂ dan O₂ sebagai bahan bakarnya. Pelat bipolar merupakan komponen PEMFC yang berkontribusi terhadap 80% volum, 70% berat, dan 60% biaya produksi. Pelat bipolar komposit merupakan solusi untuk mengurangi biaya fabrikasi PEMFC. Pada penelitian ini, pelat bipolar terbuat dari 80 %wt grafit EAF dan carbon black sebagai *filler* serta 20%wt resin epoksi sebagai *binder*. Variasi penambahan *aluminium powder* sebesar 0 % wt, 0,22 % wt, 0,43 % wt, 0,65 % wt, 0,87 % wt sebagai aditif untuk meningkatkan konduktivitas listrik. Pembuatan pelat bipolar dilakukan dengan metode *compression moulding* pada temperatur 100 °C yang menggunakan tekanan 55 MPa selama 4 jam. Hasil penelitian menunjukkan pelat bipolar dengan penambahan 0,65 %wt *aluminium powder* memiliki performa terbaik dengan nilai densitas sebesar 1,75 gr/cm³, kekuatan fleksural sebesar 38,66 MPa, nilai konduktivitas listrik sebesar 0,65 S/cm, serta porositas sebesar 0,65%.

Kata kunci:

PEMFC, *aluminium powder*, grafit, *carbon black*, epoksi, pelat bipolar, komposit, konduktivitas listrik, kekuatan fleksural, , *compression moulding*

ABSTRACT

Name : Oky Simbolon
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Judul : Preparation and Characterization of Composite Bipolar Plate PEMFC with the Addition of 0 - 0,87 wt% Aluminum Powder

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) is promising alternative energy source fueled with H₂ and O₂. Bipolar plates contribute to 80% of PEMFC volume, 70% of total weight, and 60% of total cost. Composite bipolar plates are used to reduce PEMFC production cost. In this research, the composite plates made of 80 wt% EAF graphite and carbon black as filler and 20 wt% epoxy resin as binder. Variation of 0 wt%, 0,22 wt%, 0,43 wt%, 0,65 wt%, 0,87 wt% aluminum powders were added in order to improve its electrical conductivity. Manufacture of bipolar plates is done by compression moulding method at a temperature of 100⁰C with 55MPa of pressure for 4 hours. The result showed that bipolar plate which added with 0.65 wt% aluminum powders gave the best performance with density values of 1.75 gr/cm³, flexural strength of 38.66 MPa, the value of electrical conductivity was 0.65 S/cm, and the porosity of 0.65%.

Keywords:

PEMFC, aluminum powders, graphite, carbon black, epoxy, bipolar plate, composite, electrical conductivity, flexural strength, compression molding.

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.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2. DASAR TEORI	7
2.1 <i>Fuel Cell</i>	7
2.1.1 Jenis-jenis <i>Fuel Cell</i>	8
2.2 <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)</i>	10
2.2.1 Prinsip Dasar PEMFC.....	12
2.2.2 Struktur PEMFC	13
2.3 Pelat Bipolar	14
2.3.1 Klasifikasi Pelat Bipolar	15
2.4 Material Komposit	18
2.5 Pelat Bipolar Komposit.....	22
2.6 Material Penyusun Pelat Bipolar dengan Komposit Berbasis Polimer Termoset	22
2.6.1 Resin Epoksi	23
2.6.2 Grafit EAF	24

2.6.3 Carbon Black	27
2.6.4 Aluminium Powder.....	29
2.6.5 Metanol	30
BAB 3. METODOLOGI	31
3.1 Diagram Alir Penelitian	31
3.1.1 Diagram Alir Pembuatan Sampel Pelat Bipolar	31
3.1.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel	32
3.2 Alat dan Bahan.....	32
3.2.1 Alat	32
3.2.2 Bahan	33
3.3 Proses Pembuatan Pelat Bipolar.....	36
3.3.1 Penimbangan.....	36
3.3.2 Pencampuran Bahan.....	36
3.3.3 Pencetakan	38
3.3.4 Pembuatan Spesimen Uji	38
3.4 Karakterisasi Pelat Bipolar.....	39
3.4.1 Pengujian Densitas.....	39
3.4.2 Pengujian Porositas	41
3.4.3 Pengujian Konduktivitas	42
3.4.4 Pengujian Fleksural.....	44
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1 Pengamatan Visual Pelat Bipolar Hasil Pencetakan	46
4.2 Karakterisasi Pelat Bipolar Komposit.....	47
4.2.1 Hasil Pengujian Densitas	48
4.2.2 Hasil Pengujian Porositas	59
4.2.3 Hasil Pengujian Konduktivitas	53
4.2.4 Hasil Pengujian Fleksural	54
4.3 Perbandingan Karakteristik Komposit Pelat Bipolar dengan Variasi Penambahan <i>Aluminium Powder</i>	56
BAB 5. KESIMPULAN	58
DAFTAR REFERENSI	59



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	<i>Electronic Arc Furnace</i>	3
Gambar 2.1	Cara Kerja <i>Fuel Cell</i> Secara Umum.....	8
Gambar 2.2	Ilustrasi Cara Kerja Jenis-Jenid <i>Fuel Cell</i>	10
Gambar 2.3	Prinsip Kerja PEMFC	12
Gambar 2.4	Struktur Rangkaian PEMFC	13
Gambar 2.5	Pelat Bipolar.....	15
Gambar 2.6	Klasifikasi Pelat Bipolar Berdasarkan Material Penyusunnya.....	16
Gambar 2.7	Parameter dari Bahan Pengisi pada Komposit: a) Distribusi; b) Konsentrasi; c) Orientasi; d) Bentuk; e) Ukuran.....	21
Gambar 2.8	Fenomena Antarmuka dan Antarfasa pada Komposit	22
Gambar 2.9	Reaksi Pembentukan Epoksi.....	23
Gambar 2.10	Reaksi antara Resin Epoksi dan <i>Hardener</i>	24
Gambar 2.11	Pengaruh Penambahan Grafit terhadap Konduktivitas Listrik.....	25
Gambar 2.12	Struktur Kristal Grafit	27
Gambar 2.13	Struktur <i>Carbon Black</i>	28
Gambar 2.14	Skema <i>Carbon Black</i> pada Sistem Komposit	29
Gambar 2.15	Pengamatan <i>Aluminium Powder</i> Melalui Mikroskop Elektron	30
Gambar 2.16	Struktur Metanol	30
Gambar 3.1	Diagram Alir Pembuatan Sampel Pelat Bipolar.....	31
Gambar 3.1	Diagram Alur Karakterisasi	32
Gambar 3.3	Ilustrasi Pembuatan <i>Carbon Black</i>	34
Gambar 3.4	<i>Aluminium Powder</i>	35
Gambar 3.5	<i>Planetary Ball Mill</i>	37
Gambar 3.6	Hasil Proses Pencampuran Bahan-Bahan	37
Gambar 3.7	Mesin <i>Hot Press</i>	38

Gambar 3.8	Sampel Uji Karakteristik Pelat Bipolar.....	39
Gambar 3.9	Penimbangan Sampel di Air.....	40
Gambar 3.10	Sampel Dipanaskan dalam Air pada Temperatur 100°C.....	41
Gambar 3.11	Skema Uji Konduktivitas	42
Gambar 3.12	Mesin Veeco FPP 500- <i>Four Point Probe</i>	43
Gambar 3.13	Skema Pengujian Fleksural.....	44
Gambar 3.14	Pengujian Fleksural.....	45
Gambar 4.1	Pelat Bipolar yang Dihasilkan pada Variasi <i>Aluminium Powder</i> : a.) 0 %wt, b.) 0,25 %wt, c.) 0,50 %wt, d) 0,75 %wt dan e.) 1 %wt	46
Gambar 4.2	Pengaruh Penambahan <i>Aluminium Powder</i> Terhadap Densitas	51
Gambar 4.3	Pengaruh Penambahan <i>Aluminium Powder</i> Terhadap Porositas	49
Gambar 4.4	SEM Komposit Pelat Bipolar : a) komposit tanpa <i>aluminium powder</i> , b) komposit dengan 2 wt% <i>aluminium powder</i>	51
Gambar 4.5	Pengaruh Penambahan <i>Aluminium Powder</i> Terhadap Konduktivitas	53
Gambar 4.6	Pengaruh Penambahan <i>Aluminium Powder</i> Terhadap Kekuatan Fleksural.....	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik dari Berbagai Jenis <i>Fuel Cell</i>	9
Tabel 2.2	Komponen-komponen Utama PEMFC	14
Tabel 2.3	Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Beberapa Material Sebagai Pelat Bipolar	17
Tabel 2.4	Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel Grafit	26
Tabel 3.1	Komposisi Pelat Bipolar dan Variasi Jumlah <i>Aluminium Powder</i> ..	36
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Densitas.....	47
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Porositas.....	49
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik.....	53
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Fleksural	55
Tabel 4.5	Perbandingan Karakteristik Pelat dengan Variasi Penambahan <i>Aluminium Powder</i>	56

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Pengujian Densitas	68
Lampiran 2. Hasil Pengujian Porositas	70
Lampiran 3. Hasil Pengujian Konduktivitas	72
Lampiran 4. Hasil Pengujian Fleksural	74
Lampiran 5. Spesifikasi Resin Epoksi	76
Lampiran 6. Spesifikasi Epoksi <i>Hardener</i>	77
Lampiran 7. Spesifikasi Grafit EAF	78
Lampiran 8. Spesifikasi <i>Aluminium Powder</i>	77
Lampiran 8. Spesifikasi Metanol	79
Lampiran 9. Peralatan yang Digunakan Pada Penelitian	80

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan dunia akan energi tidak pernah menurun seiring dengan bertambahnya populasi penduduk dunia. Kebutuhan energi tersebut sebagian besar dipenuhi dengan memanfaatkan sumber energi dari bahan bakar fosil. Namun tidak mungkin selamanya bahan bakar fosil menjadi sumber energi utama yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi, karena bahan bakar fosil tergolong sumber energi yang tidak dapat terbarukan. Selain keberadaannya yang terbatas, bahan bakar fosil juga menyebabkan permasalahan lingkungan karena menghasilkan karbon monoksida (CO) dan karbondioksida (CO₂) dari sisa pembakaran. Oleh karena itu, belakangan ini pengembangan energi alternatif yang dapat diperbarui, ramah lingkungan, dan murah terus dikembangkan. Salah satu energi alternatif yang berkembang belakangan ini adalah *fuell cell*.

Fuel cell atau sel tunam merupakan salah satu teknologi penghasil energi listrik yang paling bersih dan sangat efisien (dapat mencapai 80%). Prinsip kerja *fuel cell* adalah kebalikan dari elektrolisis. Elektrolisis memisahkan H₂O menjadi H₂ dan O₂. *Fuel cell* bekerja dengan gas hidrogen (H₂) sebagai sumber energi dikombinasikan dengan oksigen (O₂), secara elektrokimia menghasilkan energi listrik sebagai hasil utama, dengan air (H₂O) dan panas sebagai hasil sampingan.

Penggolongan *fuel cell* berdasarkan elektrolit yang digunakan dan kondisi (suhu dan tekanan) dapat dibedakan menjadi 6 jenis, yaitu : *Alkaline Fuel Cell* (AFC), *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC), *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC), *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC), *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), dan *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC)^[1]. Penggunaan dari masing-masing jenis *fuell cell* tersebut berbeda-beda karena jenis elektrolit yang digunakan dan kemampuan menghantarkan listrik yang berbeda.

Jenis *fuel cell* yang lebih banyak dikembangkan saat ini adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) atau dikenal juga dengan sebutan *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*. Sifat-sifat PEMFC yaitu efisiensi yang

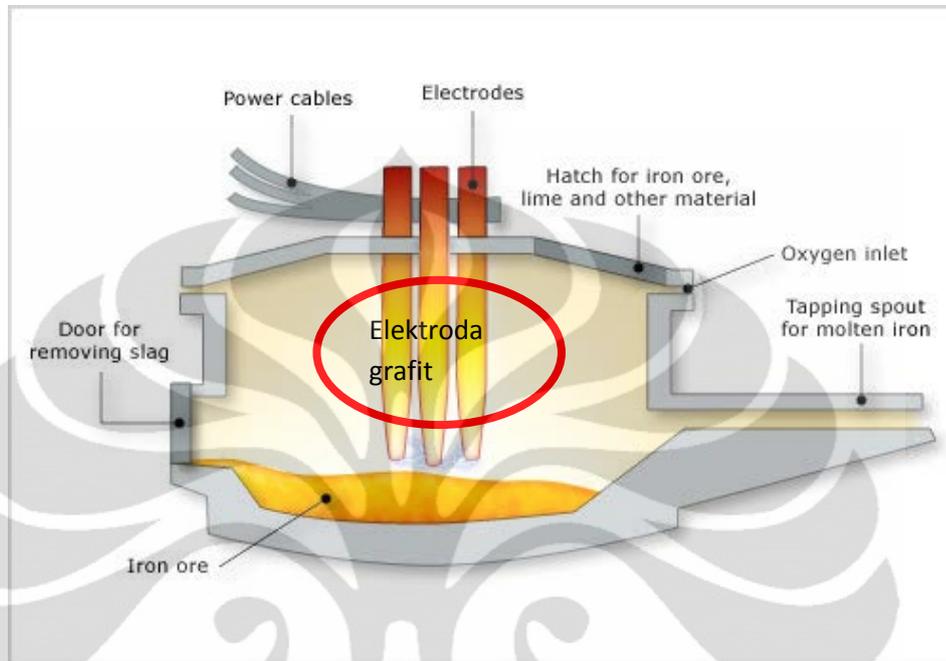
tinggi, kerapatan arus yang tinggi, temperatur aplikasi yang relatif rendah, *zero emission*, tidak ada masalah korosi, ramah lingkungan, tidak bising, tidak mengeluarkan gas beracun, dapat beroperasi pada suhu rendah, menggunakan bahan bakar sumber hidrogen secara langsung, memiliki densitas yang rendah dan masa pakai mencapai 11.000 jam, temperatur aplikasi yang relatif rendah $\pm 80^{\circ}\text{C}$ dikarenakan sel tunam harus beroperasi pada kondisi dimana air (H_2O) yang terbentuk sebagai hasil sampingan dalam proses elektrokimia tidak boleh menguap lebih cepat dibandingkan pembentukannya bertujuan untuk menjaga agar membran terhidrasi ^[2]. Pengembangan PEMFC saat ini terhambat oleh biaya produksinya yang masih cukup tinggi sehingga dibutuhkan pengkajian lebih lanjut untuk mereduksi biaya produksi.

PEMFC memiliki empat komponen penting antara lain: pelat bipolar, pelat penutup, *Membrane Electrolyte Assembly* (MEA) dan penyimpanan arus. Diantara keempat komponen tersebut pelat bipolar berkontribusi sebesar 80% volume, 70% berat dan 60% biaya produksi *fuell cell*. Oleh karena itu, kebanyakan penelitian memfokuskan pada komponen pelat bipolar agar produksi PEMFC menjadi ekonomis dan dapat dipasarkan secara luas. Selain itu, diperlukan pula suatu proses produksi massal yang tidak mahal dan efisien. Salah satu cara untuk mereduksi biaya produksi pelat bipolar dari PEMFC adalah dengan mengembangkan material komposit berbasis polimer termoset yang diharapkan mampu mengurangi volume, berat, dan biaya produksi, mengingat sifat polimer yang memiliki densitas yang rendah dan harga yang relatif murah.

Penelitian ini ditujukan untuk mencari komposisi penambahan *aluminium powder* yang tepat sebagai aditif pada pelat bipolar PEMFC. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah pembuatan komposit PEMFC dengan biaya produksi rendah dan memiliki konduktivitas yang tinggi, ringan, serta sifat mekanik dan optimalisasi performa yang baik sehingga mudah pembuatan dan pengembangannya untuk berbagai aplikasi.

Pada penelitian ini akan dipelajari karakteristik dari pelat bipolar yang dibuat dari limbah grafit *Electric Arc Furnace* (EAF). Ditengah maraknya isu mengenai pencemaran lingkungan dan guna memanfaatkan limbah sisa proses produksi, maka penggunaan grafit ini sangatlah tepat. Pemanfaatan limbah dari

pabrik baja ini diharapkan dapat menjadi material substitusi dari grafit sintetis sehingga dapat mereduksi biaya produksi dan turut berpartisipasi dalam penanggulangan limbah di Indonesia. Gambar 1.1 merupakan ilustrasi EAF.



Gambar 1.1 *Electric Arc Furnace*^[3]

Sumber : <http://www.teara.govt.nz/en/iron-and-steel/2/4>, telah diolah kembali

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini sangatlah penting untuk mengetahui karakteristik dan sifat dari material penyusun pelat bipolar PEMFC yang terbuat dari komposit berbasis polimer termoset. Komposit jenis ini dipilih karena material pelat bipolar yang lebih ringan dan ekonomis merupakan upaya yang dapat dilakukan untuk mereduksi biaya produksi dari pelat bipolar. Bahan yang digunakan yaitu grafit limbah EAF dengan penambahan *carbon black* sebagai *reinforced*. Resin epoksi yang memiliki sifat mekanik dan termal yang baik serta mudah diproses merupakan jenis polimer termoset yang digunakan sebagai *matrix*. Dari hasil penelitian sebelumnya bahan-bahan yang digunakan belum memenuhi target konduktivitas yang diinginkan yaitu 100 S/cm sesuai dengan DOE. Oleh karena itu, pada penelitian ini ditambahkan bahan aditif yang berfungsi untuk meningkatkan konduktivitas pelat bipolar yaitu *aluminium powder*. Selain

konduktivitas yang tinggi sifat-sifat lain seperti densitas, porositas, dan kekuatan fleksural juga diperhatikan agar sesuai dengan standar DOE.

Pengujian dilakukan untuk mengetahui sifat pelat bipolar dalam penggunaannya. Melalui penambahan grafit EAF dan *carbon black* sebagai *reinforced*, resin epoksi sebagai *matrix* serta *aluminium powder* sebagai aditif diharapkan mampu meningkatkan konduktivitas dan sifat mekanik dari pelat bipolar berbasis karbon. Selain bahan-bahan yang digunakan hal lain yang harus diperhatikan adalah teknik pembuatan, mulai dari *mixing* hingga pencetakan, karena berpengaruh terhadap sifat-sifat pelat bipolar yang dihasilkan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian secara khusus, antara lain:

1. Mengetahui pengaruh penambahan *aluminium powder* terhadap karakteristik pelat bipolar.
2. Mengetahui kuantitas penambahan *aluminium powder* yang optimum pada pelat bipolar.
3. Membandingkan karakterisasi pelat bipolar yang diteliti dengan penelitian sebelumnya.
4. Mengembangkan material komposit untuk pelat bipolar PEMFC yang memiliki karakteristik yang optimum, dapat diproduksi secara massal, dan nilai ekonomis yang tinggi.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Pada penelitian ini, akan diformulasikan karakteristik pelat bipolar yang memenuhi tuntutan aplikasi dengan berat yang lebih ringan tanpa mengurangi performa yang diinginkan yaitu dengan menggunakan resin epoksi sebagai matriks yang diperkuat oleh grafit EAF dan *carbon black* dengan menambahkan *aluminium powder* sebagai aditif.

