



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN *POLYANILINE* TERHADAP
KARAKTERISASI KOMPOSIT *EPOXY RESIN*/GRAFIT EAF
DAN *CARBON BLACK* SEBAGAI MATERIAL PELAT
BIPOLAR UNTUK *POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE
FUEL CELL***

SKRIPSI

**RIO KURNIAWAN
0606075246**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
DESEMBER 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN *POLYANILINE* TERHADAP
KARAKTERISASI KOMPOSIT *EPOXY RESIN* / GRAFIT EAF
DAN *CARBON BLACK* SEBAGAI MATERIAL PELAT
BIPOLAR UNTUK *POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE
FUEL CELL***

SKRIPSI

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

RIO KURNIAWAN

0606075246

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
DESEMBER 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Rio Kurniawan

NPM : 0606075246

Tanda Tangan :

Tanggal : 21 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Rio Kurniawan
NPM : 0606074640
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Penambahan *Polyaniline* terhadap Karakterisasi Komposit *Epoxy Resin/Grafit EAF* dan *Carbon Black* sebagai Material Pelat Bipolar untuk *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Ir. Yunita Sadeli, M.Sc ()

Pembimbing II : Bambang Pri Handoko ()

Penguji : Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia Syahrial, M.Sc ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 21 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan berkah, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul *“Pengaruh Penambahan Polyaniline terhadap Karakterisasi Komposit Epoxy Resin/Grafit EAF dan Carbon Black sebagai Material Pelat Bipolar untuk Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell”* yang merupakan salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Dalam rangka menyelesaikan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, bimbingan, dorongan, dan petunjuk dari berbagai pihak. Oleh sebab itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan dan terima kasih kepada :

1. Ir. Yunita Sadeli, M.Sc, dan Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, stamina, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini;
2. Kedua orang tua dan kakak penulis yang telah memberikan semangat dan bantuan baik dukungan moral dan material;
3. Andi Suhandi, S.Si. dan Pak Tomi Harianto dari Pusat Penelitian Fisika, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia yang telah menyediakan tempat, bahan baku serta alat, dan arahan dalam penelitian yang dilakukan oleh penulis;
4. Saudara Beringin Saputra, Dania Febriani, Farah Fauziah, Gabriel Sembiring, Kenya Diestha, Setiadi dan Desto selaku rekan penulis dalam penelitian ini;
5. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini jauh dari kesempurnaan, untuk itu kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sangat penulis harapkan untuk perbaikan dimasa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 21 Desember 2009

Penulis

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

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

Nama : Rio Kurniawan
NPM : 0606075246
Program Studi : Sarjana
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**PENGARUH PENAMBAHAN *POLYANILINE* TERHADAP
KARAKTERISASI KOMPOSIT *EPOXY RESIN*/GRAFIT EAF DAN
CARBON BLACK SEBAGAI MATERIAL PELAT BIPOLAR UNTUK
*POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL***

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 21 Desember 2009

Yang menyatakan

(Rio Kurniawan)

ABSTRAK

Nama : Rio Kurniawan
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : **Pengaruh Penambahan *Polyaniline* Terhadap Karakterisasi Komposit *Epoxy Resin*/Grafrit Eaf dan *Carbon Black* Sebagai Material Pelat Bipolar Untuk *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell***

Polymer electrolyte membrane fuel cell merupakan energi alternatif menjanjikan dikarenakan efisiensi tinggi dan emisinya rendah. Pelat bipolar merupakan komponen utama dari PEMFC yang hampir mempengaruhi seluruh berat dan harga dari sel. Pada penelitian ini, material untuk pelat bipolar adalah komposit polimer yang dibuat dengan *compression molding* pada temperatur 70°C, tekanan 300 kg/cm² selama 4 jam. *Epoxy resin* sebagai matrik komposit dicampurkan dengan grafit, 5% *carbon black* dan 50 mg, 100 mg, 150 mg, 200 mg *polyaniline* yang digunakan untuk meningkatkan konduktivitas listrik. Untuk mengetahui sifat mekanis pelat bipolar, dilakukan pengujian densitas, konduktivitas, fleksural, porositas dan SEM, serta EDS, sedangkan untuk sifat permukaan, dilakukan pengujian sudut kontak. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengaruh dari *polyaniline* sebagai polimer konduktif baru terlihat pada penambahan 200 mg, dimana memiliki konduktivitas 0,295 S/cm dan kekuatan fleksural 24, 549 MPa,.

Kata kunci :

polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC), pelat bipolar, grafit, *carbon black*, *polyaniline*, sifat mekanis, sifat permukaan.

ABSTRACT

Name : Rio Kurniawan
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Judul : **The Influence of Polyaniline Addition on Characterization of Composite Epoxy Resin/Grafit EAF and Carbon Black as Bipolar Plate Material for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)**

Polymer electrolyte membrane fuel cell is a promising alternative energy because of high efficiency and low emission. Bipolar plate is a major component of PEMFC, which takes large portion of cell volume and cost. In this study, material fo bipolar palte is polymer composite were fabricated by compression molding at temperature 70 °C, pressure 300 kg/cm² for 4 hours. Epoxy resin as composite matrix mixed with graphite, 5 % carbon black and 50 mg, 100 mg, 150 mg, 200 mg polyaniline, were used for increasing the electric conductivity. Mechanical properties of bipolar plate were identified by density, conductivity, flexural, porosity, SEM and EDS testing, whereas for surface properties, contact angle were tested. The results show that polyaniline as conducting polymer would be affected at 200 mg addition, which has conductivity 0,295 S/cm and flexural strength 24,549 MPa.

Keywords :
polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC), bipolar plate, graphite, carbon black, polyaniline, mechanical properties, surface properties.