Perbandingan komposisi bahan penyusun yang digunakan dalam pembuatan pelat bipolar komposit, antara lain:

1. Polimer termoset (epoksi resin) yang digunakan sebesar 20% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit, dengan perbandingan resin epoksi:*hardener*, yaitu 1:1.
2. Grafit EAF, *carbon black*, dan *aluminium powder* yang digunakan sebesar 80% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit, dengan perbandingan komposisi grafit EAF: *carbon black* dan *aluminium powder*, yaitu 19:1 (95%:5%), dengan variasi penambahan *aluminium powder* sebanyak 0 %wt, 0,22 %wt, 0,43 %wt, 0,65 %wt, 0,87 %wt (0; 0,25; 0,50; 0,75, dan 1 gram).
3. Penelitian ini memberikan variasi pada konsentrasi *aluminium powder*, *carbon black*, dan grafit dengan besar partikel $\leq 44 \mu\text{m}$.
4. Total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit adalah 144 gram.

Dengan komposisi tersebut, hasil dari penelitian ini diharapkan dapat mengetahui pengaruh penambahan aditif berupa *aluminium powder* yang paling optimum.

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*

Fuel cell merupakan sebuah perangkat yang dapat mengkonversi energi kimia dari bahan bakar secara langsung menjadi energi listrik^[5]. Selain menghasilkan energi listrik sebagai hasil utamanya, sel ini juga menghasilkan air (H₂O) dan panas di alam prosesnya sebagai hasil sampingan. Oleh karena itu, *fuel cell* merupakan teknologi ramah lingkungan. Teknologi ini akan terus menghasilkan energi listrik selama bahan bakar tersedia dan tidak memerlukan *charging* seperti halnya baterai^[6]. Efisiensi proses yang dihasilkan juga lebih tinggi dibandingkan penghasil listrik konvensional, yang berarti dengan jumlah bahan bakar yang sama, energi listrik yang akan dihasilkan lebih banyak^[7]. Bahan bakar yang digunakan bagi *fuel cell* adalah oksigen dan hidrogen^[6].

Prinsip kerja pada *fuel cell* adalah gas hidrogen disuplai ke anoda (kutub negatif) dimana pada sisi lain yaitu pada katoda (kutub positif) terdapat gas oksigen. Hidrogen dipecah menjadi elektron dan proton (H⁺) melalui sebuah reaksi kimia. Reaksi yang terjadi adalah:

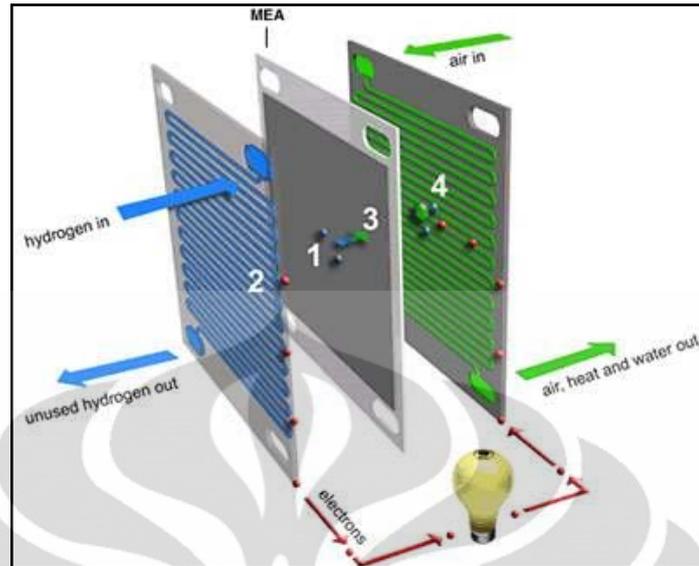


Proton ini akan bergerak menuju katoda melewati membran, sedangkan hidrogen yang terbentuk akan menghasilkan arus listrik kalau dihubungkan dengan penghantar listrik menuju katoda.

Oksigen pada katoda akan beraksi dengan empat elektron dan ion H⁺ hasil dari reaksi hidrogen pada anoda sehingga akan membentuk air seperti yang ditunjukkan reaksi berikut :



Dari persamaan reaksi elektrokimia di atas dapat terlihat bahwa *fuel cell* merupakan alat konversi energi yang ramah lingkungan karena emisi yang dihasilkan dari perangkat ini adalah uap air. Skema kerja dari sistem *input* dan *output* dari berbagai jenis *fuel cell* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Cara Kerja *Fuel Cell* Secara Umum^[8]

Sumber : http://thefuelcellbuyersguide.com/about_fuel_cells.php

2.1.1 Jenis-jenis *Fuel Cell*

Fuel cell sebagai dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis, berdasarkan kombinasi tipe bahan bakar dan oksidan, tipe elektrolit yang digunakan, temperatur operasi, dan lain-lain. *Fuel cell* berdasarkan jenis elektrolit penyusunnya dapat dibedakan menjadi:

1. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC)
2. *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC)
3. *Alkaline Fuel Cell* (AFC)
4. *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC)
5. *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC)
6. *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC)

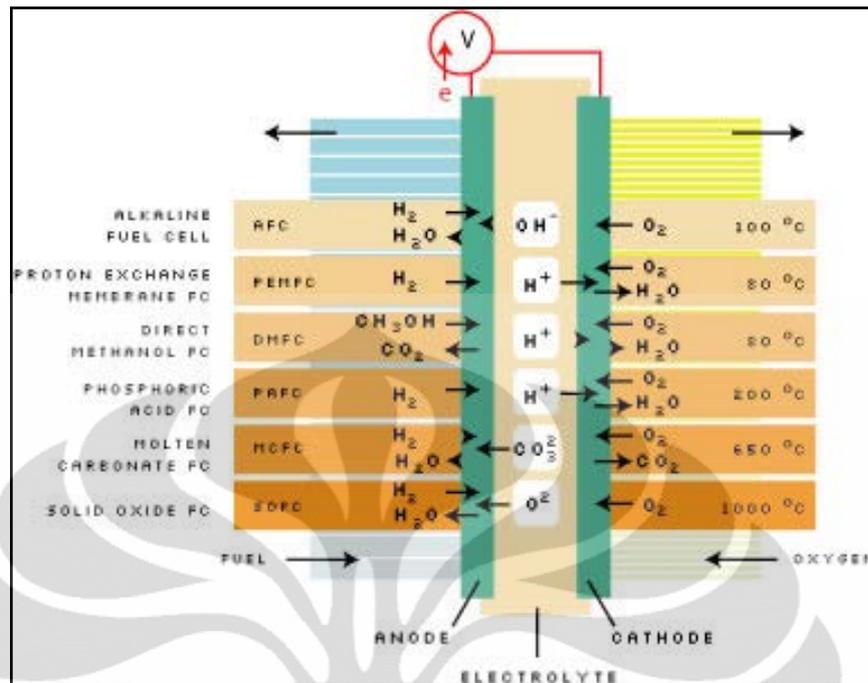
Perbandingan jenis-jenis *fuel cell* diatas dapat dilihat perbedaannya dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Karakteristik dari Berbagai Jenis *Fuel Cell* ^[7]

	PEMFC	DMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Primary applications	Automotive and stationary power	Portable power	Space vehicles and drinking water	Stationary power	Stationary power	Vehicle auxiliary power
Electrolyte	Polymer (plastic) membrane	Polymer (plastic) membrane	Concentrated (30–50%) KOH in H ₂ O	Concentrated 100% phosphoric acid	Molten Carbonate retained in a ceramic matrix of LiAlO ₂	Yttrium-stabilized Zirkondioxide
Operating temperature range	50–100°C	0–60°C	50–200°C	150–220°C	600–700°C	700–1000°C
Charge carrier	H ⁺	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ⁻	O ⁼
Prime cell components	Carbon-based	Carbon-based	Carbon-based	Graphite-based	Stainless steel	Ceramic
Catalyst	Platinum	Pt-Pt/Ru	Platinum	Platinum	Nickel	Perovskites
Primary fuel	H ₂	Methanol	H ₂	H ₂	H ₂ , CO, CH ₄	H ₂ , CO
Start-up time	Sec-min	Sec-min		Hours	Hours	Hours
Power density (kW/m ³)	3.8–6.5	–0.6	–1	0.8–1.9	1.5–2.6	0.1–1.5
Combined cycle fuel cell efficiency	50–60%	30–40% (no combined cycle)	50–60%	55%	55–65%	55–65%

Sumber : S, Basu, ed. *Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology*. Anamaya Publisher, New Delhi, India, 2007

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 2.2.



Gambar 2.2 Ilustrasi Cara Kerja Jenis-Jenis *Fuel Cell* [8]

Sumber : http://thefuelcellbuyersguide.com/images/fuelcell_diagram.jpg

Diantara enam jenis *fuel cell* yang ada, jenis PEMFC memiliki aplikasi yang cukup luas yaitu dapat diaplikasikan pada peralatan elektronik *portable*, *mobile* dan *residential generation*, mobil, kapal dan lain-lain. Hal ini disebabkan PEMFC memiliki jangkauan yang sangat luas untuk menghasilkan daya yaitu dari 1-100 kW. PEMFC dapat menjadi sumber energi listrik yang menjanjikan di masa depan untuk aplikasi stasioner dan transportasi^[10].

2.2 Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) atau dikenal juga dengan nama *Polymer Exchange Membrane Fuel Cell*. PEMFC merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang menggunakan *membrane electrolyte assembly* untuk memisahkan elektrodanya. Membran ini pertama kali ditemukan oleh seorang ilmuwan yang bernama William Grubbs pada tahun 1959^[10]. Grubbs menemukan bahwa tanpa adanya asam yang kuat pada membran ini maka membran tersebut akan mampu untuk memindahkan kation dan proton ke katoda^[10].

Keunggulan yang dimiliki oleh *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) secara umum adalah 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. Keunggulan yang dimiliki oleh PEMFC secara terperinci adalah sebagai berikut^[11]:

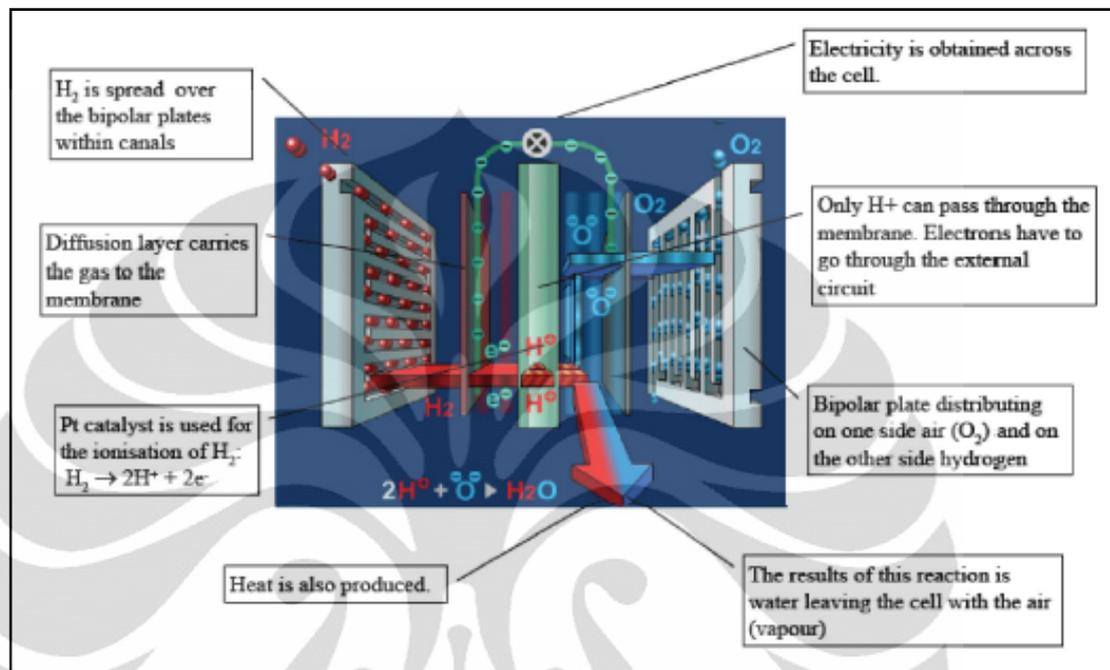
- a. PEMFC mempunyai elektrolit padat yang memberikan ketahanan yang sangat baik terhadap gas.
- b. Temperature operasi PEMFC yang rendah memungkinkan waktu *start up* yang cepat.
- c. PEMFC cocok digunakan terutama untuk situasi dimana hidrogen murni dapat digunakan sebagai bahan bakar.
- d. PEMFC mampu beroperasi pada kondisi tekanan hingga 20,68 MPa dan memiliki differensial tekanan hingga 3,45 MPa.
- e. *Stack* PEMFC mudah untuk disusun sehingga mudah untuk digunakan dalam berbagai aplikasi.
- f. Kapasitas daya listrik yang dihasilkan oleh PEMFC cukup bervariasi mulai dari 0,1 W – 100 kW.
- g. PEMFC dapat beroperasi pada rapat arus yang sangat tinggi dibandingkan dengan jenis *Fuel cell* yang lainnya.

Secara umum biaya fabrikasi yang cukup tinggi untuk memproduksi *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) masih memiliki kendala untuk dapat diproduksi secara massal sebagai alat konversi energi alternatif ini. Oleh karena itu, diperlukan suatu inovasi dan terobosan dalam mendesain suatu proses fabrikasi dan pemilihan material yang tepat melalui suatu penelitian secara komprehensif sehingga PEMFC ini dapat diproduksi dalam jumlah massal dengan harga cukup ekonomis. Sementara keterbatasan yang dimiliki oleh PEMFC adalah sebagai berikut^[11]:

- a. Temperatur operasi yang rendah dan rentang temperatur kerja yang sempit merupakan kendala tersendiri dalam membuat manajemen panas PEMFC.
- b. Pengolahan air (*water management*) merupakan salah satu tantangan tersendiri dalam mendesain PEMFC.
- c. PEMFC sangat sensitif terhadap kontaminasi oleh gas CO, sulfur dan amonia.

- d. Kualitas panas yang dihasilkan PEMFC rendah dan tidak dapat digunakan secara efektif di semua tempat.

2.2.1 Prinsip Dasar PEMFC



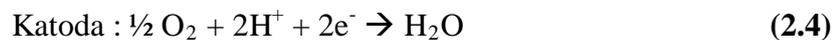
Gambar 2.3 Prinsip Kerja Proton Exchange Membrane Fuel Cell^[12]

Sumber : <http://majarimagazine.com/2007/10/fuel-cell-%E2%80%93-way-to-zero-pollution/>

Prinsip dasar *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) ini cukup sederhana, yaitu hidrogen dan oksigen akan bereaksi menghasilkan energi listrik dan pada saat yang bersamaan juga membentuk air (H_2O) dan panas sebagai hasil sampingan.

Proses bermula dengan masuknya gas hidrogen bertekanan 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^[4]. 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 wire* karena terhalang oleh membran menuju sisi katoda dari *fuel cell* dan dipergunakan untuk menghasilkan energi listrik^[13]. Gas oksigen akan dialirkan melalui katalis dan membentuk dua atom oksigen dimana masing-masing atom mempunyai satu

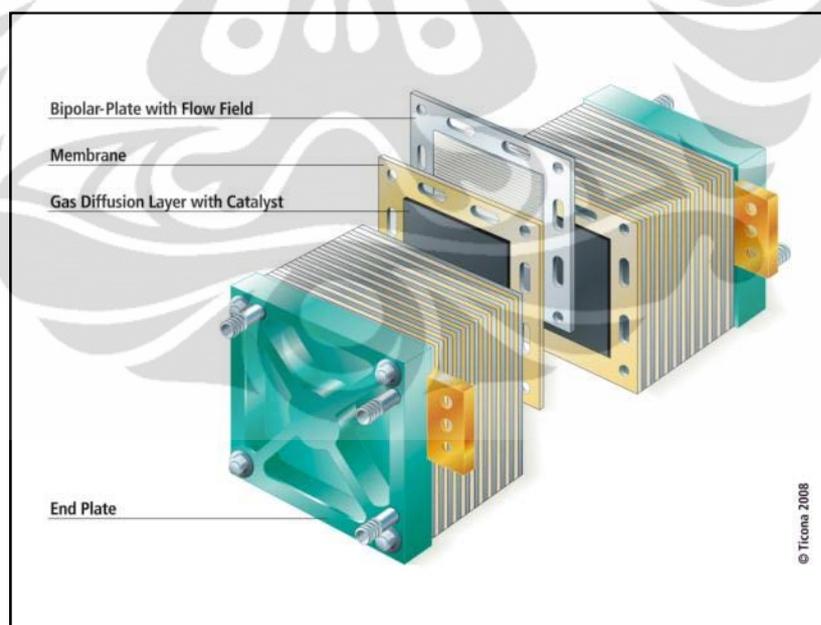
pasang elektron dan menarik dua proton H^+ melalui membran sehingga akan bereaksi menghasilkan molekul air (H_2O). Adapun reaksi yang terjadi pada PEMFC adalah sebagai berikut^[4]:



Reaksi yang terjadi dalam *Fuel cell* tunggal hanya menghasilkan 0,7 volts sehingga perlu dilakukan peningkatan dengan mengkombinasikan komponen-komponen serta dengan membentuk suatu tumpukan *fuel cell*^[4,14]. Mekanisme prinsip kerja PEMFC dapat dilihat pada Gambar 2.3.

2.2.2 Struktur PEMFC

Rangkaian PEMFC terdiri dari membrane electrolyte assembly (MEA) dengan lapisan katalis di kedua sisinya, lapisan difusi gas (GDL), pelat bipolar, penyimpan arus, dan pelat penutup. Secara skematis rangkaian dari suatu PEMFC diperlihatkan dalam Gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Struktur Rangkaian PEMFC^[15]

Sumber : <https://www.ticona-photos.com/PL/Forms/DispForm.aspx?ID=716>

Struktur PEMFC terdiri dari empat komponen utama seperti yang terdapat pada Tabel 2.2 berikut ini:

Tabel 2.2 Komponen-komponen Utama PEMFC^[16]

Komponen	Bahan Penyusun	Fungsi
Membrane Electrolyte Assembly (MEA)	Polimer solid terimpregnasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda. Kertas atau kain karbon berpori untuk <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	Terdiri dari 2 elektroda, 1 membran elektrolit, dan 2 GDL. Membran memisahkan 2 setengah-reaksi sel dan melepas proton dari anoda ke katoda. Lapisan katalis yang terdispersi pada elektroda memacu setiap setengah reaksi. GDL mendistribusikan gas secara merata ke katalis di membran, mengalirkan elektron dari area aktif menuju pelat bipolar dan membantu pengaturan air.
Pelat Bipolar	Grafit, SS, atau komposit	Mendistribusikan gas di bagian area aktif membran, mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda, membuang air keluar sel.
Pelat Penutup	Material dengan kekuatan mekanis yang baik (biasanya baja atau alumunium)	Menyatukan rangkaian <i>Fuel cell</i> .
Penyimpan Arus	Logam dengan kontak elektrik dan konduktivitas yang baik (biasanya tembaga)	Menyimpan dan mentransfer arus listrik dari dalam ke luar sirkuit.

2.3 Pelat Bipolar

Pelat bipolar seringkali dikenal pula dengan sebutan *flow field plate* atau pelat separator. Pelat bipolar memiliki dua fungsi utama, yaitu mengalirkan gas reaktan menuju *gas diffusion layer* melalui *flow channel* dan mengalirkan electron dari anoda menuju katoda^[18]. Pelat ini biasa dibuat dari grafit, logam (alumunium, stainlesssteel, titanium, dan nikel), atau dapat juga dibuat dari komposit^[16]. Saluran alir gas dicetak pada permukaan pelat sebagai tempat aliran gas-gas yang bereaksi. Seperti yang telah dijelaskan dalam bab pendahuluan, pelat bipolar konvensional berkontribusi terhadap 80% volume, 70% berat, dan 60% biaya dari *fuel cell*. Oleh karena itu, diperlukan pelat bipolar yang murah, tipis, dan ringan,

sehingga dapat mengurangi bobot, volume, dan biaya produksi *fuel cell*. Gambar 2.5 menunjukkan pelat bipolar yang terbuat dari komposit.



Gambar 2.5 Pelat Bipolar^[17]

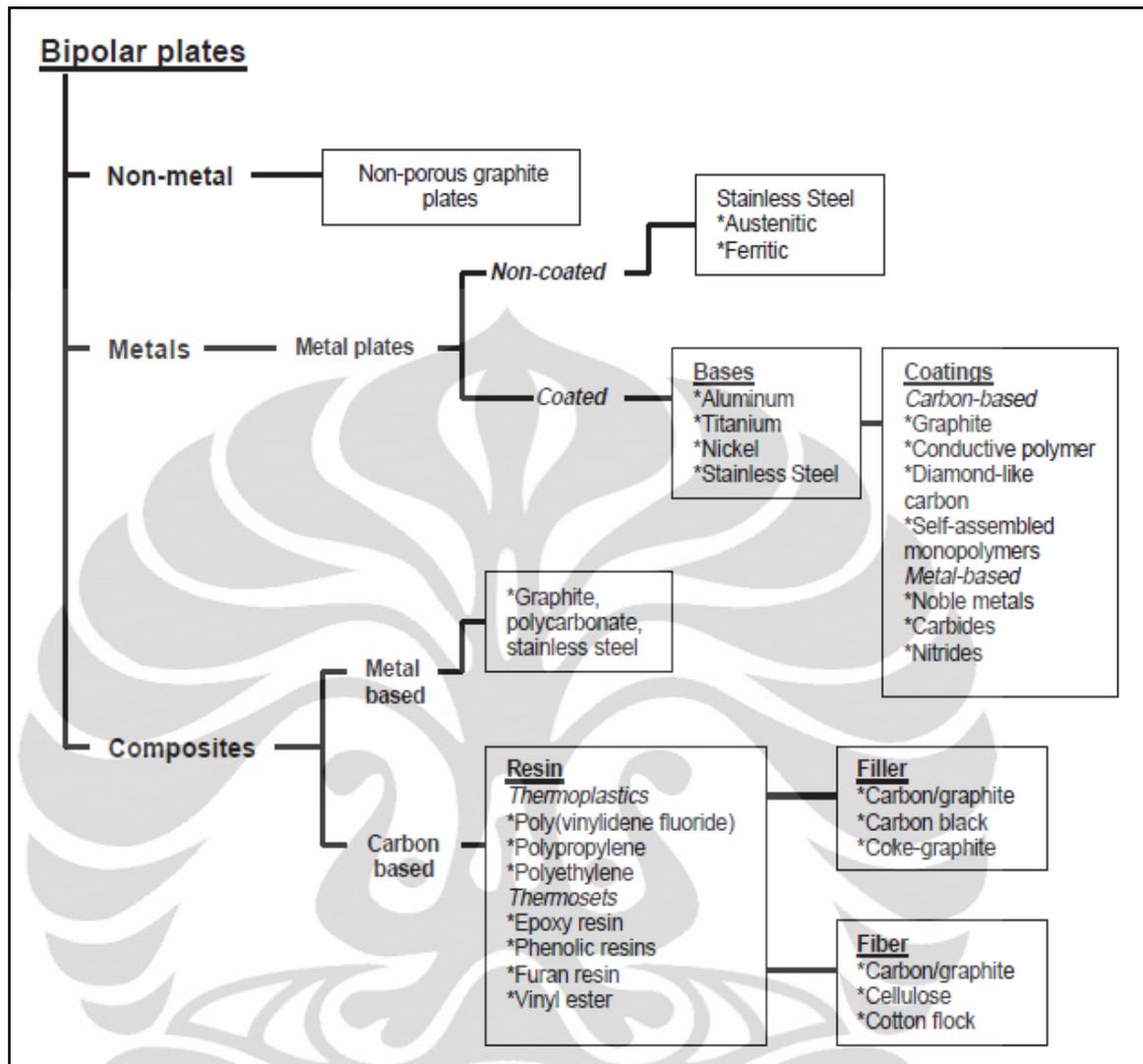
Sumber : http://www.jobwerx.com/news/ticono_first_all-plastic_fuel_cell_news-id=946952.html

Sifat-sifat yang diperlukan untuk membuat sebuah pelat bipolar adalah sebagai berikut^[19]:

- a. Konduktivitas listrik yang baik (>100 S/cm)
- b. Konduktivitas termal yang tinggi (>20 W/cm)
- c. Stabilitas mekanik terhadap gaya tekan
- d. Permeabilitas gas yang rendah
- e. Material yang murah untuk diproduksi misal
- f. Berat yang ringan
- g. Volume yang kecil
- h. Material yang dapat daur ulang

2.3.1 Klasifikasi Pelat Bipolar

Pelat bipolar terbuat dari bermacam-macam material dasar seperti non-logam, logam maupun komposit baik komposit berbasis karbon, polimer termoset dan polimer plastis. Untuk mengetahui jenis-jenis material penyusun pelat bipolar maka kita dapat melihat Gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2.6 Klasifikasi Pelat Bipolar Berdasarkan Material Penyusunnya^[20]

Sumber : Hermann, Allen, Tapas Chaudhuri, and Priscila Spagnol. *Journal: Bipolar plates for PEM Fuel Cells: A Review*

Setiap material dasar yang digunakan sebagai penyusun pelat bipolar difungsikan untuk aplikasi tertentu yang spesifik. Material tersebut memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing yang menjadi dasar perbedaan pemanfaatannya, seperti terlihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Beberapa Material Sebagai Pelat Bipolar^[20]

Material	Keuntungan	Kerugian
Grafit	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ketahanan terhadap korosi yang sangat baik 2. Resisitivitas yang rendah 3. Resistansi kontak rendah 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sifat mekanik yang buruk (getas) 2. Porositas 3. Volum dan berat besar 4. Biaya produksi mahal
Komposit karbon - karbon	<ol style="list-style-type: none"> 1. Densitas rendah 2. Ketahanan terhadap korosi baik 3. Resistansi kontak rendah 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kekuatan mekanik rendah 2. Konduktivitas listrik rendah 3. Harga tinggi
Komposit karbon-polimer	<ol style="list-style-type: none"> 1. Biaya rendah 2. Ketahanan terhadap korosi cukup baik 3. Bobotnya ringan 4. Tidak menggunakan proses permesinan 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kekuatan mekanik rendah 2. Konduktivitas listrik rendah
Logam	<ol style="list-style-type: none"> 1. Konduktivitas listrik baik 2. Konduktivitas panas baik 3. Biaya produksi cukup rendah 4. Memiliki sifat mekanik yang baik 5. Proses fabrikasi yang mudah 	Terjadi korosi pada membran yang menghasilkan oksida pada permukaan

Sumber : Hermann, Allen, Tapas Chaudhuri, and Priscila Spagnol. *Journal: Bipolar plates for PEM Fuel Cells: A Review*

Pelat bipolar PEMFC umumnya dibuat dengan menggunakan grafit dan stainless steel^[21]. Material grafit memiliki konduktivitas yang tinggi, lebih inert dan tahan terhadap korosi. Namun harganya cukup mahal, baik dari material maupun biaya produksi, begitu pula dengan stainless steel sehingga perlu

dilakukan pengembangan material baru. Target keberhasilan dalam mengembangkan pelat bipolar untuk PEMFC mengacu pada standar US Department of Energy (DOE), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Target Teknis *Department of Energy* (DOE), USA untuk Karakteristik Pelat Bipolar^[22]

Characteristic [Units]	Status 2005	2010 target	2015 target
Cost [\$/kW]	10	5	3
Weight [kg/kW]	0.36	< 0.4	< 0.4
H ₂ permeation [cm ³ sec ⁻¹ cm ⁻²]	< 2.6 x 10 ⁻⁶	< 2.6 x 10 ⁻⁶	< 2.6 x 10 ⁻⁶
Corrosion [μA/cm ²]	< 1 ^d	< 1 ^d	< 1 ^d
Electrical Conductivity [S/cm]	> 600	> 100	> 100
Resistivity [Ω.cm ²]	< 0.02	0.01	0.01
Flexural [Mpa]	> 34	> 25	> 25
Flexibility [% 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)*

2.4 Material Komposit

Material komposit adalah gabungan makroskopis dari dua atau lebih material yang berbeda, dimana diantaranya terbentuk suatu ikatan^[23]. Hal ini yang membedakan komposit dengan paduan, dimana paduan dilakukan penambahan pada skala mikroskopis. Kombinasi antara beberapa material di dalam komposit yang baik, memberikan sifat-sifat yang lebih baik diantara material penyusunnya. Oleh karena itu, komposit diproduksi untuk mengoptimalkan sifat-sifat dari suatu material, seperti sifat mekanik (terutama kekuatan), sifat kimia atau fisik, optimalisasi sifat thermal (ekspansi termal, konduksi termal, pelunakan dan titik leleh) sebaik sifat elektriknya (konduktivitas listrik) dan sifat optiknya. Komposit digunakan tidak hanya pada aplikasi struktural, melainkan untuk aplikasi elektronik, thermal, dan dengan kondisi lingkungan lainnya.

Suatu komposit terdiri dari dua komponen penyusun, yaitu matriks dan penguat (*reinforcement*). Antara matriks dan penguat harus memiliki ikatan yang

baik untuk menciptakan sifat yang baik pula. Selain itu, pada matriks harus terbentuk fasa terdispersi untuk meningkatkan kekuatan dan sifat-sifat lainnya. Fungsi dari matriks yang digunakan adalah sebagai berikut^[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

Sedangkan, penguat digunakan dalam suatu komposit untuk meningkatkan sifat dari material komposit yang dihasilkan dan memiliki kemampuan untuk ditempatkan pada arah pembebanan untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Berdasarkan jenis penguatnya, material komposit dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu sebagai berikut:

- a. Komposit berpenguat partikel
Penguat partikel dalam komposit dapat berupa *large particles* ataupun *dispersion strngthened particles*.
- b. Komposit berpenguat fiber
Penguat serat dalam komposit dapat berupa serat kontinu (*continuous fiber*) ataupun serat putus-putus (*discontinuous fiber*).
- c. Komposit berpenguat struktural
Komposit berpenguat struktural dapat berupa *laminates* ataupun *sandwich Panels*.

Sementara itu, berdasarkan jenis matriksnya, material komposit dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu sebagai berikut:

- a. *Metal Matrix Composite* (MMC)
Merupakan komposit yang tersusun atas matriks berbasis material logam.
- b. *Polymer Matrix Composite* (PMC)
Merupakan komposit yang tersusun atas matriks berbasis material polimer.

c. *Ceramic Matrix Composite (CMC)*

Merupakan komposit yang tersusun atas matriks berbasis material keramik.

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

1. Material Penyusun

Sifat komposit akan ditentukan dari material penyusunnya. Matriks dalam penelitian ini adalah grafit, sehingga sifat grafit akan menjadi sifat utama pelat bipolar nantinya. Grafit memiliki konduktivitas yang cukup baik, namun memiliki tingkat kegetasan yang cukup tinggi juga. Sedangkan *filler* merupakan *carbon black*. *Carbon black* mempunyai sifat mekanis yang tidak jauh berbeda dengan grafit, namun pada penelitian ini ukuran *carbon black* dan grafit akan dibedakan sehingga diharapkan akan terjadi reaksi *interface* yang baik. Epoksi pada pelat bipolar berfungsi sebagai *binder* atau pengikat untuk pencampuran grafit dan *carbon black*, selain itu pemakaian epoksi juga menguntungkan karena polimer ini mempunyai ketahanan terhadap temperatur dan kimia yang cukup baik.

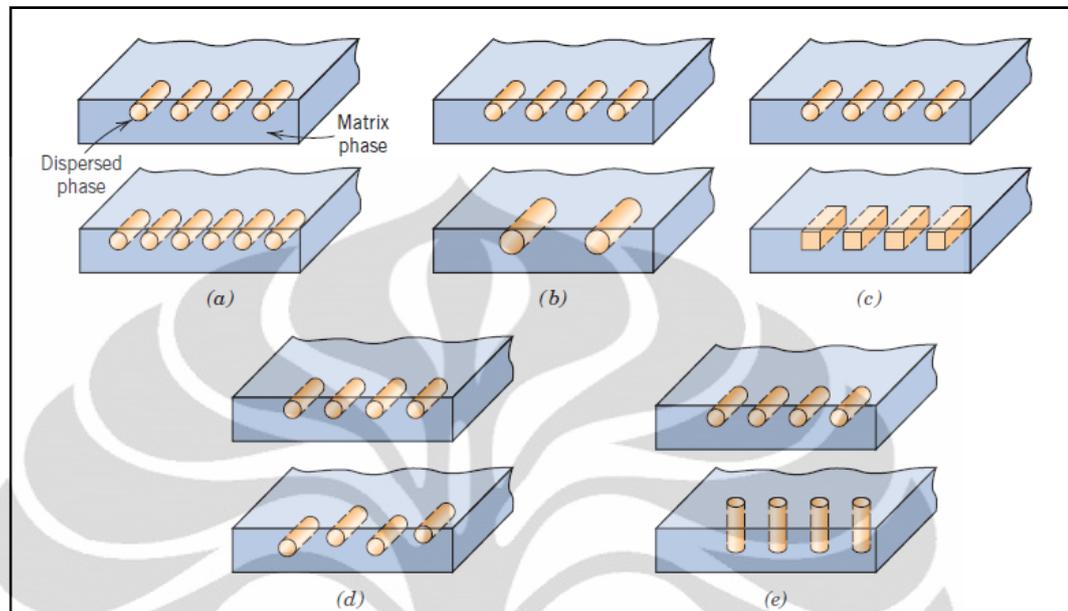
2. Jumlah Material yang Digunakan

Jumlah dari material penyusun akan mempengaruhi sifat yang dihasilkan dari komposit. Komposisi antara matriks dan penguat, sebaiknya seimbang karena jika jumlah material penguat lebih banyak dari matriks, maka sifat yang dihasilkan tidak mencapai nilai optimum.

3. Fasa yang Terdispersi

Fasa yang terdispersi dalam matriks juga mempengaruhi sifat komposit baik distribusi, konsentrasi, orientasi, ukuran maupun bentuk fasa seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.7. Contohnya, pada bahan penguat yang berbentuk silinder atau tidak bersudut memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan penguat yang memiliki sudut pada sisinya. Hal

ini diakibatkan oleh tegangan konsentrasi yang lebih besar pada bagian sudut, sehingga sifat mekanik lebih buruk.



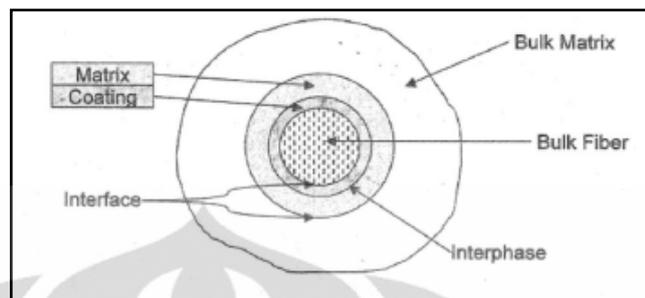
Gambar 2.7 Parameter dari bahan pengisi pada komposit : Distribusi (a) ; Konsentrasi (b), Orientasi (c), Bentuk (d), dan Ukuran (e)^[23]

Sumber : Callister, William D, Jr. *Material Science and Engineering: An Introduction*

4. Ikatan Antarmuka dan Antarfasa

Dalam material komposit, penguat dan matriks menghasilkan kombinasi sifat mekanik yang berbeda dengan sifat dasar dari masing-masing matriks maupun penguat karena adanya ikatan antar muka antara kedua komponen tersebut. Ikatan antar muka merupakan permukaan yang terbentuk diantara matriks dan penguat didalamnya yang berfungsi sebagai media transfer beban dari matriks dan penguat. Ikatan antara penguat dan matriks ini memiliki peran yang besar dalam penentuan sifat komposit. Semakin baik ikatan yang terbentuk (ditandai dengan semakin luasnya daerah permukaan kontak), maka semakin baik pula sifat akhir dari komposit yang terbentuk. Permukaan yang terbentuk tersebut akan mempengaruhi sifat-sifat dari komposit nantinya. Selain itu, diantara matriks dan penguat akan terbentuk fasa ketiga (antar fasa) yang memiliki sifat gabungan dari kedua fasa pembentuknya. Fasa ketiga dapat terbentuk apabila ikatan antar

fasa terbentuk dengan baik, sehingga setiap komponen mampu berdifusi seperti terlihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Fenomena antarmuka dan antarfasa pada komposit^[24]

Sumber : ASM Handbook Vol 21, 2003

Saat ini perkembangan pelat bipolar komposit lebih pesat diantara jenis pelat bipolar berbasis grafit, logam, dan komposit. Hal tersebut karena pelat bipolar komposit dapat diproduksi dengan lebih murah serta menghasilkan properties yang baik^[25].

2.5 Pelat Bipolar Komposit

Jenis komposit yang digunakan untuk membuat pelat bipolar pada umumnya adalah komposit non-logam. Matriksnya relatif ulet dan tangguh, sedangkan *filler*-nya lebih kuat dan keras atau memiliki fungsi tertentu. Komposit non-logam yang digunakan untuk membuat pelat bipolar pada umumnya memiliki kandungan *filler* grafit yang cukup besar (hingga 70-80%) dan matriks polimer yang lebih kecil^[25].

Komposit non-logam terbagi menjadi beberapa klasifikasi yaitu karbon-karbon komposit, komposit berbasis termoset, dan komposit berbasis termoplastik. Penelitian ini menggunakan komposit berbasis termoset, lebih detail tentang komposit jenis ini akan dijelaskan pada sub bab berikutnya.

2.6 Material Penyusun Pelat Bipolar dengan Komposit Berbasis Polimer Termoset

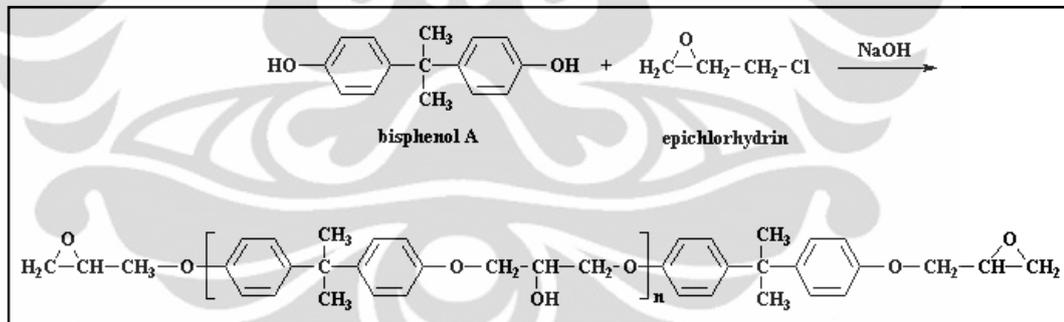
Karakteristik pelat bipolar yang dihasilkan sangat bergantung pada material yang digunakan. Oleh karena itu, pemilihan material penyusun pelat bipolar perlu mendapat banyak perhatian. Pada penelitian ini, digunakan material-

material penyusun dalam sistem komposit, seperti resin epoksi, grafit EAF, dan *carbon black*

2.6.1 Resin Epoksi

Epoksi merupakan salah satu jenis polimer termoset yang tidak dapat menerima siklus pemanasan dan pendinginan secara kontinu. Jenis polimer ini akan melunak dan mampu mengalir ke dalam cetakan saat dipanaskan pada tahap awal. Pada temperatur tinggi, epoksi akan mengalami reaksi kimia sehingga menjadi keras dan tidak mampu kembali ke bentuk semula. Jika dipanaskan ulang, epoksi tidak mampu melunak kembali, melainkan akan terdegradasi^[26].