DAFTAR ISI

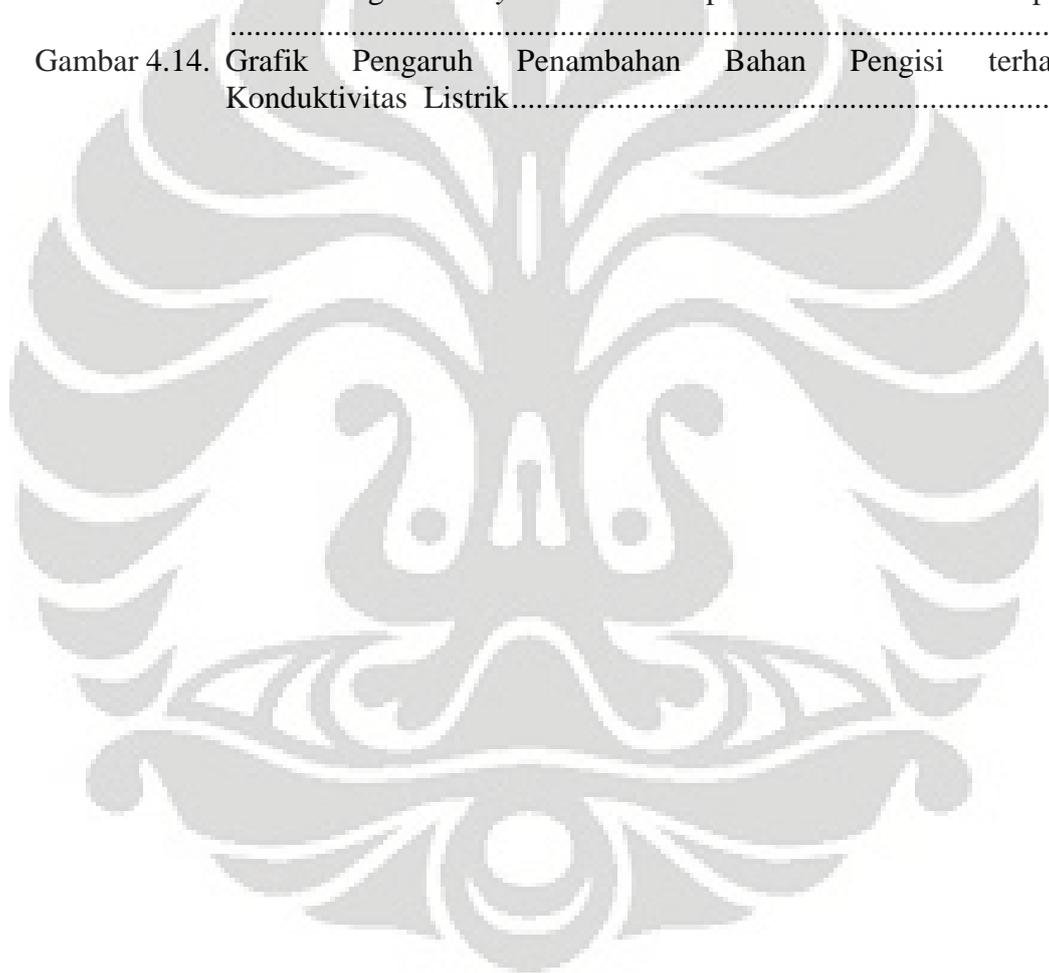
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	6
1.5 Sistematika Penulisan.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Sel Bahan Bakar (Fuel Cell).....	8
2.1.1 Sejarah Sel Bahan Bakar.....	9
2.1.2 Jenis – Jenis Sel Bahan Bakar.....	9
2.2 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)	12
2.2.1 Prinsip Dasar PEMFC.....	13
2.2.2 Struktur Sistem PEMFC	15
2.2.2.1 Membran elektrolit.....	16
2.2.2.2 Elektroda	16
2.2.2.3 Gas Diffusion Layer (GDL)	17
2.2.2.4 Pelat Bipolar.....	17
2.3. Fungsi Pelat Bipolar pada PEMFC	18
2.3.1 Jenis - Jenis Pelat Bipolar	20
2.3.1.1 Pelat Bipolar Grafit	21
2.3.1.2 Pelat Bipolar Logam	22
2.3.1.3 Pelat Bipolar Komposit.....	23
2.4 Komposit	24
2.4.1 Sifat Material Komposit.....	26
2.5 Pelat Bipolar Komposit Polimer – Karbon.....	29
2.6 Material Pelat Bipolar Komposit Polimer	31
2.6.1 Epoxy Resin	32
2.6.2 Grafit Limbah Dapur Busur Listrik (<i>Electric Arc Furnace</i>).....	34
2.6.3 Carbon Black	37
2.6.4 Polimer Konduktif	40
2.6.4.1 <i>Polyaniline</i> (PANI)	41

2.6.5 Toluene	44
2.6.6 Metanol	44
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	46
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	46
3.2 Alat dan Bahan	47
3.2.1 Peralatan	47
3.2.2 Bahan	47
3.3 Proses Pembuatan Pelat Bipolar.....	50
3.3.1 Proses Penghalusan Grafit	50
3.3.2 Komposisi Pelat Bipolar	50
3.3.3 Proses Pencampuran	51
3.3.4 Proses Pencetakan.....	52
3.3.5 Proses Pembuatan Sampel Uji	53
3.4 Proses Karakterisasi Pelat Bipolar	54
3.4.1 Pengamatan Sudut Kontak.....	54
3.4.2 Pengujian Konduktivitas.....	55
3.4.3 Pengujian Densitas.....	57
3.4.4 Pengujian Porositas.....	58
3.4.5 Pengujian Fleksural.....	60
3.4.6 Pengamatan Scanning Electron Microscopy dan EDS	62
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	63
4.1 Pengamatan Sudut Kontak	63
4.2 Pengamatan Visual	64
4.3 Pengujian Densitas	67
4.4 Pengujian Porositas	69
4.5 Pengujian Fleksural	71
4.6 Pengamatan Scanning Electron Microscope dan EDS	73
4.7 Pengujian Konduktivitas	77
4.8 Perbandingan Pelat Bipolar	80
BAB V KESIMPULAN	81
DAFTAR PUSTAKA	82
LAMPIRAN.....	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Jumlah Produksi dan Konsumsi Minyak di Indonesia (1994-2004)	1
Gambar 1.2	Distribusi Massa untuk <i>Stack</i> PEMFC	3
Gambar 2.1	Reaksi Anoda dan Katoda dari Jenis Sel Bahan Bakar	11
Gambar 2.2	Mekanisme Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell	14
Gambar 2.3	Struktur Sistem PEMFC	15
Gambar 2.4	Pelat Bipolar	17
Gambar 2.5	Klasifikasi Material Pelat Bipolar	20
Gambar 2.6	Parameter dari Fasa Terdispersi	27
Gambar 2.7	Daya Pembasahan Berdasar Sudut Kontak	28
Gambar 2.8	Kesetimbangan Tiga Tegangan Permukaan Kondisi Wetting Tetes Cairan pada Permukaan Padat	28
Gambar 2.9	Ikatan Antarmuka	29
Gambar 2.10	Ikatan Interfasa	29
Gambar 2.11	Pengaruh Jumlah Grafit terhadap Densitas (a), Kekuatan Tekan (b) dan Porositas (c)	31
Gambar 2.12	Reaksi Pembentukan Epoxy	32
Gambar 2.13	Reaksi antara Epoxy Resin dan Hardener	33
Gambar 2.14	Struktur Kristal Grafit	34
Gambar 2.15	Proses Peleburan Besi dan Baja	35
Gambar 2.16	Pengaruh Jumlah Grafit terhadap Resistansi Listrik	36
Gambar 2.17	Struktur dari <i>Carbon Black</i>	38
Gambar 2.18	Skema <i>Carbon Black</i> dalam Matriks Polimer pada Komposit	39
Gambar 2.19	Pengaruh Penambahan <i>Carbon Black</i>	40
Gambar 2.20	Struktur dan Jenis <i>Polyaniline</i>	42
Gambar 2.21	Struktur Kimia dari Toluene	44
Gambar 2.22	Struktur dari Metanol	44
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	46
Gambar 3.2	Proses <i>Mixing</i> dari <i>Polyaniline</i> dan <i>Epoxy Resin</i>	51
Gambar 3.3	Hasil <i>Mixing</i>	52
Gambar 3.4	Hasil <i>Mixing</i> dalam Cetakan (Kiri) dan Penempatan di Mesin <i>hot press</i> (Kanan)	53
Gambar 3.5	Sampel Uji Porositas	53
Gambar 3.6	Sampel Uji Fleksural	54
Gambar 3.7	Sampel Pengamatan SEM dan EDS	54
Gambar 3.8	Metode Pengukuran untuk Sudut Kontak (a) $>90^\circ$ dan (b) $<90^\circ$	55
Gambar 3.9	Skema mesin <i>four probe test</i>	56
Gambar 3.10	Mesin Veeco FPP 5000 - <i>four point probe test</i>	56
Gambar 3.11	Penimbangan sampel di udara (kiri) dan di air (kanan)	58
Gambar 3.12	Sampel direbus pada $T = 100^\circ\text{C}$	59
Gambar 3.13	Skema Pengujian Fleksural	60
Gambar 3.14	Proses Uji Fleksural	61
Gambar 4.1	Sudut Kontak antara Pelat Bipolar dengan Penambahan PANI a) 50 mg, b) 100 mg, c) 150 mg dan d) 200 mg	63
Gambar 4.2	Pelat Bipolar 1 dengan Penambahan <i>Polyaniline</i> 50 mg	65