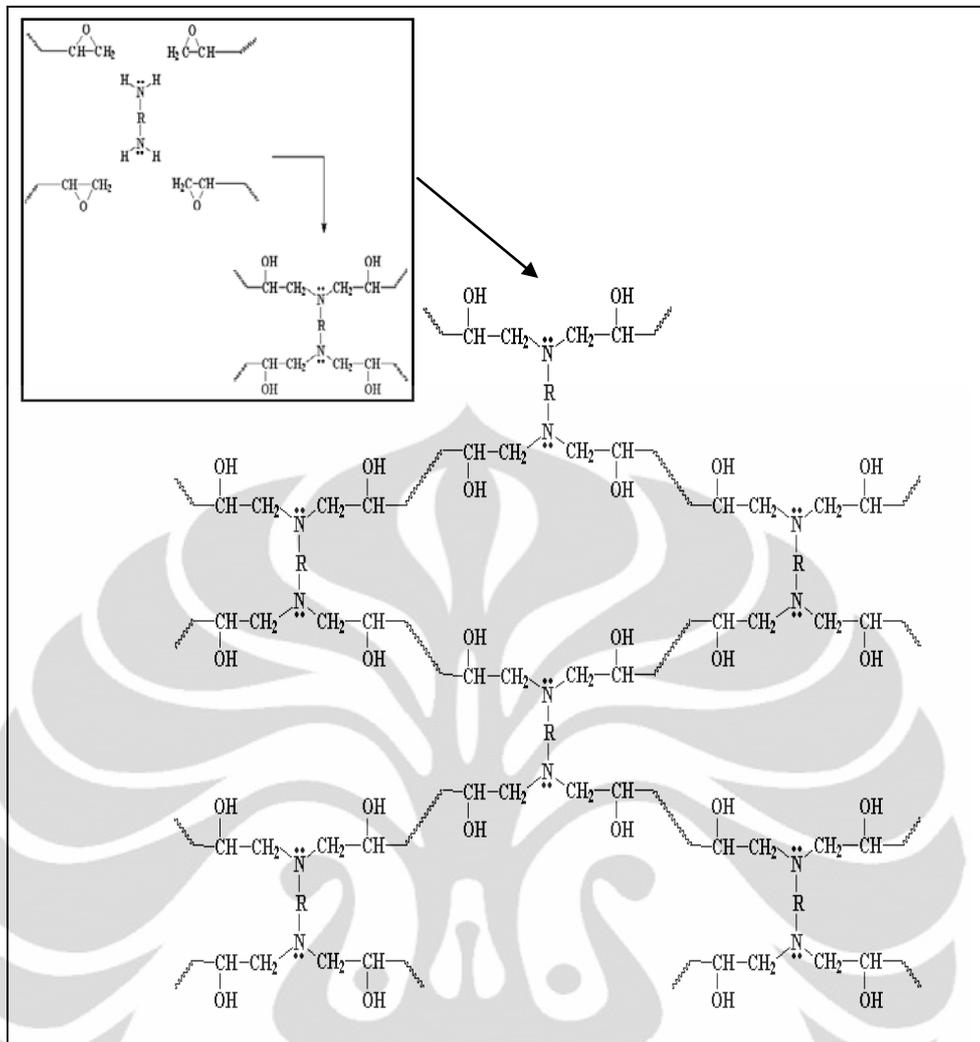
Secara umum, polimer termoset terdiri dari dua jenis penyusun, yaitu epoksi resin dan *curing agent (hardener)*. *Hardener* yang dicampurkan dengan resin epoksi akan menyebabkan reaksi *curing* terjadi, bertujuan agar didapatkan *hardened polymer (cross linked structure)* yang kuat dan mempunyai sifat mekanis baik sebagai *binder* pada pelat bipolar komposit berbasis karbon seperti yang terlihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Reaksi Pembentukan Epoksi^[26]

Sumber: <http://pslc.ws/macrog/eposyn.htm>

Pada pembuatan pelat bipolar, resin epoksi dicampurkan dengan hardener untuk menghasilkan reaksi curing sehingga diperoleh polimer yang kuat dan mempunyai sifat mekanis yang baik. Hasil proses *curing* yang dilakukan dengan pemberian panas pada campuran resin epoksi dan *hardener* ditunjukkan Gambar 2.10.



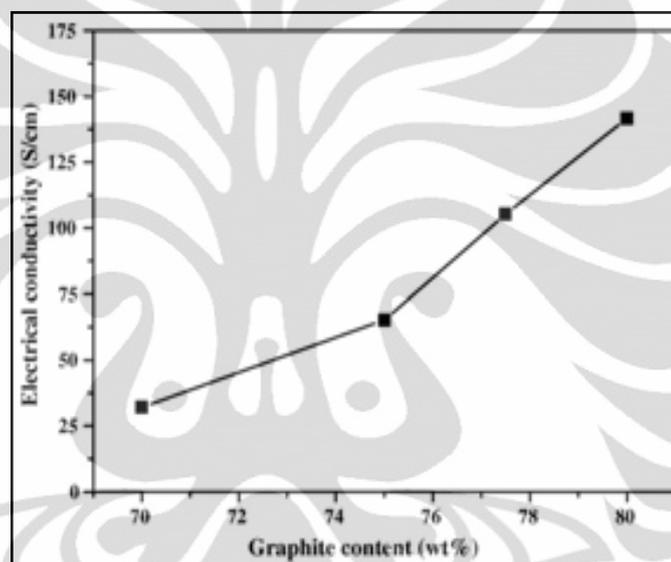
Gambar 2.10 Reaksi antara Resin Epoksi dan *Hardener*^[27]

Sumber : <http://www.psrc.usm.edu/macrog/epoxy.htm>, telah diolah kembali

2.6.2 Grafit

Grafit 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. Grafit digolongkan menjadi dua jenis, yaitu grafit alami dan grafit sintetik. Grafit sintetik lebih murni dibandingkan grafit alami. Grafit sintetik merupakan produk yang dibuat dari material karbon amorf melalui proses perlakuan khusus pada kondisi temperatur tinggi. Grafit digunakan sebagai bahan pengisi khususnya dalam matriks polimer 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.

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^[29]. 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^[29]. Gambar 2.11 menunjukkan pengaruh penambahan grafit terhadap konduktivitas listrik dari pelat bipolar. Sebaliknya, penambahan grafit juga akan menurunkan resistivitas dari pelat bipolar^[31].



Gambar 2.11 Pengaruh Penambahan Grafit terhadap Konduktivitas Listrik^[30]
Sumber: *Preparation, Electrical, Mechanical, and Thermal Properties of Composite Bipolar Plate for A Fuel Cell*

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^[32]. Pada Tabel 2.4 terlihat bahwa semakin kecil

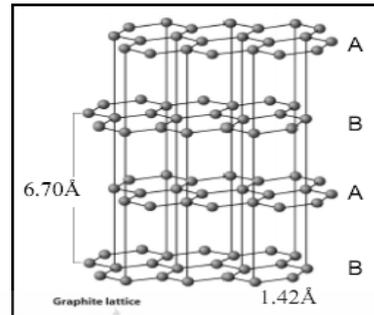
ukuran dari partikel, akan menurunkan nilai konduktivitasnya, namun secara tidak langsung akan meningkatkan kekuatan fleksuralnya.

Tabel 2.4 Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel Grafit^[32]

Sample	Particle Size	Direction	Bulk Electrical Conductivity (S/cm)	Thermometric Conductivity [W/(m.°C)]	Flexural Strenght (MPa)
Spherical Graphite	44-63 μm	//	84	18.9	39.5
		\perp	387.3	71.9	
	< 44 μm	//	60	12.5	44
		\perp	326.9	61.4	
Flake-like Graphite	44-63 μm	//	76	20.3	35
		\perp	566.5	113	
	< 44 μm	//	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*

Grafit merupakan salah satu jenis bentuk alotropi dari karbon yang terdiri dari susunan atom-atom karbon secara heksagonal yang membentuk kisi planar dengan ikatan antar lapisan yang lemah^[33]. 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*. Struktur grafit dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Struktur Kristal Grafit^[4]

Sumber: L. Du, S.C. Jana, “Highly conductive epoxy/graphite composites for previous term bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells”

Adapun sifat kimia dan fisika dari grafit adalah^[33] :

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

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

2.6.3 *Carbon Black*

Carbon black merupakan partikel yang terbentuk dari karbon sebagai unsur penyusun utama, yang memiliki mikrostruktur hampir sama dengan grafit. Umumnya carbon black dihasilkan dari proses pembakaran tidak sempurna dari hidrokarbon cair^[29]. Umumnya, sifat *carbon black* berhubungan dengan proses pelarutan yang bergantung pada ukuran dan struktur partikel^[29], yaitu sebagai berikut:

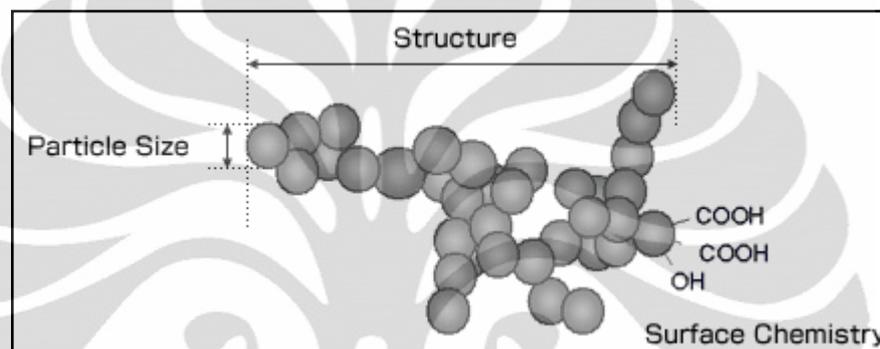
1. Ukuran partikel / luas permukaan

Ukuran partikel dan luas permukaan akan menentukan sifat yang dihasilkan dari *carbon black*. Ukuran partikel yang kecil akan memiliki luas permukaan yang besar sehingga akan lebih mudah untuk dibasahi dan dapat

dengan mudah larut ketika dicampur dengan material lain daripada *carbon black* yang memiliki ukuran yang besar.

2. Struktur

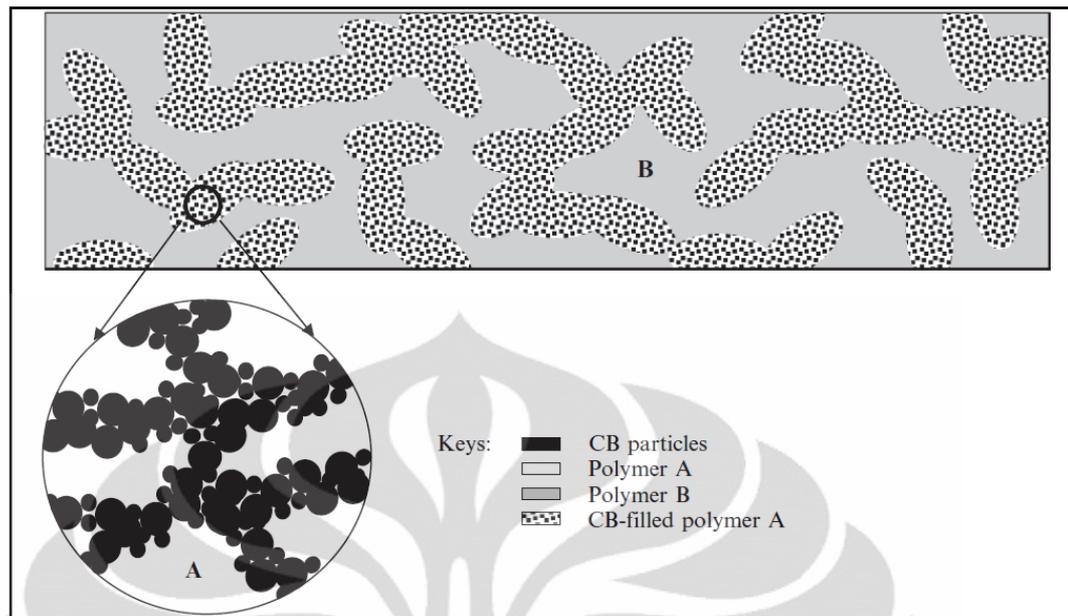
Struktur *carbon black* yang tinggi akan lebih mudah larut daripada struktur *carbon black* yang rendah sehingga strukturnya lebih besar dan memiliki bidang terpadat yang rendah sehingga ketika *carbon black* dicampurkan dengan polimer resin, maka resin akan mengisi bidang kosong dari karbon dan membentuk ikatan kimia yang baik. Gambar 2.13 menunjukkan struktur *carbon black*.



Gambar 2.13 Struktur *Carbon Black*^[34]

Sumber: <http://www.carbonblack.jp/en/cb/tokusei.html>

Pada karbon-polimer komposit, dispersi carbon black akan membentuk jaringan antar karbon dalam polimer. Jaringan ini berfungsi sebagai sirkuit elektrik sehingga dengan mudah dapat mengalirkan arus listrik dan mengurangi efek isolator dari polimer. Jaringan tersebut juga akan meningkatkan kemampuprosesan komposit dan sifat mekanisnya. Namun perlu diketahui ketika komposisi carbon black terlalu besar pada suatu matriks maka akan terbentuk penggumpalan (aglomerisasi) carbon black dan jaringan tidak terbentuk dengan baik. Morfologi jaringan secara stuktur mikro dari carbon black pada matriks polimer dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Skema *Carbon Black* pada Sistem Komposit^[18]

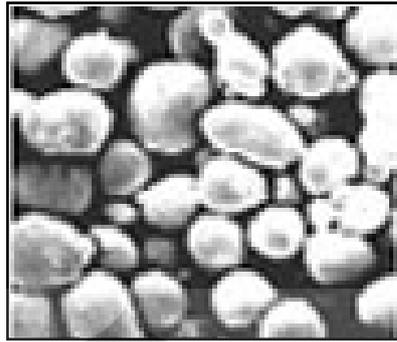
Sumber: Xiao Zi Yuan, et al., ed. *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells – From Materials to Processing*

2.6.4 *Aluminium Powder*

Penelitian ini menggunakan *aluminium powder* sebagai logam aditif. Selain *aluminium powder* biasanya juga dapat menggunakan *brass*, *bronze*, dan *copper powder*^[39]. Pemberian aditif ini diharapkan dapat menambah ketahanan korosi dan konduktivitas dari pelat bipolar.

Aluminium powder adalah material yang memiliki sifat-sifat fisik, kimia dan mekanik seperti logam lainnya. *Aluminium powder* memiliki densitas 2,7 g/cm³ yang membuatnya sangat ringan. Selain itu, konduktivitas termal dan elektrik aluminium juga sangat baik bahkan lebih baik dari copper karena densitasnya yang lebih kecil.

Aluminium powder merupakan material yang memiliki konduktivitas cukup tinggi serta memiliki ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan dengan metal powder lainnya, seperti Cu^[36]. Oleh karena itu, *aluminium powder* banyak digunakan sebagai filler yang dapat meningkatkan sifat konduktivitas dari komposit, khususnya komposit yang berbasis *epoxy* seperti yang digunakan dalam penelitian ini^[37]. Gambar 2.15 merupakan hasil pengamatan dari *aluminium powder*.

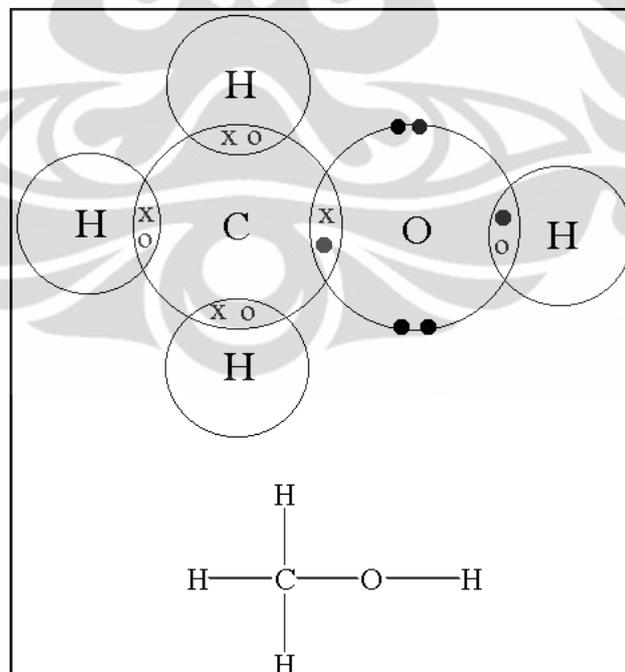


Gambar 2.15 Pengamatan *Aluminium Powder* Melalui Mikroskop Elektron ^[38]

Sumber: <http://en.hnyly.com/newEbiz1/en371hnylyres/images/common/pc/image006.jpg>

2.6.5 Metanol

Metanol yang digunakan disini 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 2.16.