Gambar 4.3.	Pelat Bipolar 2 dengan Penambahan Polyaniline 100 mg.....	65
Gambar 4.4.	Pelat Bipolar 3 dengan Penambahan <i>Polyaniline</i> 150 mg.....	66
Gambar 4.5.	Pelat Bipolar 3 dengan Penambahan <i>Polyaniline</i> 200 mg.....	66
Gambar 4.6.	Grafik Pengaruh Komposisi <i>Polyaniline</i> terhadap Densitas Pelat Bipolar	68
Gambar 4.7.	Grafik pengaruh Komposisi <i>Polyaniline</i> terhadap % Porositas	70
Gambar 4.8.	Grafik Pengaruh Penambahan <i>Polyaniline</i> terhadap Kekuatan Fleksural	72
Gambar 4.9.	Hasil SEM Pelat Bipolar Penambahan 50 mg PANI.....	73
Gambar 4.10.	Hasil SEM Pelat Bipolar Penambahan 100 mg PANI	74
Gambar 4.11.	Hasil SEM Pelat Bipolar Penambahan 150 mg PANI	74
Gambar 4.12.	Hasil SEM Pelat Bipolar Penambahan 200 mg PANI	74
Gambar 4.13.	Grafik Pengaruh <i>Polyaniline</i> terhadap Konduktivitas Pelat Bipolar	78
Gambar 4.14.	Grafik Pengaruh Penambahan Bahan Pengisi terhadap Konduktivitas Listrik.....	79



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Kelebihan dari Sel Bahan Bakar	8
Tabel 2.2. Jenis – jenis sel bahan bakar dan karakteristik.....	10
Tabel 2.3. Energi dan Efisiensi dari Beberapa Sistem Konversi Energi.....	11
Tabel 2.4. Karakteristik Pelat Bipolar	19
Tabel 2.5. Kelebihan dan Kekurangan dari Material Pelat Bipolar	21
Tabel 2.6. Sifat Material Komposit.....	25
Tabel 2.7. Perbandingan Nilai Konduktivitas dari Material Pelat Bipolar	30
Tabel 2.8. Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel dari Grafit	37
Tabel 2.9. Klasifikasi Proses Manufaktur dan Penggunaan dari <i>Carbon Black</i> ...	37
Tabel 2.10. Sifat Umum <i>Carbon Black</i> ANK EC600 JD	38
Tabel 2.11. Jenis dan Sifat dari Polimer Konduktif.....	40
Tabel 2.12. Sifat Umum Toluene	44
Tabel 2.13. Sifat Umum Metanol.....	45
Tabel 3.1. Komposisi dari Pelat Bipolar	51
Tabel 4.1. Data Uji Densitas	67
Tabel 4.2. Data Uji Porositas.....	69
Tabel 4.3. Data Uji Fleksural	71
Tabel 4.4. Unsur – Unsur pada Pelat Bipolar dengan 200 mg PANI.....	76
Tabel 4.5. Data Uji Konduktivitas.....	77
Tabel 4.7. Perbandingan Sifat Komposit.....	80

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Hasil Pengujian Konduktivitas	85
Lampiran 2	Hasil Pengujian Densitas	86
Lampiran 3	Hasil Pengujian Porositas	87
Lampiran 4	Hasil Pengujian Flexural	88
Lampiran 5	Tabel Densitas Air (simetric.co.uk).....	89
Lampiran 6	Hasil Pengamatan SEM.....	91
Lampiran 7	Hasil Pengamatan EDS.....	93
Lampiran 8	Contoh Perhitungan Sudut Kontak.....	94
Lampiran 9	Gambar Alat Preparasi Sampel dan Karakterisasi.....	99
Lampiran 10	Gambar Alat Karakterisasi pelat Bipolar	101
Lampiran 11	Spesifikasi Epoxy Resin	103
Lampiran 12	Spesifikasi Epoxy Hardener	104
Lampiran 13	Spesifikasi Grafit EAF PT. Krakatau Steel	105
Lampiran 14	Spesifikasi <i>Polyaniline</i> , Metanol dan <i>Toluene</i>	107

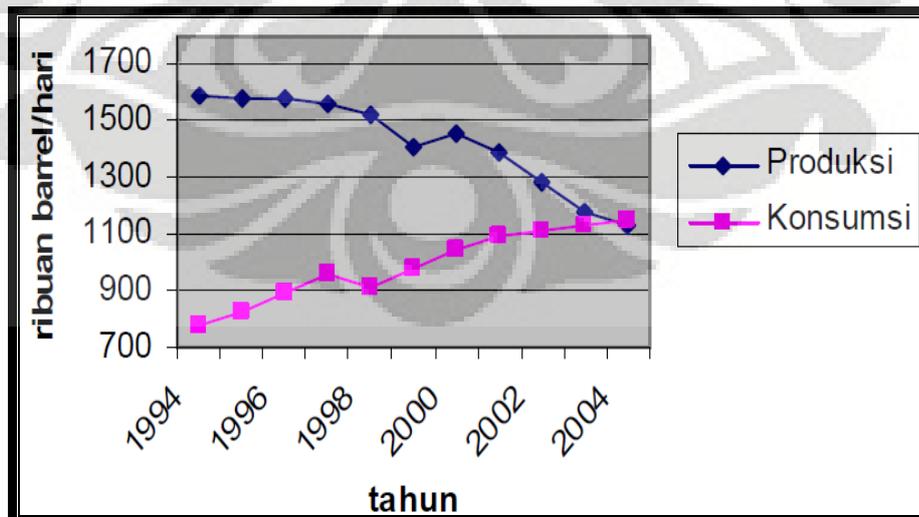


BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini, energi menjadi salah satu permasalahan yang sedang dihadapi oleh seluruh negara di dunia, termasuk di Indonesia. Permasalahan yang terjadi dikarenakan berkurangnya pasokan listrik sebagai akibat dari berkurangnya ketersediaan bahan bakar fosil, terutama minyak mentah. Menurut data BP *Statistical Review of World Energy* 2005, jumlah cadangan minyak (*proved reserves*) Indonesia pada akhir tahun 1984 sebesar 9,6 milyar barrel, sedangkan pada akhir tahun 1994, cadangan minyak terus berkurang hingga menjadi 5 milyar barrel dan 4,7 milyar barrel pada akhir tahun 2004 [1]. Dengan menipisnya cadangan minyak, tentunya akan mengurangi jumlah minyak yang dihasilkan, begitu juga dengan produksi listrik. Pada tahun 1994 jumlah minyak yang diproduksi di Indonesia sebesar 1.589.000 barrel per hari (bph). Selanjutnya pada tahun 1995, jumlah produksi minyak di Indonesia mengalami penurunan sekitar 11.000 bph. Penurunan ini terus terjadi tiap tahunnya hingga tahun 2004, dimana pada tahun ini jumlah produksi minyak hanya sebesar 1.126.000 bph [2]. Keadaan ini sangat berbanding terbalik terhadap jumlah konsumsi minyak, seperti yang terlihat pada gambar 1.1 [2].