Gambar 2.16 Struktur Metanol ^[35]

Sumber: <http://www.mindfiesta.com/methanol>

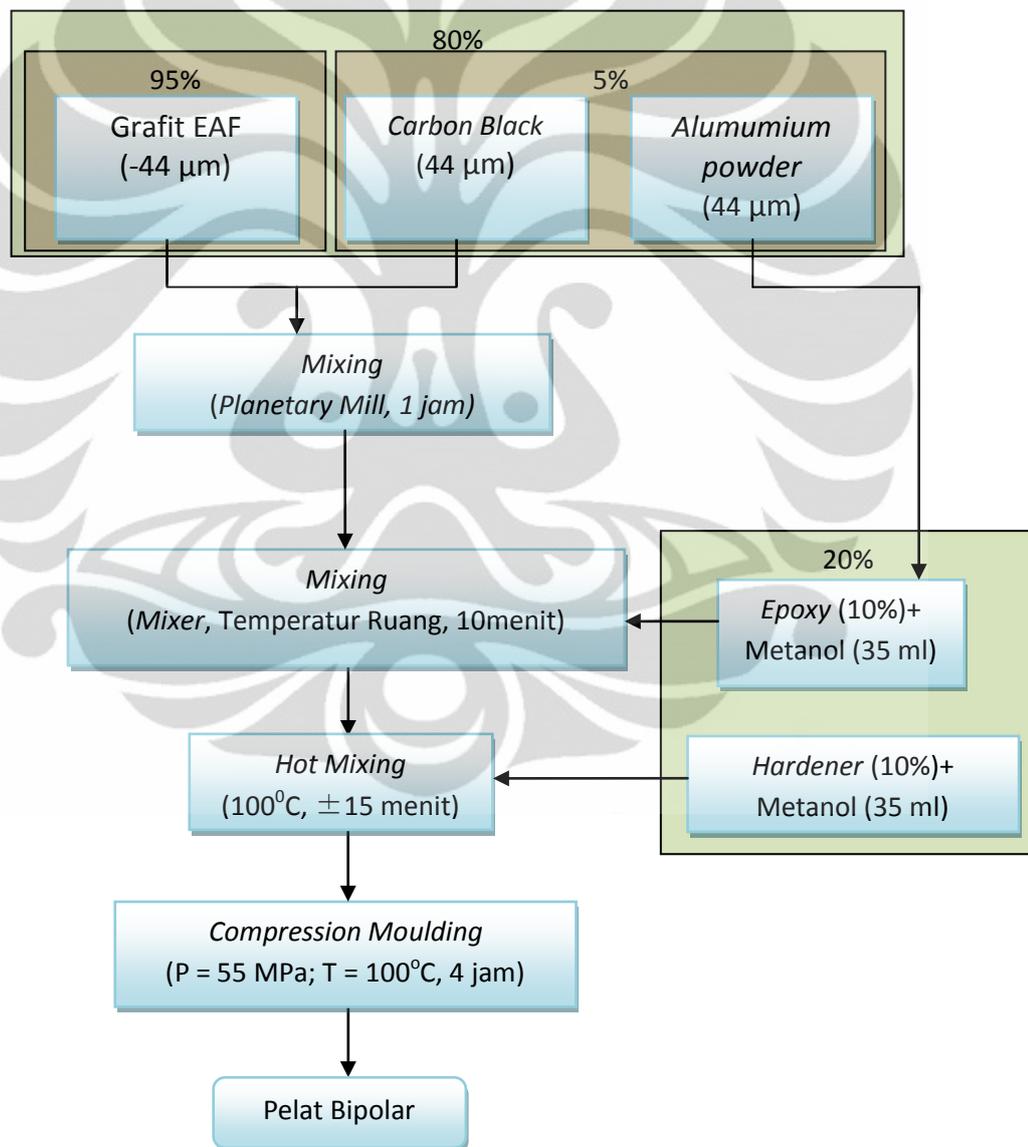
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1.1 Diagram Alir Pembuatan Sampel Pelat Bipolar

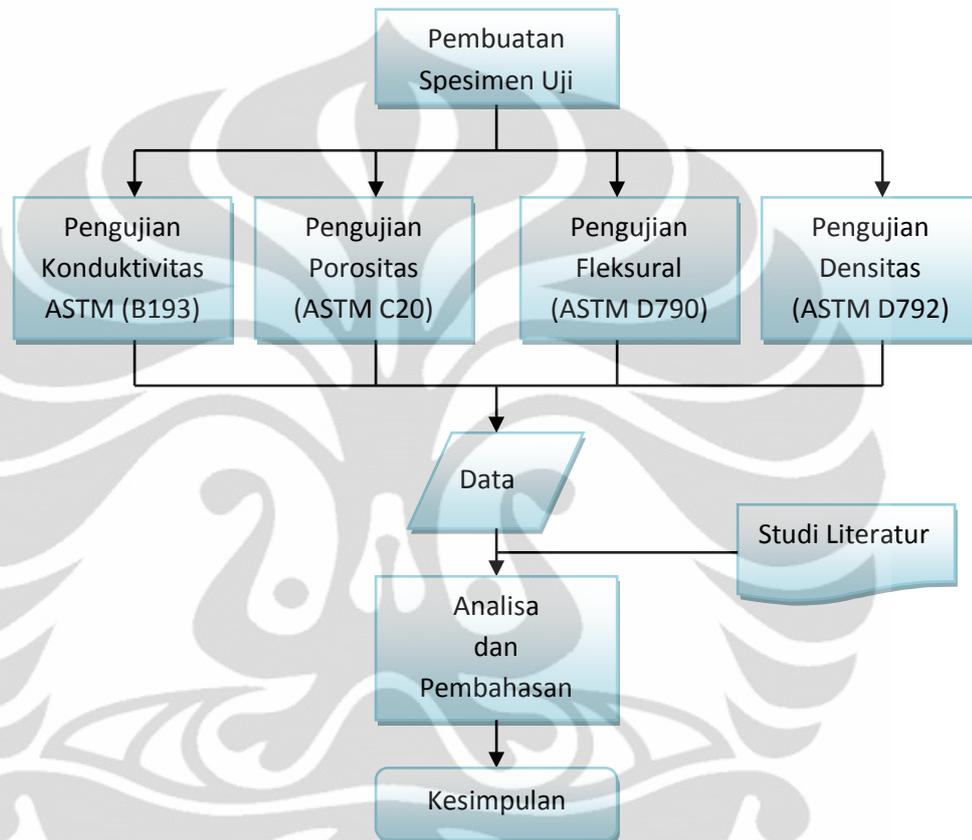
Pada Gambar 3.1 dibawah ini dapat dilihat diagram alir yang menggambarkan proses pembuatan pelat bipolar.



Gambar 3.1 Diagram Alir Pembuatan Sampel Pelat Bipolar

3.1.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel

Pada Gambar 3.2 berikut ini ditunjukkan diagram alir penelitian dari pengujian yang dilakukan terhadap sampel pelat bipolar.



Gambar 3.2 Diagram Alir Karakterisasi

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Peralatan yang digunakan untuk pembuatan dan karakterisasi pelat bipolar adalah:

1. *Planetary Ball mill*
2. *Sieving machine*
3. Palu
4. Pahat
5. Timbangan digital

6. *Beaker glass* 100 ml dan 1000 ml
7. Gelas Ukur
8. Spatula
9. Termometer
10. Sarung tangan
11. Masker
12. *Mixer*
13. *Thermometer*
14. Mesin *hot plate*
15. Cetakan *Stainless Steel* 15 x 15 cm
16. *Hydraulic Pressure Macine*
17. Gergaji Triplek
18. Gergaji besi
19. Kertas Amplas #60, #80, #500 dan #1000
20. *Oven*
21. Penggaris
22. Jangka sorong
23. Alat Uji Konduktivitas *Veeco FPP 5000-four point probe detector* (ASTM B193)
24. Alat Uji Densitas (ASTM D 792)
25. Alat Uji Porositas (ASTM C 20)
26. Alat Uji Fleksural UTM T22K JJ-Lyod *Instrument* (*Bending* 3 titik – ASTM D 790)

3.2.2 Bahan

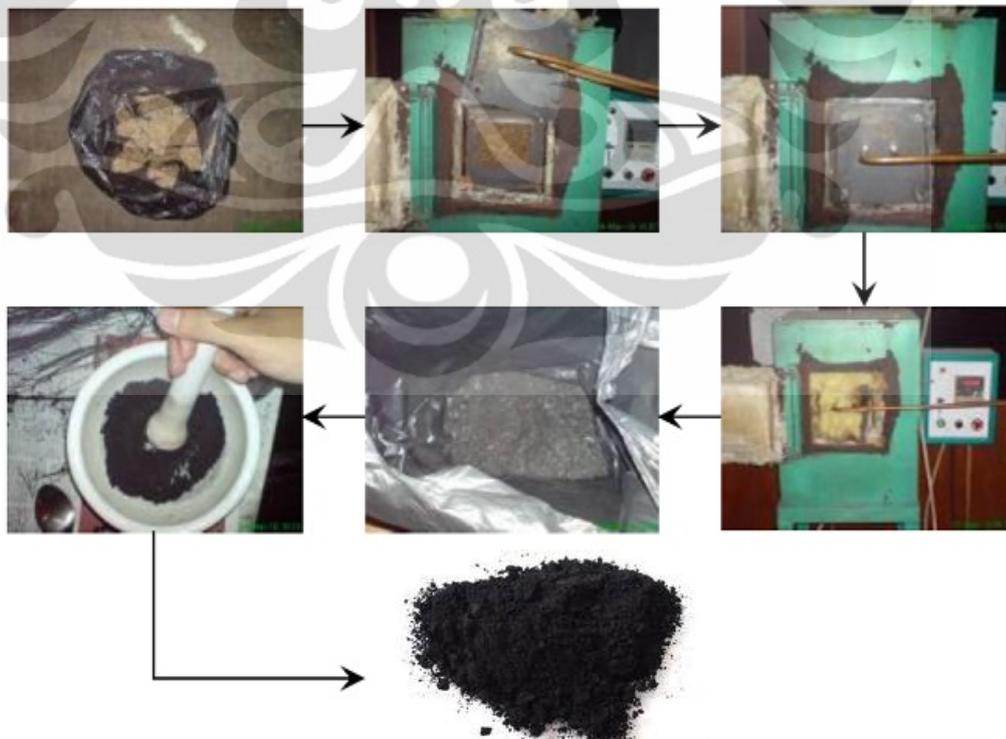
Pada penelitian ini, material yang digunakan untuk membuat pelat bipolar adalah material komposit, berupa grafit EAF dan *carbon black* sebagai *filler*, *aluminium powder* sebagai aditif dan resin epoksi sebagai *binder* dengan metanol sebagai pelarutnya.

1. Grafit EAF

Pada penelitian ini digunakan grafit elektroda EAF (*Electric Arc Furnace*) sisa peleburan baja PT. Krakatau Steel. Ukuran partikel dari grafit EAF yang digunakan adalah 44 μm . Ukuran tersebut diperoleh setelah bongkahan grafit elektroda EAF ditumbuk dan digerus menggunakan alat *planetary ball mill* untuk kemudian diayak dengan *sieving machine* hingga mendapatkan ukuran yang diinginkan.

2. Carbon Black

Carbon black yang dipakai merupakan hasil dari pirolisis serat alami (serabut kelapa) pada temperatur $\pm 900^\circ\text{C}$ selama ± 10 jam. Setelah proses pembuatan, *carbon black* yang dihasilkan dihaluskan sampai membentuk serbuk dengan ukuran partikel 44 μm . Diharapkan dengan luas permukaan yang tinggi (ukuran partikel yang kecil), maka akan mampu membentuk jaringan karbon konduktif dengan grafit. Ilustrasi skematis pembuatan *carbon black* yang digunakan pada penelitian ini, dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Ilustrasi Pembuatan *Carbon Black*

3. *Aluminium Powder*

Aluminium Powder yang digunakan pada penelitian ini bermerk dagang *Merck Chemicals*. Sebelum digunakan *aluminium powder* diayak menggunakan *sieving machine* untuk menghasilkan partikel yang berukuran 44 μm .



Gambar 3.4 *Aluminium Powder*

4. **Resin Epoksi**

Pada penelitian ini, digunakan resin epoksi (*Bhispenol A-epichlorohydrin*) dan *hardener* (*Polyaminoamide*) dengan merek dagang Eposchön. Epoksi *hardener* digunakan sebagai *curing 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*.

5. **Metanol**

Metanol yang digunakan yaitu metanol teknis. Jumlah metanol yang digunakan sebanyak 35 ml untuk masing-masing resin epoksi dan *hardener* pada setiap pembuatan bakalan pelat bipolar. Metanol berfungsi sebagai pelarut bagi resin epoksi dan *hardener*. Pelarutan membantu homogenisasi pembasahan resin epoksi dan *hardener* terhadap grafit dan *carbon black*. Penguapan metanol pada saat *hot mixing* harus dilakukan secara hati-hati karena bakalan yang terlalu kering dapat menyebabkan komposit pelat bipolar yang dihasilkan memiliki permukaan yang buruk dan bersifat rapuh, namun bila terlalu basah akan menyebabkan

sebagian bakalan keluar dari cetakan sehingga menyebabkan pelat yang dihasilkan terlalu tipis dan terjadi banyak *crack*.

3.3 Proses Pembuatan Pelat Bipolar

3.3.1 Penimbangan

Bahan-bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini ditimbang untuk mendapatkan takaran sesuai formulasi pada table. Massa total dari sampel pelat bipolar yaitu 144 gr. Untuk mengetahui komposisi pelat bipolar yang akan dibuat serta variabel jumlah *aluminium powder* dapat dilihat pada table 3.1.

Tabel 3.1. Komposisi Pelat Bipolar dan Variasi Jumlah *Aluminium Powder*

Bahan			Satuan	Kode formulasi sampel				
				1	2	3	4	5
Resin Epoksi	20%	10%	gr	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40
		10%	gr	14,40	14,40	14,40	14,40	14,40
Grafit Limbah EAF	80%	95%	gr	109,44	109,44	109,44	109,44	109,44
Carbon Black		5%	gr	5,76	5,51	5,25	5,01	4,76
			<i>Aluminium Powder</i>	gr	0	0,25	0,50	0,75

3.3.2 Pencampuran Bahan

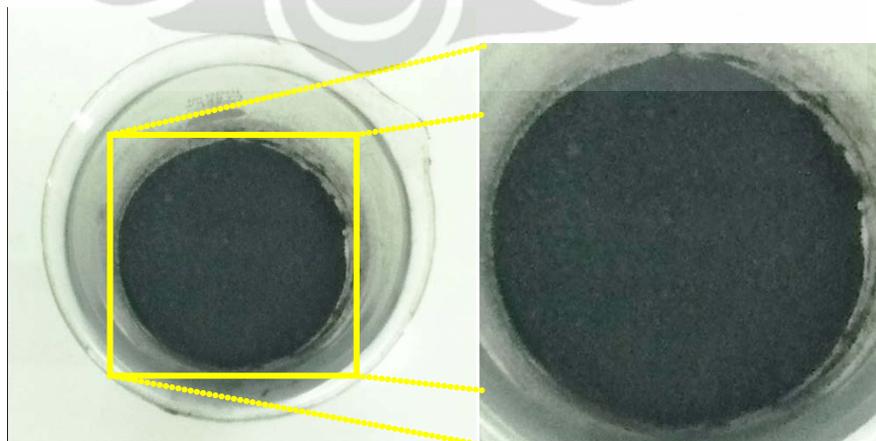
Setelah bahan-bahan ditimbang selanjutnya dilakukan proses pencampuran bahan-bahan sehingga menghasilkan bakalan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.6. Tahapan pencampuran adalah sebagai berikut :

1. Grafit EAF dan *carbon black* dimasukan pada jar, kemudian diaduk dengan menggunakan *planetary ball mill* seperti yang digunakan pada Gambar 3.5 selama 1 jam.



Gambar 3.5 Planetary Ball Mill

2. Siapkan resin epoksi sebanyak 14,4 gr dalam beaker glass, lalu campurkan dengan 35 ml *methanol*, lalu aduk sampai rata.
3. Resin epoksi diencerkan dicampurkan dengan *aluminium powder*.
4. *Aluminium powder* serta resin epoksi yang telah tercampur rata dengan metanol dimasukkan ke dalam *beaker glass* 1 L yang telah berisi grafit EAF dan *carbon black*, kemudian dilakukan *mixing* selama ± 10 menit.
5. Pengenceran *hardener* dengan *methanol* 35 mL.
6. *Hardener* yang sudah diencerkan dimasukkan dalam adonan, kemudian *dimixing* selama ± 5 menit.
7. *Mixing* di atas *hot plate* ($T=100^{\circ}\text{C}$) selama ± 10 menit. Hingga bakalan menjadi terlihat seperti pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Hasil Proses Pencampuran Bahan-Bahan

3.3.3 Pencetakan

Hasil *mixing* dimasukkan ke dalam cetakan yang berukuran 15 x 15 x 0.42 cm. Proses *setting* bahan dengan mesin *hot press* selama 4 jam. Kondisi operasi pada mesin *hot press* menggunakan tekanan 55 MPa dengan suhu 100⁰C seperti terlihat pada Gambar 3.7. Prosedur pencetakan adalah sebagai berikut:

1. Bersihkan cetakan dari kotoran (debu) yang menempel dan oleskan dengan oli bersih secara merata pada bagian dalam cetakan
2. Masukkan bakalan hasil pencampuran ke dalam cetakan hingga merata.
3. Tutup cetakan dan masukkan ke dalam *hydraulic pressure machine*
4. Atur tekanan pada mesin *hydraulic* sebesar 55 MPa dengan temperatur 70°C
5. Operasikan mesin selama 4 jam
6. Matikan indikator panas dan diamkan sampel di dalam cetakan pada temperatur kamar selama 12 jam dengan tekanan tetap
7. *Release* tekanan yang diberikan dan keluarkan pelat hasil pencetakan



Gambar 3.7 Mesin Hot Press

3.3.4 Pembuatan Spesimen Uji

Pembuatan specimen uji dari pelat bipolar diperuntukan untuk pengujian densitas, porositas, konduktivitas, dan fleksural. Pelat bipolar hasil dari proses pencetakan dibentuk dengan ukuran dimensi tertentu sesuai dengan masing-

masing standar pengujian. Gambar 3.8 menunjukkan dimensi dari masing-masing pengujian.

Untuk pengujian konduktivitas sampel yang dibutuhkan yaitu berdimensi 2x2 cm. Masing-masing sampel diampelas permukaannya hingga rata agar arus yang ditembakkan pada permukaan dapat ditangkap, sehingga bisa didapatkan nilai konduktivitas yang akurat.

Pengujian densitas dan porositas menggunakan sampel 2x2 cm untuk masing-masing variabel. Sampel pengujian densitas harus memiliki dimensi yang benar-benar seragam agar diperoleh hasil yang akurat.

Sampel untuk pengujian kekuatan fleksural, dibuat dengan ukuran 12x1,3x0,3 cm sebanyak 5 buah. Masing-masing sampel diampelas permukaannya hingga rata agar menghilangkan retak mikro ataupun sumber konsentrasi tegangan (seperti bekas pemotongan) yang dapat menyebabkan inisiasi retak, sehingga akan dihasilkan nilai kekuatan fleksural yang lebih akurat



Gambar 3.8 Sampel Uji Karakterisasi Pelat Bipolar

3.4 Karakterisasi Pelat Bipolar

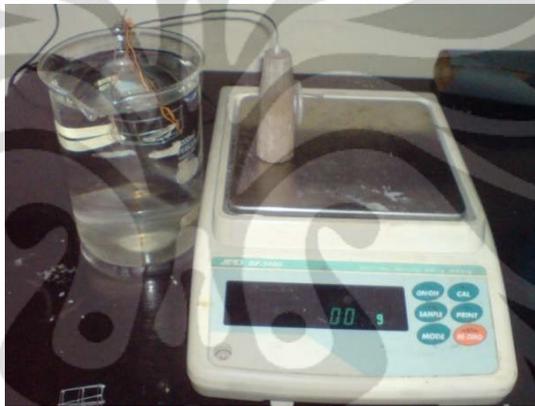
Adapun tahap yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari pelat bipolar yang telah dibuat, antara lain:

3.4.1 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 standar pengujian ASTM D792. Prosedur dari pengujian densitas secara bertahap adalah sebagai berikut:

1. Timbang sampel pada temperatur ruang dan diperoleh massa kering dari sampel (A).
2. Sampel dicelupkan dalam *beaker glass* berisi air. Pencelupan ini harus dilakukan hingga seluruh permukaan sampel berada dalam posisi melayang di dalam *beaker glass* yang berisi air seperti yang terlihat pada Gambar 3.9, kemudian timbang sampel (B).
3. Massa sampel yang diperoleh disubstitusi pada persamaan 3.1



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:

$$\rho \text{ sampel} = \frac{A}{A-B} \times \rho \text{ air} \quad (3.1)$$

dimana:

ρ sampel	= densitas sampel (gr/cm ³)
A	= massa sampel kering di udara (gr)
B	= massa sampel tergantung dalam air (gr)
ρ air	= densitas air (gr/cm ³)

3.4.2 Pengujian Porositas

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

1. Sampel dikeringkan dengan cara dipanaskan dalam oven pada temperatur 100°C selama 1 jam.
2. Sampel yang telah dikeringkan kemudian ditimbang pada temperatur ruang, setelah itu dicatat berat sampel sebagai *dry weight* (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.



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 *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 *saturated weigh* (Sw).
7. Massa sampel yang telah diperoleh dihitung menggunakan persamaan 3.2 untuk mendapatkan nilai porositas.

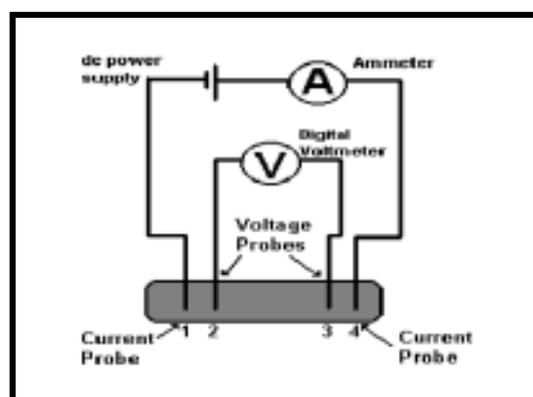
$$\% \text{ Porositas} = \frac{Sw-D}{D-S} \times 100\% \quad (3.2)$$

dimana :

- Sw = *Saturated Weight* (gr)
- D = *Dry Weight* (gr)
- S = *Suspended Weight* (gr)

3.4.3 Pengujian Konduktivitas

Pengujian akan dilakukan di Pusat Penelitian Fisika LIPI, Puspiptek, Serpong dengan menggunakan alat Veeco FPP 5000-*four point probe detector*. Alat ini menggunakan 4 titik yang terdiri dari titik 1 dan 4 sebagai titik pengukur arus yang dibaca di amperemeter, sedangkan titik 2 dan 3 sebagai pengukur tegangan yang akan dibaca di voltmeter. Gambar 3.11 menunjukkan skematis pengujian konduktivitas.



Gambar 3.11 Skema Uji Konduktivitas

Langkah-langkah pengujian konduktivitas adalah:

1. Siapkan sampel dengan permukaan rata yang akan diuji
2. Nyalakan *voltmeter* dan ubah tipe mesin menjadi DC
3. Letakan sampel ke dalam alat (sampel diletakkan tepat ditengah dimana 4 buah *probe* berada)
4. Letakan cakran di atas permukaan sampel uji seperti yang terlihat pada Gambar 3.12



Gambar 3.12 Mesin Veeco FPP 5000 - *Four Point Probe Test*

5. Pilih mode *slice* sesuai dengan bentuk sampel yang akan diuji
6. Masukkan data ketebalan dari sampel yang akan diuji
7. Tutup sampel dengan penutup alat
8. 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:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.3)$$

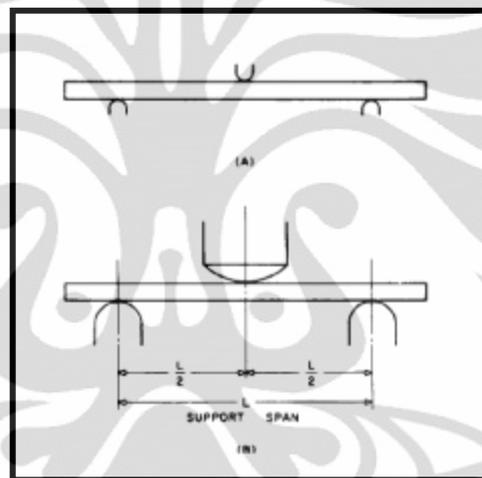
dimana,

σ = nilai konduktivitas (S/cm)

ρ = resistivitas (Ω .cm)

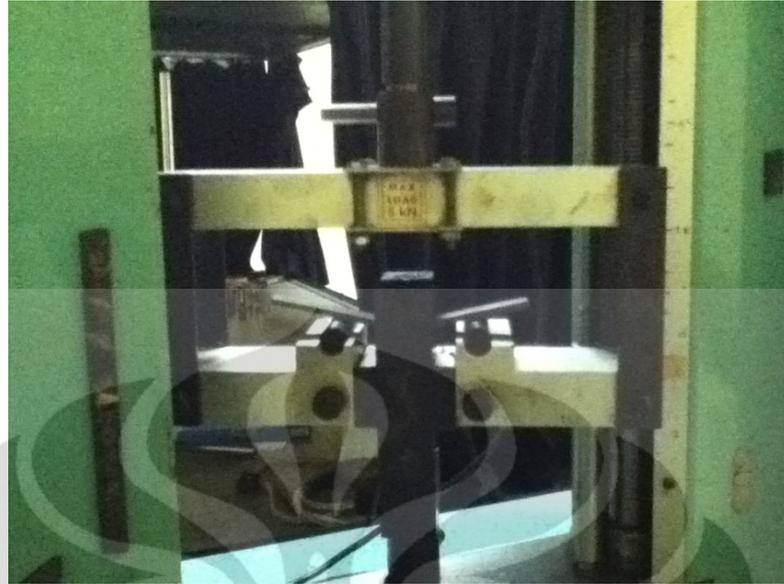
3.4.4 Pengujian Fleksural

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 3.13. Ukuran dari sampel uji adalah 12 x 1,3 x 0,3 cm.



Gambar 3.13. Skema Pengujian Fleksural

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 3.14 menunjukkan proses pengujian fleksural dengan menggunakan mesin UTM.



Gambar 3.14 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 :

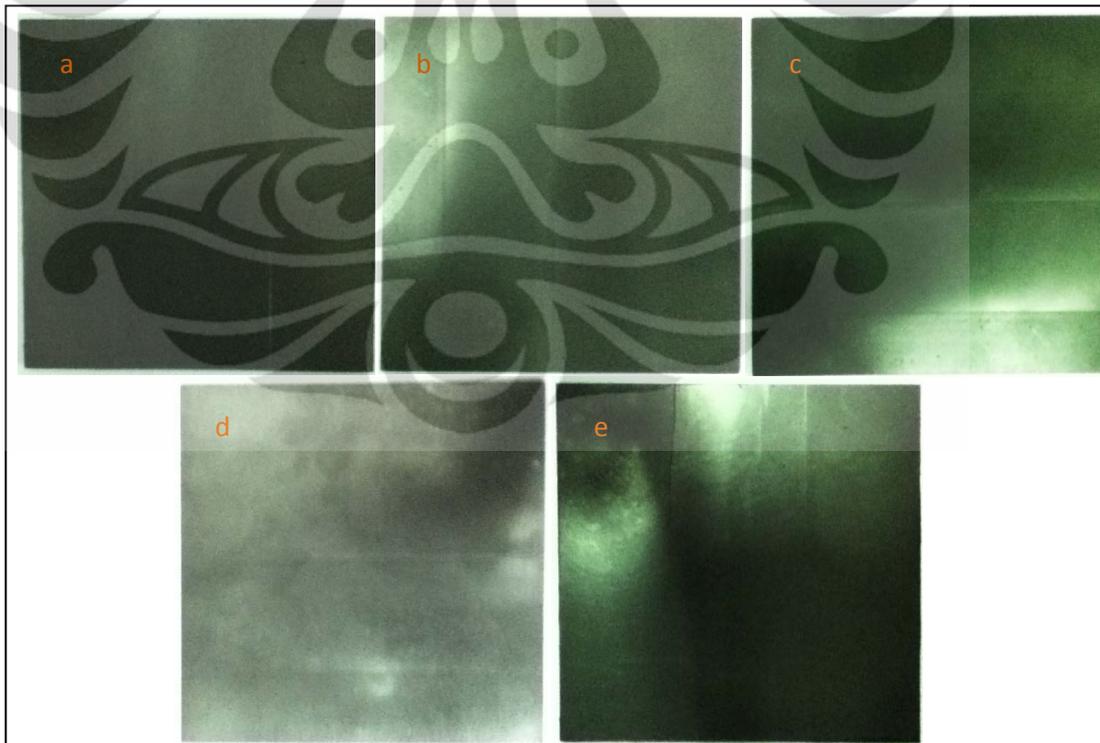
- σ = tegangan/kekuatan lentur (MPa)
- P = beban maksimum (P)
- L = panjang spesimen (mm)
- b = lebar spesimen (mm)
- d = tebal spesimen (mm)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengamatan Visual Pelat Bipolar Hasil Pencetakan

Pada penelitian ini, dibuat pelat bipolar dengan menggunakan material grafit EAF dan *carbon black* dengan perbandingan 19:1 (95%:5%) sebagai *filler* sebesar 80% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar, serta resin epoksi dan *hardener* dengan perbandingan 1:1 sebagai *binder* sebesar 20% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar dibuat dengan variasi penambahan *aluminium powder* sebesar 0 %wt, 0,22 %wt, 0,43 %wt, 0,65 %wt, 0,87 %wt. Masing-masing pelat bipolar yang dihasilkan berukuran 15 x15 cm, dengan ketebalan pelat dengan kisaran 0,35–0,50 cm. Gambar 4.1 menunjukkan penampakan pelat bipolar yang dihasilkan pada variasi penambahan *aluminium powder* 0 - 0,87 % wt.



Gambar 4.1 Pelat Bipolar yang Dihasilkan pada Penambahan *Aluminium Powder* : a.) 0 %wt, b.) 0,22% wt, c.) 0,50 %wt, d) 0,75 %wt dan e.) 1 %wt

Ketebalan pelat yang dihasilkan berbeda antar sisi berlawanan sehingga terlihat memiliki kemiringan. Ketebalan yang dihasilkan pada masing-masing pelat bervariasi, yaitu antara 0,35-0,5 cm. Hal ini terjadi karena perataan bakalan yang kurang sesuai dan ketika dilakukan pembebanan, distribusi penekanan menjadi tidak merata sehingga dihasilkan ketebalan pelat bipolar yang berbeda. Namun, hal tersebut tidak berpengaruh secara signifikan pada karakteristik pelat bipolar yang dihasilkan jika dibandingkan satu sama lain, selama proses pencampuran berjalan dengan baik. Selain itu, dengan adanya waktu penekanan pada proses *compression molding*, yaitu selama 4 jam diharapkan distribusi penekanan dapat tersebar secara merata sehingga faktor perataan bakalan yang kurang sesuai dapat diabaikan dimana tidak berpengaruh terhadap karakteristik pelat bipolar yang dihasilkan.

Pada permukaan pelat bipolar terbentuk garis-garis vertikal yang dapat dilihat pada Gambar 4.1. Hal ini disebabkan oleh permukaan cetakan yang digunakan. Garis-garis yang tidak rata tersebut harus dihilangkan dan dihaluskan ketika dilakukan pengujian terhadap karakteristik pelat bipolar. Garis-garis tersebut dapat menjadi konsentrasi tegangan dan mempengaruhi nilai kekuatan pelat bipolar sehingga nilai yang didapatkan pada penelitian tidak sesuai pada pengujian fleksural. 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.

4.2 Karakterisasi Pelat Bipolar Komposit

Pada penelitian ini, pembuatan pelat bipolar komposit berbasis polimer termoset (epoksi) dilakukan pada temperatur 100°C dibawah tekanan 55 MPa untuk masing-masing pelat bipolar yang dihasilkan dengan menggunakan proses *compression moulding*. Karakterisasi pelat bipolar dibutuhkan untuk mengetahui pengaruh dari variabel penambahan *aluminium powder* sebagai aditif yang diharapkan dapat meningkatkan konduktivitas pelat bipolar untuk aplikasi PEMFC. Selain itu juga akan dilihat pengaruhnya terhadap kekuatan fleksural, densitas, dan porositas pelat bipolar terhadap penambahan *aluminium powder* sebagai aditif.

4.2.1 Hasil Pengujian Densitas

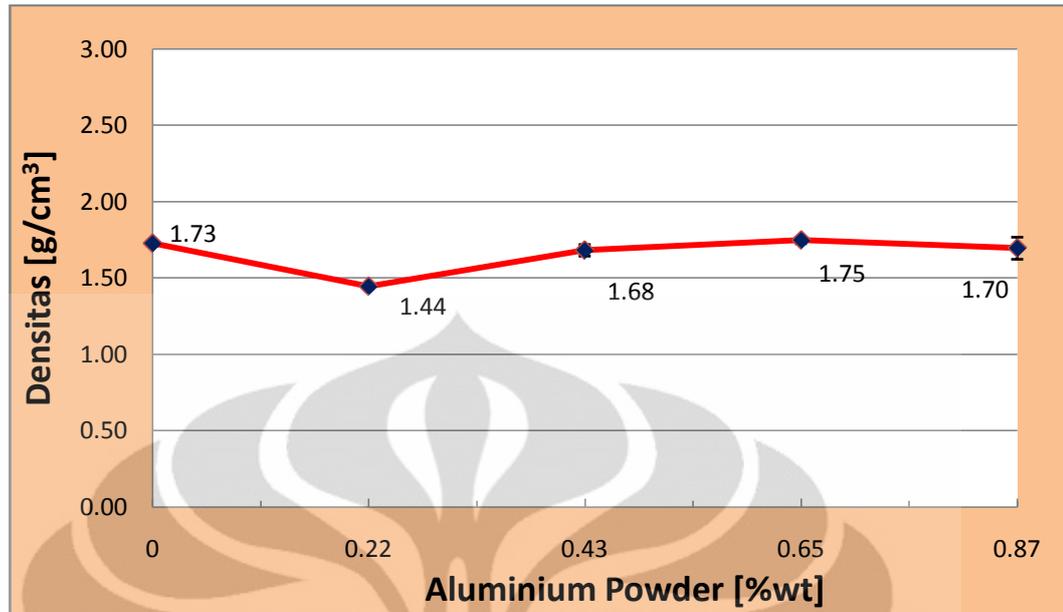
Pengujian densitas ini bertujuan untuk mengetahui massa jenis dari pelat bipolar yang dihasilkan. Densitas akan mempengaruhi massa dari suatu benda. Dengan mengurangi ukuran, berat, dan biaya pelat bipolar yang digunakan, maka dapat mengurangi biaya produksi dari PEMFC secara signifikan. Hasil penelitian ini diharapkan akan menghasilkan komposit yang memiliki konduktivitas yang tinggi, ringan, dan biaya rendah, serta memiliki optimalisasi performa yang sangat baik, sehingga dapat mereduksi biaya produksi PEMFC secara keseluruhan serta membuat PEMFC yang *portable*.

Pelat bipolar dengan densitas yang rendah dapat meningkatkan efisiensi dari sel, sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi. Tabel 4.1 menunjukkan hasil pengujian densitas yang dilakukan pada masing-masing pelat bipolar yang dihasilkan.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Densitas

Aluminium Powder [%wt]	Densitas [gr/cm ³]
0.00	1.73
0.22	1.44
0.43	1.68
0.65	1.75
0.87	1.70

Gambar 4.2 merupakan hasil pengujian densitas yang telah dilakukan pada pelat bipolar dengan variasi penambahan *aluminium powder*. Dari grafik tersebut terlihat penambahan *aluminium powder* hingga 0.87 %wt tidak menunjukkan perbedaan yang berarti. Berdasarkan Gambar grafik, penambahan *aluminium powder* tidak memberikan pengaruh yang berarti pada densitas pelat bipolar. Secara keseluruhan, hasil ini telah memenuhi standar DOE yaitu dibawah 5 gr/cm³.



Gambar 4.2 Pengaruh Penambahan *Aluminium Powder* Terhadap Densitas

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. Pematatan ini berpengaruh terhadap penurunan ketebalan dan peningkatan densitas pelat bipolar yang terbentuk^[4,30].

Peningkatan densitas yang terjadi tidak terlalu signifikan karena pada dasarnya densitas pelat bipolar komposit dipengaruhi oleh densitas masing-masing bahan yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar komposit, seperti grafit EAF (1,66-1,72 gr/cm³), *carbon black*, *cured* epoksi resin (1,2-1,3 gr/cm³) serta densitas *aluminium powder* yang cukup tinggi yaitu 2,7 gr/cm³. Dari hasil yang didapat densitas antara pelat yang satu dengan yang lain tidak jauh berbeda. Selain itu, temperatur pada saat proses pencetakan pelat bipolar (100°C) lebih kecil dibandingkan Tg dari resin epoksi (< 135°C)^[41] dimana Tg merupakan temperatur transisi gelas yang mengindikasikan suatu respon rantai molekul polimer terhadap panas sebagai salah satu bentuk energi kinetik^[40]. Ketika suatu proses berada pada temperatur dibawah temperatur Tg, maka polimer bersifat getas menyerupai perilaku gelas karena rantai-rantai molekulnya membeku^[40]. Pada kondisi ini, molekul-molekul polimer tidak memiliki energi termal yang

cukup untuk melakukan pergerakan (untuk saling bergeser-menggelincir dan berputar (*sliding-rotating*)), sehingga pergerakan termal dari molekul polimer sangat lambat dan tidak terjadi perubahan spesifik volume atau densitas yang signifikan^[40]. Densitas untuk masing-masing sampel pelat bipolar komposit dengan menggunakan variasi tekanan masih berada dalam rentang $\pm 1,44-1,75$ gr/cm³ dan telah sesuai dengan persyaratan teknis *Department of Energy* (DOE), USA untuk densitas pelat bipolar, yaitu kurang dari 5 gr/cm³

4.2.2 Hasil Pengujian Porositas

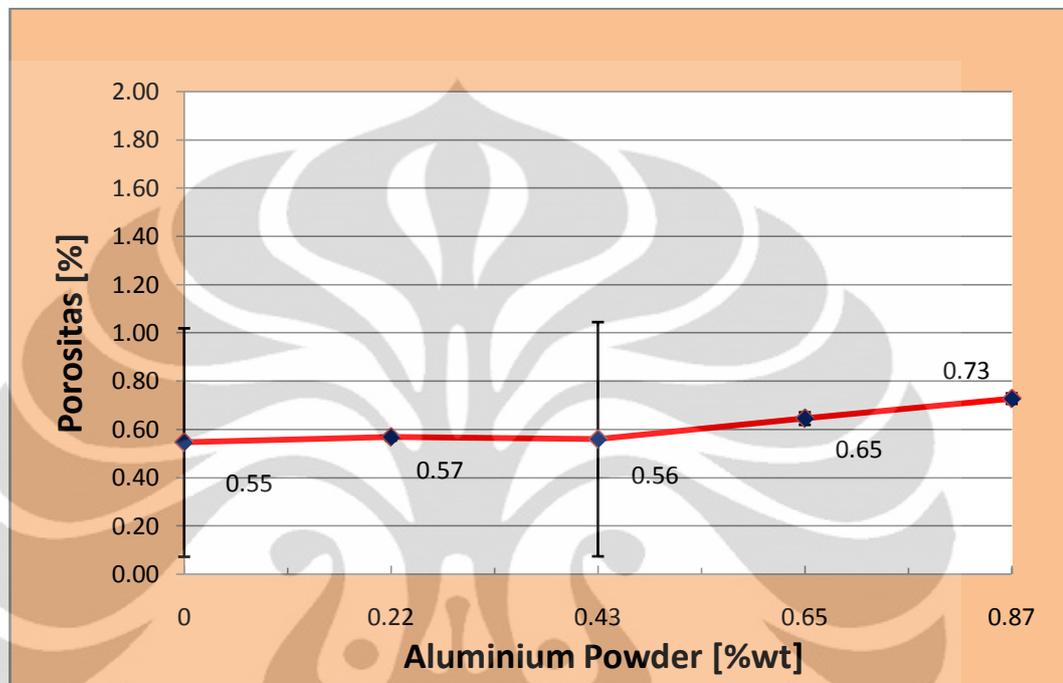
Porositas adalah rongga yang terbentuk dalam suatu material akibat pengaruh senyawa gas yang umumnya berasal dari luar sistem (uap air dan gas) maupun dari dalam sistem (bagian komposisi bahan yang dapat menguap). Pelat bipolar harus memiliki persentase porositas yang kecil bertujuan agar tidak adanya gas lain yang masuk ke dalam sistem *fuel cell* (sifat impermeabilitas) yang dapat mengganggu performa dan kinerja dari *fuel cell*. Nilai porositas dari pelat bipolar diharapkan sekecil mungkin sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan performa dari *fuel cell*. Tabel 4.2 menunjukkan hasil pengujian porositas pada pelat bipolar yang dihasilkan dengan menggunakan variabel penambahan *aluminium powder*.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Porositas

Aluminium Powder [%wt]	Porositas [%]
0.00	0.55
0.22	0.57
0.43	0.56
0.65	0.65
0.87	0.73

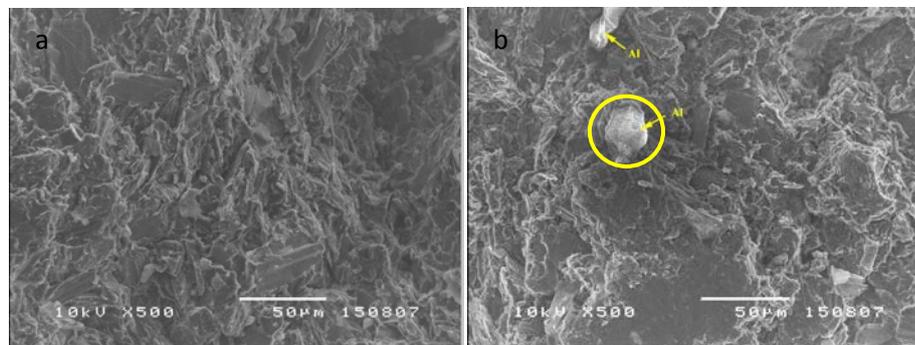
Gambar 4.3 menunjukkan bahwa pada peningkatan jumlah *aluminium powder* sampai dengan 0.87 %wt menghasilkan porositas yang memiliki kecenderungan makin tinggi. Pada penambahan 0.87 %wt *aluminium powder* porositas yang terjadi paling tinggi yaitu 0.73 % sedangkan paling rendah pada

0 %wt *aluminium powder* yaitu 0,55 %, sedangkan kecenderungan yang terjadi adalah makin tingginya porositas yang terdapat pada pelat bipolar seiring bertambahnya *aluminium powder*. Kecenderungan yang sama juga terjadi pada penelitian lain yang menggunakan grafit sintetis^[41].