Gambar 1.1. Jumlah Produksi dan Konsumsi Minyak di Indonesia (1994 – 2004)

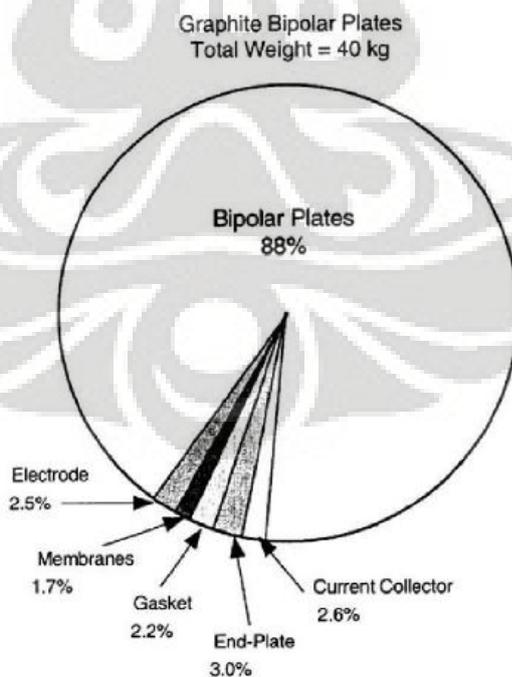
Jumlah permintaan energi yang terus meningkat tiap tahunnya, namun tidak diimbangi dengan sumber daya alam yang memadai, mengakibatkan terjadinya lonjakan harga di sektor energi berbasis minyak mentah, seperti pada tahun 2004 dimana harga minyak dunia berkisar pada angka USD 22 per barrel dan pada akhir tahun 2004, angka tersebut mengalami peningkatan pada kisaran USD 50 sampai USD 55 per barrel. Hal ini akan sangat berpengaruh terhadap seluruh kegiatan manusia dan industri, terutama dalam sistem transportasi dan permesinan yang harus didukung oleh ketersediaan energi, sebagaimana yang telah dijelaskan oleh Sanusi dalam bukunya yang berjudul “Potensi Ekonomi Migas Indonesia”, yaitu mengenai pemakaian kebutuhan BBM di empat sektor utama pada tahun 1998/1999, diantaranya adalah sektor angkutan yang mengkonsumsi sebanyak 25,5 juta kilo liter BBM, sektor industri (15,3 juta kilo liter), sektor PLN dan non-PLN (11,9 juta kilo liter) dan sektor rumah tangga (8,5 juta kilo liter) [2].

Kondisi tersebut jelas tidak baik bagi kelangsungan hidup masyarakat Indonesia, sehingga sudah saatnya diperlukan langkah – langkah strategis di bidang kebijakan energi, yaitu dengan mengembangkan suatu energi alternatif yang terbaharukan dan salah satunya adalah energi berbahan dasar gas hidrogen, biasanya dikenal sebagai sel bahan bakar (*fuel cell*). Dalam teknologinya, gas hidrogen menjadi bahan yang paling diminati karena gas ini mampu diubah menjadi energi listrik dengan hasil samping hanya berupa air dan panas. Selain itu, sel bahan bakar (*fuel cell*) juga mempunyai potensi sebagai sumber energi pada sistem transportasi karena efisiensi energi yang lebih tinggi dan menghasilkan gas emisi yang jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan bahan bakar minyak.

Sampai saat ini sudah terdapat enam jenis sel bahan bakar (*fuel cell*) yang dibedakan berdasarkan pada elektrolit yang digunakan dan kondisi operasi (suhu dan tekanan) sel. Keenam sel tersebut ialah Polymer Electrolyte Membrane fuel cell (PEMFC), Alkali Fuel Cell (AFC), Molten Carbonat Fuel Cell (MCFC), Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC), Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) dan Direct Methanol-Ethanol Fuel Cell (DMFC/DEFC) [3].

Diantara 6 jenis sel bahan bakar (*fuel cell*), *polymer electrolyte membrane fuel cell* (PEMFC) paling banyak mendapatkan perhatian di seluruh negara. Hal ini dikarenakan PEMFC memiliki kelebihan dibandingkan mesin konvensional, yaitu sel ini menggunakan elektrolit padat yang mudah dibuat dan efisiensi tenaga hampir dua kali lipat dibandingkan dengan efisiensi mesin konvensional. Kelebihan lain dari jenis sel bahan bakar ini adalah hasil reaksi elektrokimia hanya air (zero emission), tidak ada masalah korosi, masa pakai mencapai 11.000 jam, ramah lingkungan, tidak bising, tidak mengeluarkan gas beracun, dapat beroperasi pada suhu rendah, menggunakan bahan bakar sumber hidrogen secara langsung, dan memiliki densitas yang rendah [4].

Pada *polymer electrolyte membrane fuel cell* (PEMFC) terdapat beberapa komponen penting, antara lain: pelat bipolar, pelat penutup, membran electrolite assembly (MEA) dan penyimpan arus. Dari keempat komponen tersebut, kebanyakan penelitian sebelumnya mengarah kepada pelat bipolar dikarenakan komponen ini hampir mempengaruhi 80% volume, 70% berat dan 60% biaya produksi dari sel bahan bakar [5]. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada gambar 1.2 [6].



Gambar 1.2. Distribusi Massa untuk *Stack* PEMFC

Besarnya pengaruh pelat bipolar terhadap sistem sel bahan bakar menyebabkan perlunya perbaikan dan pengembangan desain dari komponen pelat bipolar dengan tujuan untuk mengurangi volume, berat dan biaya produksi. Salah satu cara yang banyak dikembangkan saat ini adalah dengan mengembangkan suatu material baru berupa komposit berbasis polimer termoset, mengingat sifat polimer yang memiliki densitas yang rendah dan harga relatif lebih murah. Dalam pengembangan material ini, juga perlu diperhatikan sifat dan kemampuan yang dihasilkan dari sel bahan bakar, terutama pelat bipolar dikarenakan fungsi pelat ini sangat penting, yaitu sebagai penghubung elektrik antara dua elektroda dengan kutub yang berbeda sehingga dibutuhkan suatu material yang memiliki konduktivitas tinggi [5].

Oleh karena itu, penelitian ini ditujukan untuk mencari dan mengembangkan komposisi yang tepat dari material komposit berbasis polimer termoset yang dapat menghasilkan nilai konduktivitas yang tinggi, sifat mekanik dan performa yang baik dari pelat bipolar sehingga dapat mudah dibuat dan dikembangkan serta digunakan pada berbagai aplikasi.

1.2 Perumusan Masalah

Dalam penelitian ini, akan dikembangkan pelat bipolar dengan menggunakan material komposit berbasis polimer dikarenakan memiliki beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan material logam dan keramik, yaitu polimer memiliki densitas yang sangat rendah, mudah dibentuk, dan tahan korosi [7]. Disini, polimer yang digunakan adalah epoxy resin yang merupakan salah satu jenis polimer termoset. Disamping harganya yang murah dan mudah diproses, polimer ini juga memiliki sifat mekanis dan termal yang sangat baik, diantaranya ketahanan terhadap korosi yang tinggi dan memiliki *shrinkage* yang rendah ketika mengalami proses *curing* [8].

Pelat bipolar sendiri memiliki syarat utama, yaitu memiliki konduktivitas listrik yang tinggi ($>100 \text{ S/cm}^2$) sehingga dapat mengalirkan arus listrik dari anoda ke katoda sel. Untuk dapat mencapai syarat tersebut, maka perlu dilakukan

penambahan material ke dalam matriks polymer, dimana salah satunya adalah dengan penambahan polimer konduktif sehingga diharapkan dapat meningkatkan konduktifitas dari matriks polimer. Polimer konduktif yang dipilih adalah *polyaniline*, dimana polimer ini lebih stabil terhadap lingkungan dan memiliki sifat elektrik yang baik. Selain konduktivitas, sifat mekanis dari pelat bipolar juga perlu diperhatikan, dimana menurut *Department of Energy (DOE) USA*, pelat bipolar harus memiliki kekuatan tarik $> 41\text{MPa}$ dan kekuatan fleksural $> 25\text{ MPa}$ [8]. Untuk mencapai sifat mekanis yang diinginkan, maka diperlukan penambahan material lain, seperti *carbon black*, dan grafit EAF yang berfungsi sebagai penguat (*reinforcement*) dalam polimer matriks komposit.