Gambar 4.3 Pengaruh Penambahan *Aluminium Powder* Terhadap Porositas

Hasil SEM penelitian pembandingan pada Gambar 4.4 menunjukkan keberadaan *aluminium powder* akan meningkatkan poros dan *void* didalam komposit, sehingga meningkatkan porositas. Dari Gambar 4.4 juga terlihat sangat jelas *dote* dan *void* yang membuktikan bahwa penambahan *aluminium powder* akan meningkatkan poros pada pelat bipolar^[41].



Gambar 4.4 SEM Komposit Pelat Bipolar : a) komposit tanpa *aluminium powder*, b) komposit dengan 2 %wt *aluminium powder*^[41]

Selain itu, Pada tekanan yang sangat tinggi, terjadi peristiwa pemadatan yang terlalu tinggi dimana menyebabkan 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. Selain itu, struktur *carbon black* yang mirip seperti porositas dan ukuran *carbon black* juga mempengaruhi nilai porositas dimana ukuran partikel *carbon black* yang semakin kecil membuat *carbon black* sulit terdistribusi merata pada matriks dan cenderung membentuk pengelompokan atau aglomerasi^[14]. Hal ini semakin 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^[13]. 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^[4].

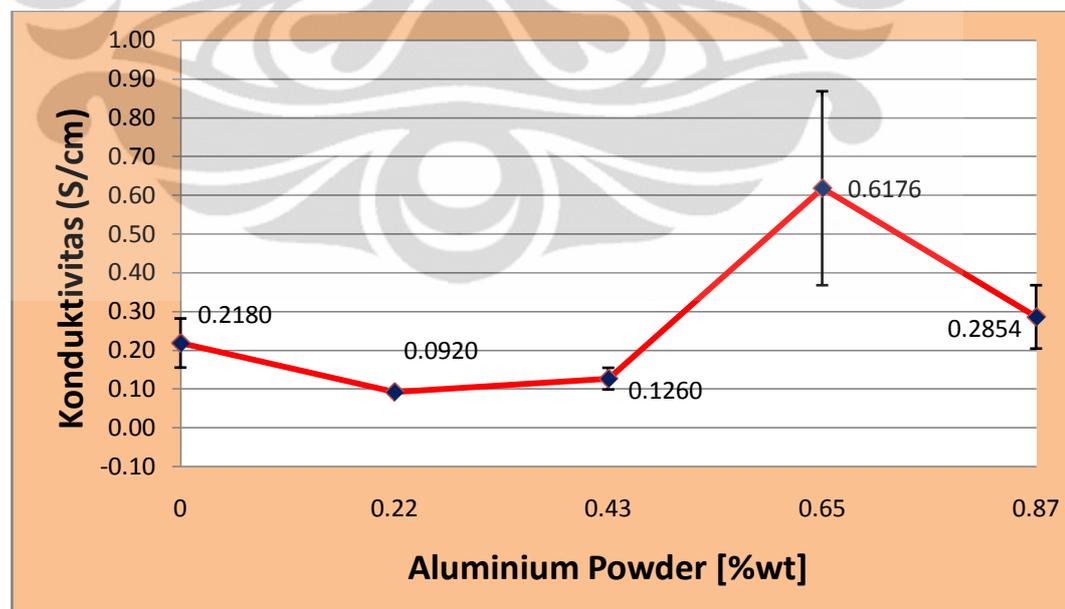
4.2.3 Hasil Pengujian Konduktivitas

Nilai konduktivitas menjadi fokus utama dalam pengembangan komponen pelat bipolar. Pelat bipolar dengan konduktivitas tinggi akan mampu mengalirkan arus listrik antar elektroda dengan baik. Sesuai dengan persyaratan yang ditunjukkan pada Tabel 2.3, maka sebuah pelat bipolar harus memiliki nilai konduktivitas listrik lebih dari 100 S/cm. Pengujian *four point probe* digunakan untuk mengukur resistivitas listrik pelat bipolar untuk dikonversi ke dalam nilai konduktivitas listrik. Pada Tabel 4.3 dapat dilihat hasil pengujian konduktivitas listrik dari pelat bipolar.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik

Aluminium Powder [%wt]	Konduktivitas [S/cm]
0.00	0.22
0.22	9.20×10^{-2}
0.43	0.13
0.65	0.62
0.87	0.29

Berdasarkan tabel 4.3 nilai konduktivitas listrik maksimum yang diperoleh adalah 0.62 S/cm. Nilai ini masih jauh dari standar DOE yaitu >100 S/cm. Kecenderungan nilai konduktivitas pada pelat bipolar yang ditambahkan *aluminium powder* adalah semakin meningkat seperti terlihat pada Gambar 4.5. Penambahan *aluminium powder* memang meningkatkan nilai konduktivitas pelat bipolar, namun tidak signifikan. Hal ini mungkin diakibatkan oleh makin meningkatnya porositas pada pelat bipolar. Namun hasil yang diperoleh lebih baik dari penelitian lain yang menggunakan grafit sintetis yaitu hingga 0,29 S/cm saja^[41].

Gambar 4.5 Pengaruh Peningkatan *Aluminium Powder* Terhadap Konduktivitas.

Daya pembasahan dan porositas pelat bipolar dapat menjadi parameter nilai konduktivitas listrik. Ketika daya pembasahan semakin baik, maka sifat mekanis dan konduktivitas listrik dari komposit dapat semakin meningkat. Distribusi *carbon black* yang tidak merata dan adanya porositas yang tinggi dapat meningkatkan nilai resistansi listrik. Apabila distribusi *carbon black* 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 yang lebih kecil tersebut^[30], sehingga dimungkinkan akan terjadi ketidakseragaman karakteristik yang dihasilkan dari keseluruhan bagian pelat bipolar yang dihasilkan.

Pada pembuatan komposit berbasis karbon dengan menggunakan *binder* 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^[4]. 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^[4]. 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^[4]. 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^[4].

4.2.4 Hasil Pengujian Fleksural

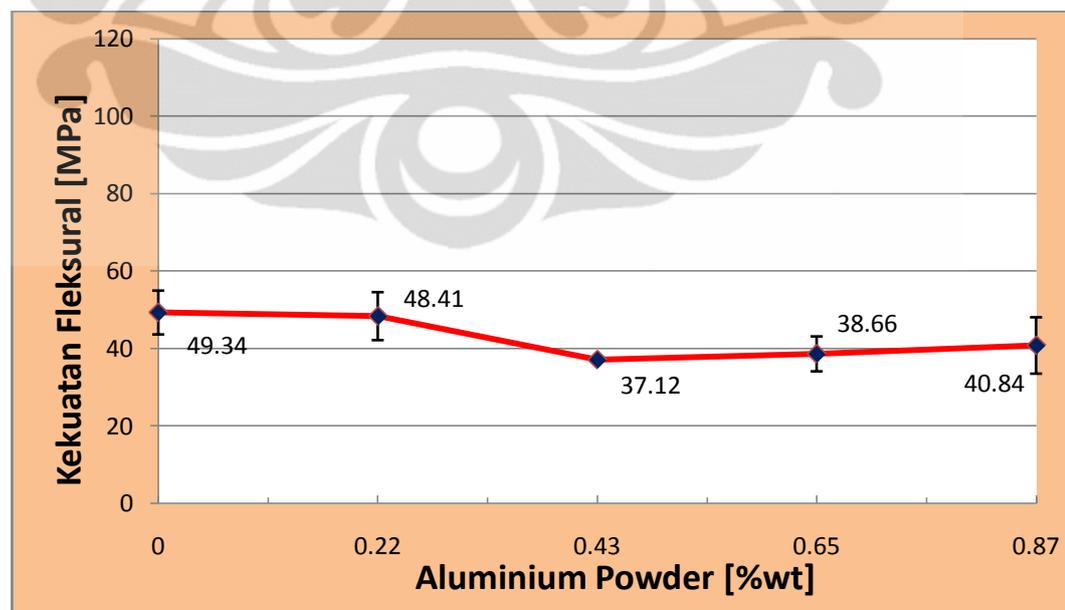
Pengujian fleksural dilakukan untuk mengetahui nilai ketahanan pelat bipolar terhadap beban tekan. Kekuatan fleksural diperlukan agar pelat bipolar dapat menahan tekanan dari gas, baik yang masuk maupun yang keluar dari sistem *fuel cell*, serta dapat menahan komponen lain (memperkuat struktur *fuel cell stack*) setelah dilakukan proses perakitan. Pada Tabel 4.4 dapat dilihat hasil

pengujian pengaruh variasi penambahan *aluminium powder* terhadap kekuatan fleksural pelat bipolar kelima sampel.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kekuatan Fleksural

Aluminium Powder [%wt]	Fleksural [MPa]
0.00	49.34
0.22	48.41
0.43	37.12
0.65	38.66
0.87	40.84

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa peningkatan jumlah *aluminium powder* membuat kekuatan fleksural cenderung menurun. Hal ini diakibatkan meningkatnya porositas dengan bertambahnya *aluminium powder*. Secara umum hampir secara keseluruhan, nilai kekuatan fleksural ini telah sesuai persyaratan teknis DOE, USA untuk karakteristik pelat bipolar, yaitu lebih besar dari 25 MPa. Hasil ini juga telah lebih baik dari penelitian yang menggunakan grafit sintesis yang memiliki kekuatan fleksural tertinggi 22, 72 MPa.



Gambar 4.6 Pengaruh Penambahan *Aluminium Powder* Terhadap Kekuatan Fleksural

Selain itu bila proses pencampuran tidak maksimal, pengelompokan *carbon black* dapat terjadi dimana partikel-partikel *carbon black* akan berkumpul pada daerah tertentu dan tidak tersebar secara merata sehingga meningkatkan ketidakhomogenan yang menyebabkan penurunan terhadap sifat mekanis pelat bipolar yang dihasilkan^[14].

4.3 Perbandingan Karakteristik Komposit Pelat Bipolar dengan Variasi Penambahan *Aluminium Powder*

Berdasarkan hasil karakterisasi pelat bipolar komposit yang ditinjau dari pengaruh variasi penambahan *aluminium powder*, maka didapatkan perbandingan sifat akhir seperti terlihat pada Tabel 4.5 berikut ini.

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

Aluminium Powder [%wt]	Karakteristik Pelat Bipolar			
	Densitas [gr/cm ³]	Porositas [%]	Konduktivitas [S/cm]	Kekuatan Fleksural [MPa]
0.00	1.73	0.55	0.22	49.34
0.22	1.44	0.57	9.20 x 10 ⁻²	48.41
0.43	1.68	0.56	0.13	37.12
0.65	1.75	0.65	0.62	38.66
0.87	1.70	0.73	0.29	40.84

Hasil karakterisasi tersebut memperlihatkan pengaruh penambahan *aluminium powder* terhadap sifat pelat bipolar komposit yang dihasilkan. Semakin banyak *aluminium powder* yang ditambahkan pada pembuatan pelat bipolar dengan metode *compression molding*, maka akan berpengaruh terhadap peningkatan dari nilai konduktivitas listrik, penurunan kekuatan fleksural, dan penurunan nilai densitas, serta peningkatan tingkat porositas dari pelat bipolar yang dihasilkan.

Tabel 4.5 menunjukkan bahwa karakteristik pelat bipolar komposit terbaik yang dihasilkan pada penelitian ini, yaitu dengan menggunakan penambahan *aluminium powder* sebesar 0.87 %wt. Pelat bipolar ini memiliki spesifikasi berat yang rendah (nilai densitas kurang dari 5 gr/cm³), porositas yang cukup kecil (kurang dari 1%), nilai fleksural yang cukup besar dan memenuhi target DOE, sebesar 25 MPa, serta nilai konduktivitas listrik tertinggi jika dibandingkan dengan pelat bipolar yang lain.



BAB 5

KESIMPULAN

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

1. Penambahan 0.65 %wt *aluminium powder* merupakan variasi paling optimum karena memiliki konduktivitas paling tinggi yaitu 0,65 S/cm, serta nilai densitas, porositas dan fleksural yang telah memenuhi standar DOE.
2. Densitas kelima pelat bipolar yang dihasilkan dengan variasi penambahan *aluminium powder* telah memenuhi standar DOE, USA, yaitu kurang dari 5 gr/cm³. Densitas terkecil yaitu 1,44 gr/cm³ pada penambahan 0,22 %wt *aluminium powder* dan terbesar 1,75 gr/cm³ pada penambahan 0,65 %wt *aluminium powder*.
3. Porositas minimum pada penambahan 0 %wt *aluminium powder* yaitu 0,55% dan maksimum pada penambahan 0,87 %wt *aluminium powder* yaitu 0.73%.
4. Konduktivitas listrik yang dihasilkan masih jauh dibawah standar DOE yaitu maksimal 0.65 pada penambahan 0.65 %wt *aluminium powder*.
5. Kekuatan fleksural keempat pelat bipolar yang dihasilkan dengan variasi penambahan 0-0,87 %wt *aluminium powder* hampir secara keseluruhan telah sesuai standar DOE, USA, yaitu lebih besar dari 25 Mpa. Nilai minimum 37,12 MPa pada penambahan 0,43 %wt *aluminium powder* dan maksimum 49,34 Mpa 0 %wt *aluminium powder*.

DAFTAR REFERENSI

- [1] US. Department of Energy, *Fuel Cell Handbook 7th Edition*, Morgantown, West Virginia: EG & G Technical Services Inc., 2004, p 1-10
- [2] Listiani, Eniya Dewi. *Mass Transfer Study On Polymer Electrolyte Fuel Cell*. 2007.
- [3] <http://www.teara.govt.nz/en/iron-and-steel/2/4> diakses pada 19 Juni 2011 pada pukul 04:31
- [4] L. Du, S.C. Jana, “Highly conductive epoxy/graphite composites for previous term bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells”, *Journal of power source* 172, 2007, p 734-741.
- [5] Wilkinson, David P. *Proton Exchange Membrane Fuel Cells : Materials Properties and Performance*, USA: Taylor & Francis Group, 2010, p. ix
- [6] Stambouli, A. Boudghene. *Journal: Fuel cells, an alternative to standard sources of energy*, Roma: E.Traversa University of Roma ‘Tor Vergata’, 2001.
- [7] S, Basu, ed. *Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology*, New Delhi: Anamaya Publisher, 2007
- [8] http://thefuelcellbuyersguide.com/about_fuel_cells.php, diakses pada tanggal 16 Juni 2011 pukul 04:16
- [9] Chris Rayment & Scott Sherwin. “*Introduction to Fuel Cell Technology*”, University of Notre Dame, 2003
- [10] Taufik Arya Bimanyu. Pengaruh Penambahan Tembaga Terhadap Sifat Mekanik Dan Konduktivitas Pelat Bipolar Komposit PP/C-Cu, Universitas Indonesia, 2009
- [11] Dhathathreyan, K. S.; Rajalakshmi, N.” *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*”, *Recent Trends in Fel Cell Science and Technology (Buku)*, New York: Springer, 2007, p 40-115
- [12] <http://majarimagazine.com/2007/10/fuel-cell-%E2%80%93-way-to-zero-pollution/> diakses pada tanggal 19 April 2011 pada pukul 03:53
- [13] Jalani, Nikhil H.. *Development of Nanocomposite Polymer Electrolyte Membranes for Higher Temperature PEM Fuel Cells*. Chemical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, 2006.

- [14] Cunningham, B.D., J. Huang, and D.G. Baird, *Review of Materials and Processing Methods Used in The Production of Bipolar Plates for Fuel Cells*, International Materials Reviews, 2007, p. 1-13.
- [15] <https://www.ticona-photos.com/PL/Forms/DispForm.aspx?ID=716> diakses pada 18 Juni 2011 pukul 16:15
- [16] V. Mehta dan J. S. Cooper, *Review and Analysis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing*, Jurnal of Power Sources, 2003
- [17] http://www.jobwerx.com/news/ticona_first_all-plastic_fuel_cell_news-id=946952.html diakses pada 19 Juni 2011 pada pukul 04:31
- [18] Xiao Zi Yuan, et al., ed. *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells – From Materials to Processing*. Vancouver: University of British Columbia, 2006, p 45-60
- [19] A. Helnzal. *Bipolar Plates*. Dulsburg : University of Dulsburg Essen, 2009.
- [20] Hermann, Allen, Tapas Chaudhuri, and Priscila Spagnol. *Journal: Bipolar plates for PEM Fuel Cells: A Review*. Elsevier International Journal of Hydrogen Energy, 2005.
- [21] Mikkola, Mikko. *Experimental Studies on Polymer Electrolyte membrane Fuel Cell Stacks*, Helsinki University of Technology, 2001.\
- [22] DOE Hydrogen Program. *Next Generation Bipolar Plates for Automotive PEM Fuel Cells*. Annual Progress Report. 2007
- [23] Callister, William D, Jr. *Material Science and Engineering: An Introduction (Sixth Edition)*. John Willey & Sons. 2004, p 557-667
- [24] *ASM Handbook Volume 21 Composite*. ASM Internasional. 2001
- [25] David P. Wilkinson. *Proton Exchange Membrane Fuel Cells : Materials Properties and Performance*. Taylor & Francis Group: USA, 2010
- [26] <http://pslc.ws/macrog/eposyn.htm> diakses pada 19 Juni 2011 pukul 21.40
- [27] <http://www.psrc.usm.edu/macrog/epoxy.htm> 5 diakses pada 19 Juni 2011 pukul 21.40
- [28] R.B. Mathur, et al. “*Effect of Different Carbon Fillers On The Properties of Graphite Composite Bipolar Plate*”. New Delhi: India. 2007.
- [29] Putra, Setiadi. *Skripsi: Pengaruh Tekanan Compression Molding terhadap Performa Pelat Bipolar Komposit Karbon EAF/Resin Epoksi dengan Komposisi 5% Carbon Black*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010.