Untuk mendapatkan sifat maksimum dari pembuatan pelat bipolar dengan menggunakan polimer matriks komposit, maka pertama kali harus diketahui komposisi yang tepat dari material yang digunakan. Proses pencampuran dari setiap material yang digunakan juga akan menentukan sifat mekanis dari pelat bipolar yang dihasilkan sehingga dibutuhkan interaksi yang baik antar material pembentuk dengan tujuan untuk mendapatkan campuran yang homogen. Semakin baik homogenitas yang dihasilkan, maka semakin baik distribusi dari material pembentuk serta semakin baik pula sifat mekanis yang dihasilkan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian secara khusus, antara lain:

- a. mengetahui komposisi yang tepat antara *epoxy resin*, *polyanilin*, *carbon black* dan grafit EAF.
- b. mengetahui efek dan sifat fisik maupun mekanis yang dihasilkan dari penambahan *polyanilin* pada pelat bipolar.
- c. mengetahui karakteristik dari pelat bipolar setelah dilakukan beberapa pengujian tertentu.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Dalam pembuatan pelat bipolar pada sistem PEMFC, pengetahuan mengenai karakteristik dan sifat dari material penyusunnya adalah sangat penting. Material polimer yang digunakan sebagai matriks dari komposit pelat bipolar adalah epoksi resin, yang akan diperkuat (*reinforce*) oleh material keramik yaitu grafit EAF dan *carbon black*. Pada penelitian ini, akan dilakukan beberapa tahapan dengan tujuan untuk mendapatkan komposisi yang tepat dalam pembuatan pelat bipolar.

Adapun langkah – langkah tersebut antara lain :

- a. Pencampuran *polyanilin*, epoxy resin, grafit EAF dan *carbon black*.
- b. Pembuatan bakalan yang kemudian dilakukan proses *hot pressing* pada temperatur 70°C dan tekanan 300 kg/cm² selama 4 jam.
- c. Pembuatan sampel

Pengujian terhadap sampel – sampel yang telah dibuat guna mengetahui sifat elektrik dan mekanik serta permeabilitas gas dari pelat bipolar. Pengujian tersebut, antara lain uji fleksural, uji konduktivitas, uji porositas, dan uji densitas, serta pengamatan SEM (*Scanning Electron Microscope*).

Penelitian ini lebih difokuskan pada pencarian komposisi yang tepat dari *polyanilin* sebagai aditif yang dapat meningkatkan konduktivitas dari pelat bipolar yang kemudian dicampur dengan *carbon black* optimum [9] yang diperoleh dari penelitian sebelumnya. Dalam penelitian ini, penambahan aditif *polyanilin* dilakukan dalam kadar yang sedikit, yaitu pada rentang 50 mg, 100 mg, 150 mg, dan 200 mg, mengingat nilai ekonomis dari pembuatan pelat bipolar, sehingga dapat dikatakan bahwa dengan kadar yang sedikit, maka dapat diketahui sejauh mana pengaruh aditif *polyanilin* terhadap sifat pelat bipolar yang dihasilkan.

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 peneletian.

Bab 2 : Tinjauan Pustaka

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

Bab 3 : Metodologi Penelitian

Pada bab ini berisi prosedur penelitian, 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 : Penutup

Bab ini berisikan kesimpulan akhir berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian ini

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Bahan Bakar (Fuel Cell)

Sel bahan bakar merupakan suatu alat konversi energi yang dapat menghasilkan tenaga listrik dan panas secara elektrokimia dengan menggunakan bahan bakar gas hidrogen dan oksigen yang umumnya berasal dari udara. Pada prinsipnya, sel bahan bakar hampir sama dengan baterai, dimana di dalam sistemnya terdapat dua buah elektroda yang dipisahkan oleh elektrolit. Namun, dalam sel bahan bakar tidak memerlukan sistem pengisian ulang, seperti yang dilakukan pada teknologi baterai dimana energi akan dihasilkan apabila bahan bakar terus diberikan [3].

Sel bahan bakar mempunyai beberapa kelebihan, yaitu memiliki efisiensi energi yang jauh lebih tinggi daripada sistem konversi energi konvensional dan performa yang dihasilkan juga lebih baik. Hasil sampingan dari sel ini hanya berupa bahan bakar yang teroksidasi, yaitu air dikarenakan sumber energi yang digunakan adalah hidrogen dan juga sistem ini menggunakan sedikit komponen dan desain yang modular sehingga memudahkan dalam proses pemeliharaannya. Densitas yang tinggi membuat ukuran dari sel menjadi lebih kecil dan tidak menimbulkan suara ketika beroperasi sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi, seperti alat – alat elektronik dan kendaraan [10]. Tabel 2.1 merupakan kelebihan dari sel bahan bakar dibandingkan penghasil energi lainnya.

Tabel 2.1. Kelebihan dari Sel Bahan Bakar [11]

Parameter	Gas Electric	Microturbine	Diesel Electric	Fuel Cell
Tingkat Suara	Tinggi	Sedang	Tinggi	Rendah
Percobaan Suara	Dibutuhkan	Dibutuhkan	Dibutuhkan	Tidak Dibutuhkan
Efisiensi	20%	24%	32%	90%

Dalam prosesnya, sel bahan bakar memiliki keterbatasan pada sumber gas yang akan digunakan, yaitu gas hidrogen mengingat jumlahnya di udara sangat sedikit dibandingkan gas oksigen (sekitar 20%). Elektrolit yang digunakan juga menjadi kendala, terutama elektrolit cair yang dapat mengakibatkan korosi dan yang paling penting adalah material dari sel bahan bakar masih mahal sehingga belum banyak diproduksi.

2.1.1 Sejarah Sel Bahan Bakar

Awalnya, prinsip dari teknologi sel bahan bakar dikemukakan pada tahun 1838 oleh ilmuwan Jerman, Christian Friedrich Schönbein dan pada bulan Februari 1839, untuk pertama kalinya sel bahan bakar dipertunjukkan oleh Sir William Robert Grove dengan mencampurkan gas hidrogen dan oksigen dalam suatu elektrolit yang menghasilkan energi listrik dan air. Teori ini kemudian dilanjutkan oleh Francis T. Bacon di tahun 1930 yang menggunakan katalis platina dalam sel bahan bakar hidrogen – oksigen dengan elektrolit alkaline dan elektroda nikel yang dapat menghasilkan energi listrik hingga 5 kW [10].

Pada tahun 1955, W. Thomas Grubb, ilmuwan kimia yang bekerja untuk perusahaan *General Electric* (GE), memodifikasi desain dari sel bahan bakar dengan menggunakan membran pertukaran ion *sulphonate polystyrene* sebagai elektrolit. Tiga tahun berikutnya, Leonard Niedrach, ilmuwan kimia GE lainnya, melakukan pengendapan platina pada membran, yang berfungsi sebagai katalis untuk reaksi reduksi oksigen dan oksidasi hidrogen dan tahun 1959, tim Harry Ihrig dapat menciptakan sel bahan bakar dengan tenaga 15 kW [12].

Tahun 1990, Ballard yang merupakan perusahaan pembuat sel bahan bakar, mengaplikasikan sel tersebut pada prototipe bis dengan menggunakan bahan bakar hidrogen. Hingga saat ini, sel bahan bakar telah digunakan pada transportasi, alat – alat elektronik dan pusat pembangkit listrik [11].

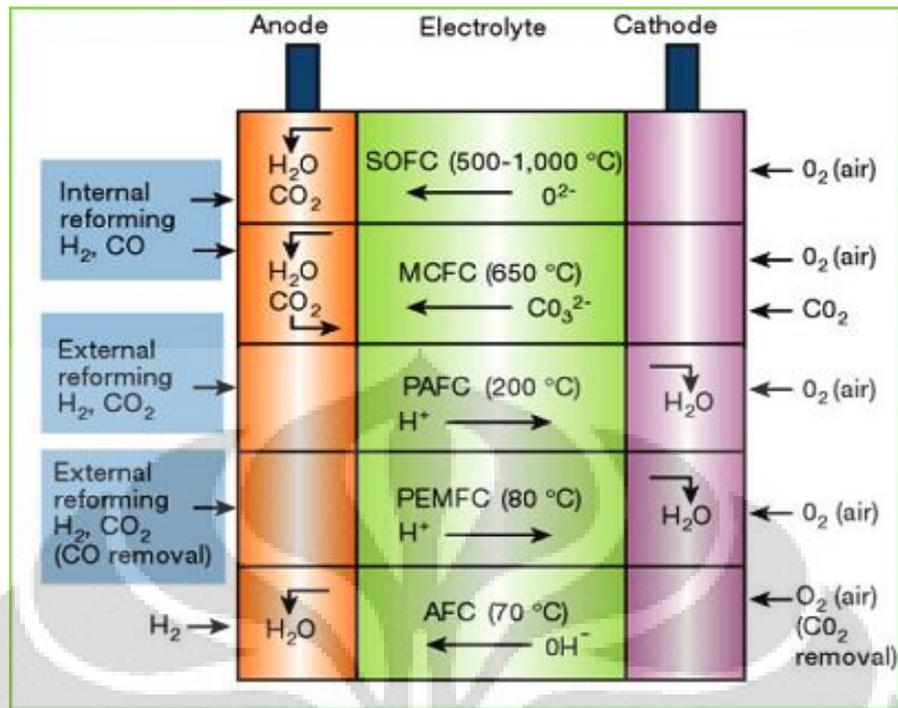
2.1.2 Jenis – Jenis Sel Bahan Bakar

Sampai saat ini, sel bahan bakar sudah dikelompokkan menjadi lima jenis sel berdasarkan elektrolit yang digunakan, seperti yang terlihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Jenis – jenis sel bahan bakar dan karakteristik [3]

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	Hydrated Polymeric Ion Exchange Membranes	Mobilized or Immobilized Potassium Hydroxide in asbestos matrix	Immobilized Liquid Phosphoric Acid in SiC	Immobilized Liquid Molten Carbonate in LiAlO_2	Perovskites (Ceramics)
Electrodes	Carbon	Transition metals	Carbon	Nickel and Nickel Oxide	Perovskite and perovskite / metal cermet
Catalyst	Platinum	Platinum	Platinum	Electrode material	Electrode material
Interconnect	Carbon or metal	Metal	Graphite	Stainless steel or Nickel	Nickel, ceramic, or steel
Operating Temperature	40 – 80 °C	65°C – 220 °C	205 °C	650 °C	600-1000 °C
Charge Carrier	H^+	OH^-	H^+	CO_3^{2-}	O^-
External Reformer for hydrocarbon fuels	Yes	Yes	Yes	No, for some fuels	No, for some fuels and cell designs
External shift conversion of CO to hydrogen	Yes, plus purification to remove trace CO	Yes, plus purification to remove CO and CO_2	Yes	No	No
Prime Cell Components	Carbon-based	Carbon-based	Graphite-based	Stainless-based	Ceramic
Product Water Management	Evaporative	Evaporative	Evaporative	Gaseous Product	Gaseous Product
Product Heat Management	Process Gas + Liquid Cooling Medium	Process Gas + Electrolyte Circulation	Process Gas + Liquid cooling medium or steam generation	Internal Reforming + Process Gas	Internal Reforming + Process Gas

Dari tabel diatas, dapat dilihat bahwa kelima jenis sel bahan bakar menggunakan sumber energi yang berbeda dan menghasilkan emisi yang berbeda pula jika digunakan untuk bahan bakar hidrokarbon. Akibatnya, reaksi yang terjadi pada anoda dan katoda dari masing – masing sel pun tidak sama, sesuai dengan bahan bakar yang digunakan dan untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1. Reaksi Anoda dan Katoda dari Jenis Sel Bahan Bakar [13]

Dalam aplikasinya, sel bahan bakar menghasilkan energi yang cukup besar dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sistem energi lainnya, misalnya *reciprocating engines*, *biomass-based generators*, sistem photovoltaic, *wind turbines*, dan *micro-turbines*. Pada Tabel 2.3 dibawah ini terlihat bahwa *reciprocating engines* memiliki energi paling besar sekitar 50 kW – 6 MW, namun efisiensi yang dihasilkan lebih rendah dari *solid oxide fuel cell* (SOFC), yaitu 45 – 65%.

Tabel 2.3. Energi dan Efisiensi dari Beberapa Sistem Konversi Energi [3]

Type	Size	Efficiency, %
Reciprocating Engines	50 kW – 6 MW	33 – 37
Micro turbines	10 kW – 300 kW	20 – 30
Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	50 kW – 1 MW	40
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	5 kW – 3 MW	45 – 65
Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM)	<1 kW – 1 MW	34 – 36
Photovoltaics (PV)	1 kW – 1 MW	NA
Wind Turbines	150 kW – 500 kW	NA
Hybrid Renewable	<1 kW – 1 MW	40 – 50

2.2 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Jenis sel bahan bakar ini menggunakan membran pertukaran ion (mis: *fluorinated sulfonic acid polymer*) sebagai elektrolit yang merupakan konduktor proton paling baik. Cairan dalam sel bahan bakar ini hanya berupa air sehingga permasalahan korosi dapat diminimalisasikan. Biasanya, elektroda karbon dan katalis platina digunakan sebagai anoda dan katoda.

Pengaturan air dalam membran sangat penting untuk menghasilkan performa yang efisien, sehingga sel harus dioperasikan dibawah kondisi dimana air yang dihasilkan tidak menguap lebih cepat dibandingkan proses pembuatannya karena membran harus terhidrasi. Akibatnya, temperatur operasi dari PEMFC kurang dari 100°C, biasanya sekitar 60 – 80°C, dan karena terdapat permasalahan dalam keseimbangan air, maka digunakan gas yang kaya akan H₂ dengan sedikit atau tidak mengandung CO [3].

Mulanya, sistem PEMFC dikembangkan pada tahun 1950-an oleh perusahaan *General Electric* (GE) untuk pelengkap sumber energi untuk misi Gemini. Pada tahun 1966 GE berhasil membuat elektrolit PEMFC dengan menggunakan membran *perfluorinated sulfonic acid ionomer*. Teknologi ini terus berkembang hingga tahun 1980-an dimana platina digunakan sebagai elektroda dan di awal tahun 1990-an berhasil dibuat elektroda lapisan tipis [10].

Keuntungan :

PEMFC mempunyai elektrolit padat yang menyediakan ketahanan yang baik terhadap gas lain. Temperatur operasi yang rendah membuat sel ini dapat bereaksi lebih cepat sehingga meminimalkan adanya unsur penyebab korosi. Kerapatan arus yang dihasilkan PEMFC dapat mencapai 2 kW/l dan 2 W/cm² [3].