- [30] Hsu-Chiang Kuan, Chen-Chi M. Ma, Ke Hong Chen, Shih-Ming Chen, “*Preparation, electrical, mechanical and thermal properties of composites bipolar plate for a fuel cell*”, *Journal of Power Sources* 134, 2004, p 7-17.
- [31] S.H. Liao et al, “*Preparation and properties of carbon nanotube/polypropylene nanocomposite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells*”, *Journal of Power Sources* 185, 2008, p 1225-1232.
- [32] Zhang Jie, Zou Yan-wen, He Jun, “*Influence of graphite particle size and its shape on performance of carbon composite bipolar plate*”, *Journal of Zhejiang University SCIENCE* 6A 10, 2005, p 1080-1083.
- [33] Kurniawan, Rio. *Skripsi: Perancangan Komposit Pelat Bipolar dengan Penambahan Polianilin untuk PEMFC*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010.
- [34] <http://www.carbonblack.jp/en/cb/tokusei.html> diakses pada tanggal 19 Juni 2011 pukul 00:14
- [35] <http://www.mindfiesta.com/methanol> diakses pada tanggal 19 Juni 2011 pukul 00:14
- [36] L.A. Dobrza_ski, M. Drak, J. Trzaska . “*Corrosion resistance of the polymer matrix hard magnetic composite materials Nd-Fe-B*” Gliwice: Institute of Engineering Materials and Biomaterials, Silesian University of Technology, 2005
- [37] Shivkalyan. A. Kanhegaokar. “*Studies On Conducting Polymers Synthesis And Characterization of Conducting Polymer Blends. Bharati Vidyapeeth Pune (Deemed University)*”, Division Of Polymer Science & Engineering. 2004
- [38] <http://en.hnyyly.com/newEbiz1/en371hnyylyres/images/common/pc/image006.jpg> diakses pada 19 Juni 2011 pukul 02:21
- [39] <http://www.favonius.com/soaring/additives/additive.htm> diakses pada 19 Juni 2011 pukul 03:00
- [40] Pham, Ha. Q. and Maurice J. Marks. *Epoxy Resin Vol. 9. Encyclopedia of polymer Science and Technology*, John Wiley & Sons, Dow Chemical, 2002
- [41] 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

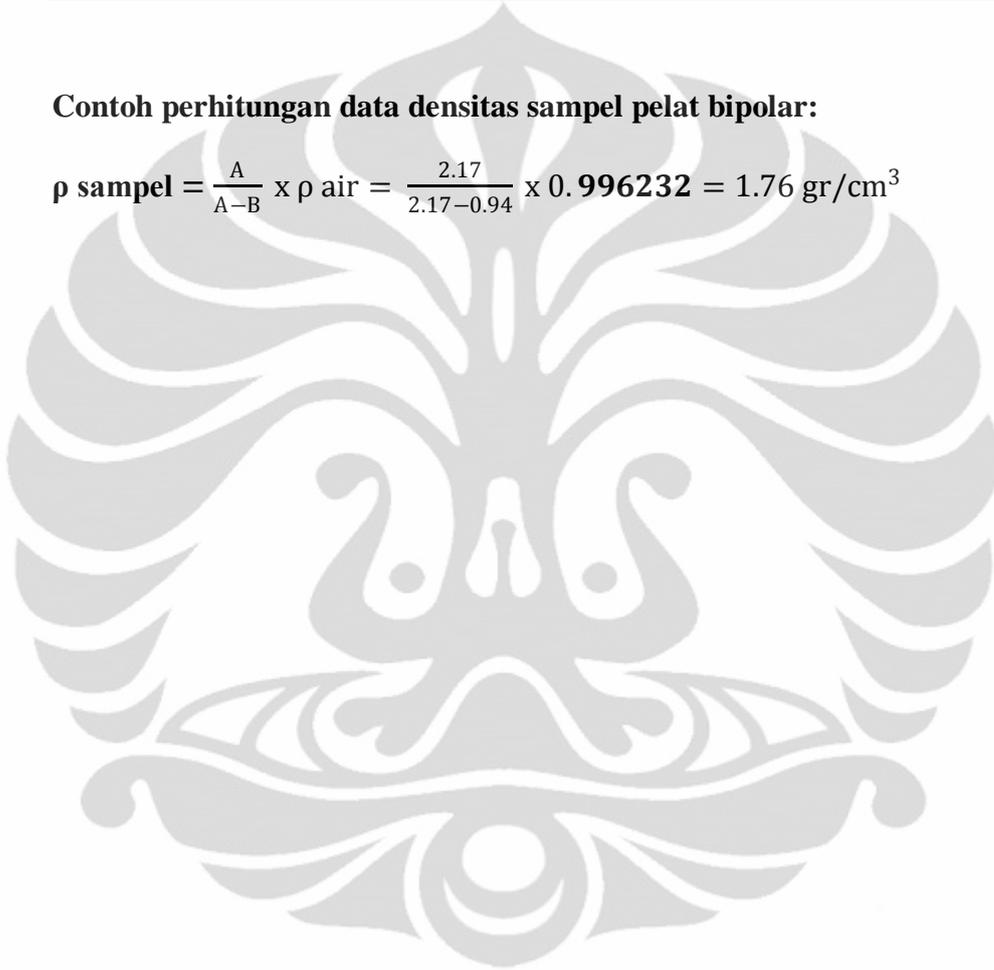
Lampiran 1. Hasil Pengujian Densitas

Sampel	Massa di Udara (A) [gr]	Massa dalam Air (B) [gr]	A-B [gr]	ρ Air [gr/cm ³]	ρ Sampel [gr/cm ³]	ρ Sampel Rata-Rata [gr/cm ³]	Aluminium [wt %]
				T = 28 ⁰ C			
1	2.17	0.94	1.23	0.996232	1.76	1.73	0
2	2.38	1	1.38	0.996232	1.72		
3	2.3	0.97	1.33	0.996232	1.72		
4	2.41	1.02	1.39	0.996232	1.73		
5	2.21	0.93	1.28	0.996232	1.72		
6	2.6	1.09	1.51	0.996232	1.72		
1	2.91	0.91	2	0.996232	1.45	1.44	0.22
2	2.90	0.91	1.99	0.996232	1.45		
3	2.87	0.88	1.99	0.996232	1.44		
4	2.92	0.88	2.04	0.996232	1.43		
5	2.96	0.91	2.05	0.996232	1.44		
6	3.02	0.96	2.06	0.996232	1.46		
1	2.08	0.86	1.22	0.996232	1.70	1.68	0.43
2	2.11	0.87	1.24	0.996232	1.70		
3	2.03	0.83	1.2	0.996232	1.69		
4	2.17	0.90	1.27	0.996232	1.70		
5	2.07	0.86	1.21	0.996232	1.70		
6	2.03	0.77	1.26	0.996232	1.61		
1	2.87	1.25	1.62	0.996232	1.76	1.75	0.65
2	2.81	1.22	1.59	0.996232	1.76		
3	2.6	1.1	1.5	0.996232	1.73		
4	2.75	1.15	1.6	0.996232	1.71		
5	2.72	1.18	1.54	0.996232	1.76		
6	2.84	1.23	1.61	0.996232	1.76		

1	2.95	1.25	1.7	0.996232	1.73	1.70	0.87
2	2.66	1.1	1.56	0.996232	1.70		
3	2.22	0.95	1.27	0.996232	1.74		
4	2.58	1.08	1.5	0.996232	1.71		
5	2.85	1.02	1.83	0.996232	1.55		
6	2.39	1.02	1.37	0.996232	1.74		

Contoh perhitungan data densitas sampel pelat bipolar:

$$\rho \text{ sampel} = \frac{A}{A-B} \times \rho \text{ air} = \frac{2.17}{2.17-0.94} \times 0.996232 = 1.76 \text{ gr/cm}^3$$



Lampiran 2. Hasil Pengujian Porositas

Sampel	Dry Weight (D) [gr]	Suspended Weight (S) [gr]	Saturated Weight (Sw) [gr]	Porositas [%]	Porositas Rata-Rata [%]	Aluminium [wt %]
1	2.15	0.93	2.16	0.82	0.55	0
2	2.28	1.03	2.28	0.00		
3	2.19	0.97	2.2	0.82		
1	2.85	1.12	2.86	0.58	0.57	0.22
2	2.82	1.08	2.83	0.57		
3	2.90	1.14	2.91	0.57		
1	2.08	0.88	2.09	0.83	0.56	0.42
2	2.07	0.89	2.08	0.85		
3	2.03	0.88	2.03	0.00		
1	2.84	1.26	2.85	0.63	0.65	0.65
2	2.81	1.22	2.82	0.63		
3	2.6	1.12	2.61	0.68		
1	2.47	1.09	2.48	0.72	0.73	0.87
2	2.53	1.12	2.54	0.71		
3	2.38	1.05	2.39	0.75		

Contoh perhitungan data porositas sampel pelat bipolar :

$$\% \text{Porositas} = \frac{Sw-D}{D-S} \times 100\% = \frac{2.16-2.15}{2.15-0.93} \times 100\% = 0.82\%$$

Lampiran 3. Hasil Pengujian Konduktivitas

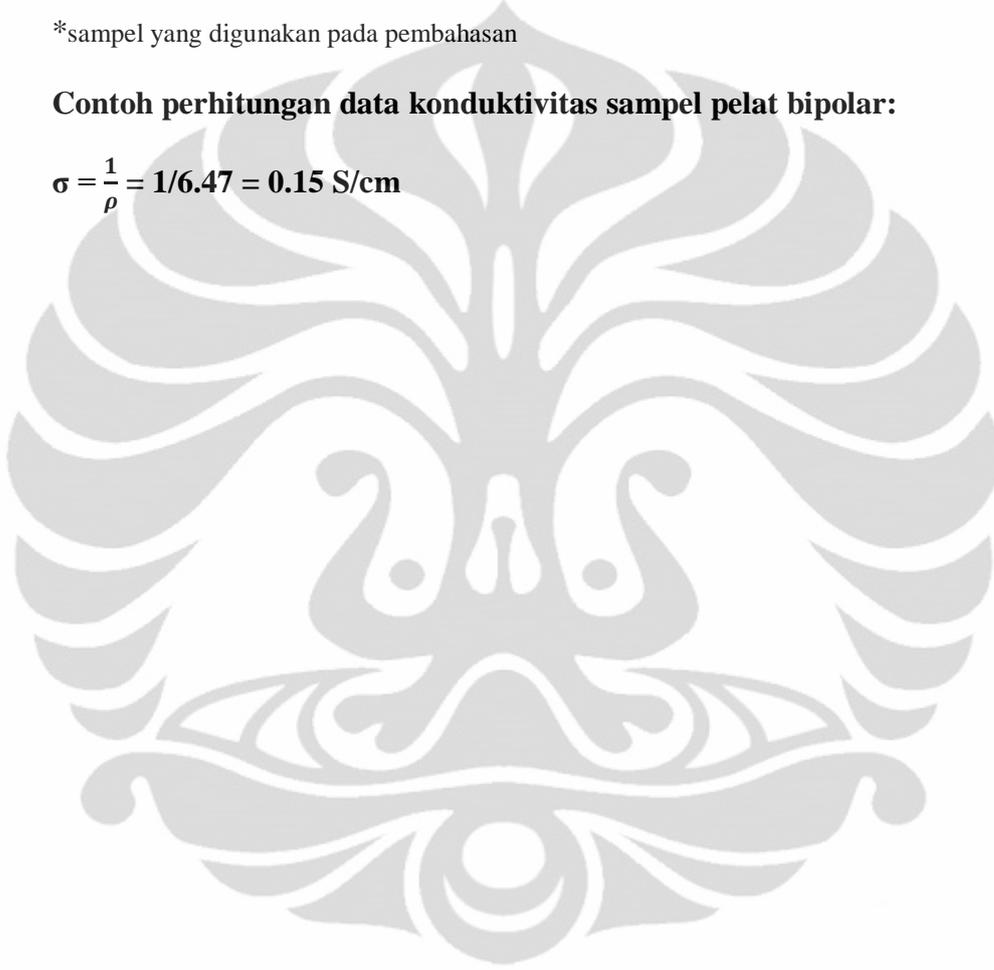
Sampel	Pengujian Resistensi [Ω .cm]	Konduktivitas [S/cm]	Konduktivitas Rata-Rata [S/cm]	Aluminium [wt %]
*1	5.30	0.19	0.22	0
*2	5.73	0.17		
*3	3.44	0.29		
4	0.36	2.78		
5	0.18	5.48		
6	2.77	0.36		
*1	10.91	9.16×10^{-2}	9.20×10^{-2}	0.22
*2	10.63	9.41×10^{-2}		
*3	11.08	9.03×10^{-2}		
4	11.11	9.00×10^{-2}		
5	14.05	7.12×10^{-2}		
6	17.91	0.58×10^{-2}		
*1	9.63	0.10	0.13	0.43
*2	6.35	0.16		
*3	8.58	0.12		
4	15.26	6.55×10^{-2}		
5	11.83	8.45×10^{-2}		
6	10.47	9.55×10^{-2}		
*1	1.36	0.73	0.62	0.65
*2	3.03	0.33		
*3	1.27	0.79		
4	19.27	5.19×10^{-2}		
5	11.38	8.79×10^{-2}		
6	10.47	9.55×10^{-2}		

*1	4.68	0.21	0.29	0.87
*2	2.67	0.37		
*3	3.73	0.27		
4	4.93	0.20		
5	6.96	0.14		
6	5.94	0.17		

*sampel yang digunakan pada pembahasan

Contoh perhitungan data konduktivitas sampel pelat bipolar:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = 1/6.47 = 0.15 \text{ S/cm}$$



Lampiran 4. Hasil Pengujian Fleksural

Sampel	Tebal (D)	Lebar (B)	Panjang (L)	Beban (P)	Kekuatan Fleksural [MPa]	Kekuatan Fleksural Rata-Rata [MPa]	Aluminium [wt %]
	[mm]	[mm]	[mm]	[N]			
A	3.4	15.2	120	44.80	45.89	49.34	0
B	3.2	15.2	120	40.00	46.26		
C	3.3	14.2	120	48.00	55.87		
A	3.00	13.00	120.00	35.20	54.15	48.41	0.22
B	3.00	13.00	120.00	32.00	49.23		
C	3.00	13.00	120.00	27.20	41.85		
A	3.00	12.80	120.00	24.00	37.50	37.12	0.43
B	3.00	13.00	120.00	24.00	36.92		
C	3.00	13.00	120.00	24.00	36.92		
A	3.8	14	120.00	38.40	34.19	38.66	0.65
B	3.6	14.4	120.00	40.00	38.58		
C	3.6	14.4	120.00	44.80	43.21		
A	3.00	13.00	120.00	24.00	36.92	40.84	0.87
B	3.00	13.00	120.00	32.00	49.23		
C	3.00	13.20	120.00	24.00	36.36		

Contoh perhitungan data fleksural sampel pelat bipolar :

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2BD^2} = \frac{3 \times 44.80 \times 120}{2 \times 15.2 \times 3.4^2} = 45.89 \text{ MPa}$$

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 crystallize under certain circumstances after longer storage. The crystallization can be removed by heating to 60-70 °C and stirring.

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

P.T. JUSTUS KIMARAYA
 JAKARTA

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

PT. Duster Kimia
JAWA BARA

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

Name & Specification Group

 GRAPHITE,ELECTRODE-D406X1800MM-20-46KA
 GRAPHITE ELECTRODE
 GRADE: ULTRA HIGH POWER (UHP)
 DIA.: 406 MM
 LENGTH: 1800 MM
 POROSITY: 15 - 26%
 BULK DENSITY: 1.66-1.72 GR/CM3
 RESISTANCE: 5.0-6.0 OHM/M
 THERMAL CONDUCTIVITY: 120-300 W/MK
 COMPRESIVE STRENGTH: 260-262 KG/CM2
 CURRENT CARRYING CAPACITY: 20-46 KA
 WEIGHT OF EACH SET POLE & NIPPLE: +/- 410KG
 ASH CONTENT'S: 0.5% MAX
 AVERAGE LINEAR COEFICIENT OF THERMAL EXPANS:
 (0.5-2.5)X0.000001/K
 COMPLETE WITH ACCESSORIES :
 - 3 EA NIPPLE TRANSPORT FOR 20 TON GRAPHITE ELECTRODE
 - PRESET LONG NIPPLE
 - 1 EACH ELASTIC CRANE SUSPENSION GEAR FOR ELECTRODE 16 IN
 MANUFACTURE :
 GENSUPP ELECTRODE-ARC-D406MMX1800MM-20-46KA

Lampiran 8. Spesifikasi Aluminium Powder

	
101056 Aluminium	
serbuk halus, distabilisasi sekitar 2% lemak	
07 April 2011	
Informasi produk	
Rumus kimia	Al
Kode HS	7603 20 00
Nomor EC	231-072-3
Massa molar	26.98 g/mol
Nomor indeks EC	013-002-00-1
Nomor CAS	7429-90-5
Data kimia dan fisika	
Temperatur penyalaaan	400 °C
Kelarutan di dalam air	(20 °C)
Titik leleh	660 °C
Massa molar	26.98 g/mol
Densitas	2.70 g/cm ³ (20 °C)
Titik didih	2467 °C
Informasi keselamatan berdasarkan GHS	
Hazard Statement(s)	H261: Bila kontak dengan air akan dilepaskan gas-gas yang mudah terbakar. H228: Zat padat yang mudah terbakar
Precautionary Statement(s)	P210: Jauhkan dari panas. P402 + P404: Simpan di tempat yang kering. Simpan di dalam wadah tertutup.
Signal Word	Bahaya
Hazard Pictogram (s)	

	
RTECS	BD0330000
Kelas penyimpanan	4.3 Bahan yang mem bentuk gas yang dapat terbakar jika kontak dengan air
WGK	NWG tidak berbahaya untuk air
Disposal	27 Residu mengandung logam mulia dapat didaur ulang. Kategori H
Informasi keselamatan kerja	
Frase R	R 11-15 Amat mudah-m menyala .Jika kena air, mem bebaskan gas yang amat sangat mudah-m menyala.
Frase S	S 43 Dalam kasus kebakaran, gunakan pasir. Jangan gunakan air.
Jenis-jenis bahaya	mudah terbakar
Hazard Symbol	 Flammable
Informasi Transportasi	
Pernyataan (jalur kereta api dan jalan raya) ADR, RRID	UN 1 396 Aluminium -Pulver, nicht überzogen, 4.3, II
Pernyataan (transportasi melalui laut) Kode-IMDG	UN 1 396 ALUMINIUM POWDER, UNCOATED, 4.3, II, Segregation Group : 15 (Powdered metals)
Pernyataan (transportasi melalui udara) IATA-DGR	UN 1 396 ALUMINIUM POWDER, UNCOATED, 4.3, II
Spesifikasi-spesifikasi	
Assay (complexometric)	≥ 90.0 %
Heavy metals (as Pb)	≤ 0.03 %
As (Arsenic)	≤ 0.0005 %
Fe (Iron)	≤ 1.0 %
Fat	passes test
<small>© Merck KGaA, Darmstadt, Germany, chemicals[at]merck.co.id, 2011</small>	

Lampiran 9. 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 10. Peralatan yang Digunakan Pada Penelitian

Nama Alat	Foto Alat
Beaker glass	
Planetary Ball Mill	
Mesin Pengguncang	

Timbangan Digital	
<i>Mixer</i>	
<i>Hot Plate Magnetic Stirring</i>	
<i>Cetakan Stainless Steel</i>	

Mesin Hot Press