Kekurangan :

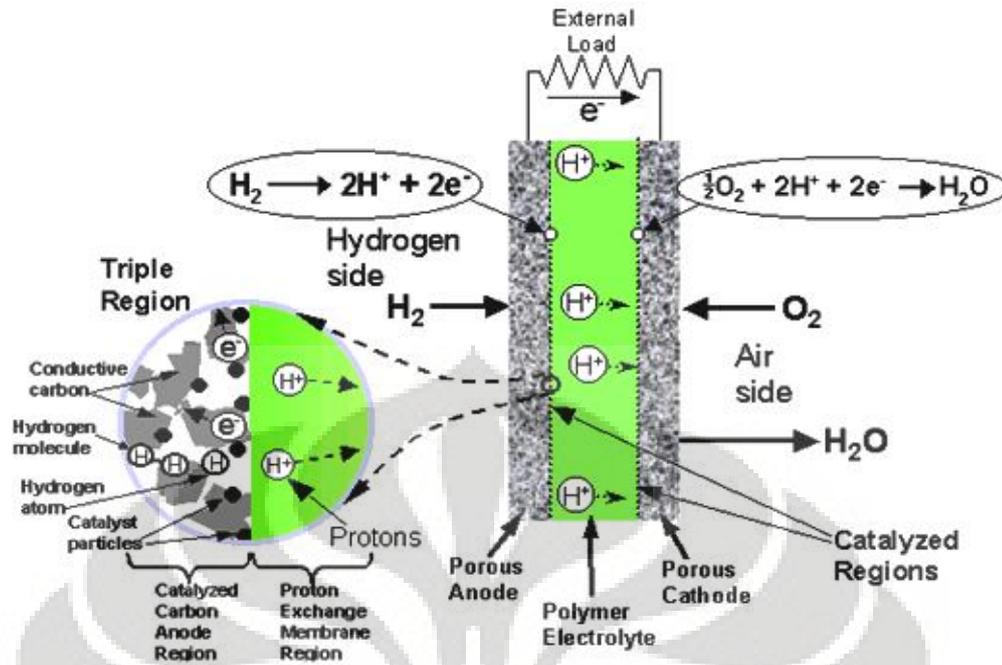
Temperatur operasi yang rendah membuat pengaturan panas menjadi sulit, khususnya pada rapat arus yang tinggi. Selain itu, PEMFC sangat sensitif terhadap unsur CO, sulfur dan amonia. Permasalahan ini dapat dihindari dengan mengurangi rapat arus yang digunakan dan meningkatkan katalis elektroda [3]. Sel ini juga mengalami keterbatasan terhadap bahan bakar yang digunakan, yaitu

hidrogen, mengingat kadar H_2 di udara cukup rendah dan biaya pembuatannya pun masih mahal sehingga perlu pengembangan desain dan material [14].

2.2.1 Prinsip Dasar PEMFC

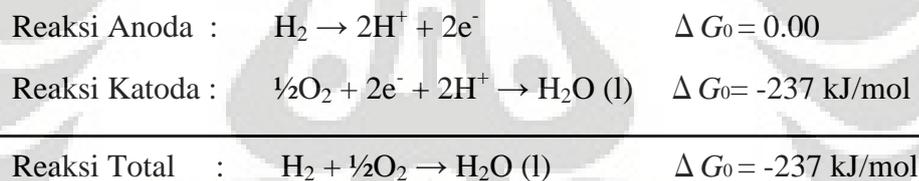
PEMFC dapat dibagi menjadi dua kelompok berdasarkan bahan bakar yang digunakan, yaitu sel bahan bakar hidrogen dan sel bahan bakar metanol langsung. Sel bahan bakar hidrogen menggunakan gas H_2 sebagai bahan bakar dan mempunyai performa dan tingkat efisiensi sel yang sangat baik, sedangkan sel bahan bakar metanol langsung menggunakan metanol cair sebagai bahan bakar dengan performa dan efisiensi sel yang cukup rendah dan menghindari penggunaan unsur penghasil hidrogen [15]. Prinsip dasar dari sistem PEMFC sangat sederhana, yaitu hidrogen dan oksigen akan bereaksi menghasilkan air dan pada saat yang bersamaan juga membangkitkan energi listrik dan panas.

Pada prosesnya, gas hidrogen yang bertekanan masuk ke dalam sisi anoda dari sel bahan bakar. Gas ini kemudian dialirkan melalui katalis dengan memberikan tekanan. Molekul H_2 akan terpecah menjadi dua H^+ dan dua elektron (e^-) setelah bersentuhan dengan logam platina di katalis [8]. 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 sel dan dipergunakan untuk menghasilkan energi listrik [15]. Sementara itu di sisi katoda, gas oksigen yang merupakan oksidan paling umum digunakan karena tingkat ketersediaan dan nilai ekonomisnya cukup baik, akan dialirkan melalui katalis dan membentuk dua atom oksigen dimana masing – masing atom mempunyai satu pasang elektron dan menarik dua ion H^+ melalui membran sehingga akan bereaksi menghasilkan molekul air (H_2O). Reaksi ini dalam sel bahan bakar tunggal hanya menghasilkan 0,7 Volts dari energi listrik sehingga perlu dilakukan peningkatan dengan mengkombinasikan komponen – komponen sel membentuk suatu tumpukan sel bahan bakar [8]. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 2.2 yang merupakan mekanisme dari sistem PEMFC.



Gambar 2.2. Mekanisme Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell [16]

Adapun reaksi kimia yang terjadi pada sel bahan bakar adalah sebagai berikut [15] :



Energi bebas Gibbs yang dihasilkan dari reaksi anoda dan katoda sal diatas mempunyai korelasi dengan tegangan yang akan dihasilkan pada sel [15] :

$$\Delta G = -n F E_0 \quad (2.1)$$

Dimana n adalah jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi, F adalah konstanta Faraday, dan E_0 adalah tegangan sel untuk kesetimbangan thermodinamika tanpa adanya arus yang mengalir, misalnya kesetimbangan pada kondisi sirkuit terbuka.

Oleh karena itu, tegangan sel pada kesetimbangan, E_0 , pada temperatur 25°C untuk sel bahan bakar hidrogen dapat dihitung dari persamaan [15] :

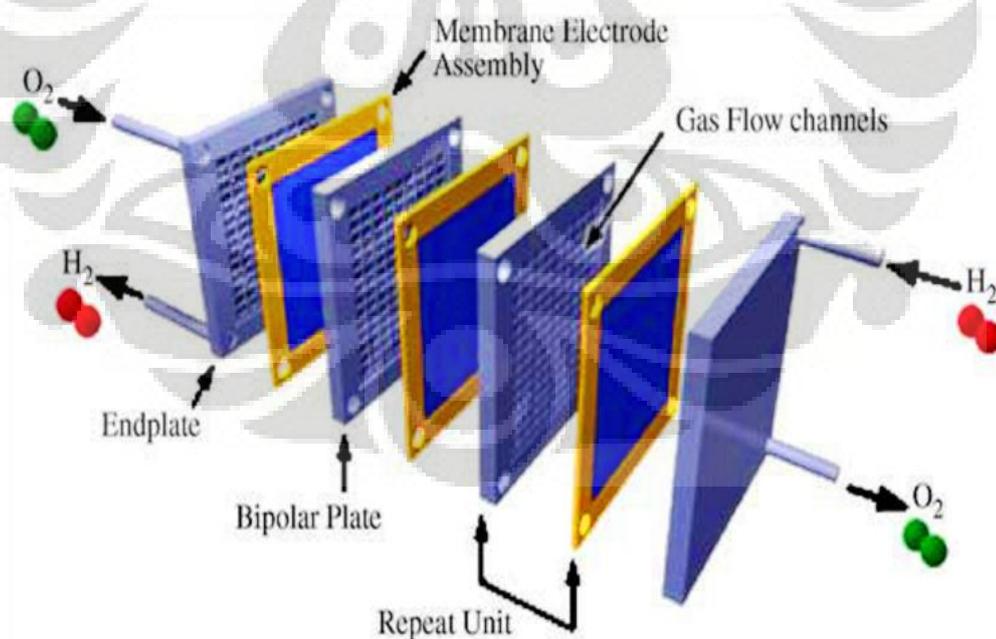
$$E_0 = \frac{-\Delta G}{nF} = 1,23V \quad (2.2)$$

Nilai tegangan sel pada kesetimbangan ini adalah perbedaan dari potensial kesetimbangan elektroda antara katoda dan anoda.

Secara teoritis, substansi apapun yang mempunyai kemampuan oksidasi kimia dapat digunakan sebagai bahan bakar pada anoda sel bahan bakar. Pada katoda, cairan apapun yang dapat tereduksi secara sempurna juga dapat digunakan sebagai oksidan. Akan tetapi, harga, ketersediaan, dan reaktivitas menjadi pertimbangan dalam penggunaannya dalam aplikasi sel [15].

2.2.2 Struktur Sistem PEMFC

Sel bahan bakar tunggal memiliki keterbatasan dalam tegangan yang dihasilkan, biasanya kurang dari 1 Volt. Agar supaya menghasilkan tegangan yang lebih besar untuk dapat digunakan pada beberapa aplikasi, maka beberapa unit sel harus dihubungkan dalam suatu susunan berupa tumpukan dari sel bahan bakar karena tegangan yang dihasilkan akan bergantung pada jumlah unit sel dalam suatu tumpukan. Gambar 2.3 merupakan struktur dari sistem *polymer electrolyte membrane fuel cell* (PEMFC)



Gambar 2.3. Struktur Sistem PEMFC [16]

2.2.2.1 Membran elektrolit

Membran ini membolehkan proton mengalir melalui sisi katoda, namun memisahkan molekul hidrogen dan oksigen dan kemudian mencegah terjadinya pembakaran langsung. Membran juga berfungsi sebagai penyekat elektronik diantara pelat bipolar.

Biasanya membran elektrolit harus terhidrasi agar proton menjadi lebih konduktif dan karena penggunaan temperatur operasi sel bahan bakar dibawah titik lebur dari air, maka membran akan mengalami gangguan. Konduktivitas dari membran sangat sensitif terhadap kontaminasi unsur lain, sebagai contoh ketika membran bersentuhan dengan pengotor logam, maka ion logam akan berdifusi kedalam membran dan menggantikan proton sebagai sumber energi, akibatnya konduktivitas dari membran menjadi lebih rendah [10].

Material penyusun membran sangat penting untuk diperhatikan karena harus dapat mengalirkan proton ke sisi katoda, sehingga material membran harus memenuhi persyaratan sebagai berikut [17] :

- a) Memiliki kestabilan terhadap reaksi kimia yang baik
- b) Memiliki *machinability* yang baik (memungkinkan untuk dilakukan pembentukan partikel hingga berukuran 50 μm)
- c) Bersifat asam
- d) Memiliki kemampuan menyerap air yang baik (sifat hidrofilik)
- e) Merupakan konduktor proton (H^+) yang baik ketika terhidrasi

2.2.2.2 Elektroda

Semua reaksi elektrokimia terjadi pada permukaan elektroda. Untuk mempercepat terjadinya reaksi sel, elektroda harus mengandung partikel katalis, biasanya platina atau logam mulia karena dapat menyediakan jalur proton yang baik dan meningkatkan *solubility* proton. Temperatur operasi dan pH yang rendah membuat penggunaan katalis menjadi sangat penting, khususnya ketika reaksi reduksi oksigen pada katoda [10].

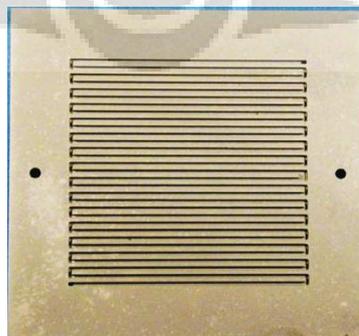
Elektroda terdiri dari platina berukuran nano (sekitar 3-5nm) yang didukung oleh partikel karbon (30 mikron) dan dicampur dengan material ionomeric proton. Di setiap bagian atas kisi elektroda terdapat kisi difusi gas dengan tebal 100 – 300 μm yang terbuat dari karbon berpori [15].

2.2.2.3 Gas Diffusion Layer (GDL)

Dalam sistem PEMFC, membran elektrolit terletak diantara *flow field plate* dan di setiap sisi dari membran, antara elektroda dan *flow field plate*, terdapat kisi difusi gas. Kisi ini menyediakan energi listrik yang mengalir diantara elektroda dan pelat bipolar dan kemudian menyebarkan reaktan ke elektroda. Kisi difusi gas juga menghasilkan air di permukaan elektroda terluar. Bahan utama dari kisi adalah material konduktif berpori, biasa digunakan *carbon cloth* atau *carbon paper*. Substrat terlebih dahulu diberi perlakuan dengan *fluoropolymer* dan *carbon black* dengan tujuan untuk memperbaiki pengaturan air dan sifat elektrik [10].

2.2.2.4 Pelat Bipolar

Komponen yang memiliki fungsi utama dalam sistem PEMFC adalah pelat bipolar dikarenakan memiliki fungsi ganda, yaitu mengalirkan gas ke *gas diffusion layer* melalui *flow channel* dan mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda [11]. Pelat bipolar banyak mendapat perhatian dari kalangan ilmuwan karena beratnya hampir mempengaruhi 70-90% berat sel dan harga komponennya dapat mencapai 30-60% dari harga total sehingga perlu diperhatikan penggunaan dan pengembangan dari material serta desain pelat bipolar. Gambar 2.4 merupakan contoh dari pelat bipolar.



Gambar 2.4. Pelat Bipolar

2.3. Fungsi Pelat Bipolar pada PEMFC

Dalam susunan sel bahan bakar, pelat bipolar memisahkan gas yang ada pada sel, mengalirkan arus listrik dan juga berperan sebagai penyokong struktur dari sel. Pelat bipolar mempunyai *flow channel* di kedua sisinya, yang membentuk kutub anoda dan katoda yang saling berlawanan pada sisi pelat. Dalam sel tunggal, pelat pemisah hanya memiliki *flow channel* pada satu sisi, biasa dinamakan pelat monopolar [10].

Adanya dua kutub pada pelat, membuat fungsi pelat bipolar menjadi lebih kompleks, yaitu [14]:

- a) mampu untuk membawa elektron menuju sirkuit, termasuk:
 - mengumpulkan dan mengalirkan elektron dari anoda dan katoda
 - menghubungkan komponen sel membentuk susunan sel bahan bakar yang menghasilkan suatu tegangan
- b) menyediakan garis aliran untuk mengalirkan gas secara merata ke seluruh elektroda,
- c) memisahkan oksidan dan gas bahan bakar, dan mengangkut gas H₂ menuju anoda dan gas O₂ menuju katoda yang kemudian menghasilkan air,
- d) menyediakan kekuatan mekanik dan ketangguhan yang baik agar dapat menyokong membran dan elektroda,
- e) menyediakan konduksi termal untuk mengatur temperatur bahan bakar dan melepaskan panas dari elektorda ke bagian pendingin.

Banyaknya fungsi pelat bipolar, maka material yang dibutuhkan untuk membentuk suatu pelat bipolar harus memenuhi kriteria sebagai berikut [18] :

- a) memiliki permeabilitas yang baik
- b) memiliki kekuatan yang baik sehingga dapat menyokong komponen lainnya
- c) dapat diproses dengan mudah
- d) memiliki berat dan volum yang rendah sehingga dapat digunakan pada transportasi
- e) memiliki ketahanan pada temperatur sekitar 80°C dan

Dikarenakan fungsi pelat bipolar yang dapat mengalirkan arus listrik, maka material pelat harus mempunyai konduktivitas yang tinggi dan dapat mengalirkan gas. Sebaiknya material yang digunakan juga memiliki ketahanan korosi yang baik karena kondisi penggunaan dari pelat bipolar, yaitu pada keadaan asam ($\text{pH} < 5$) cenderung akan membentuk suatu lapisan oksida dan lapisan ini akan mengganggu katalis serta dapat meningkatkan ketahanan listrik dari pelat.

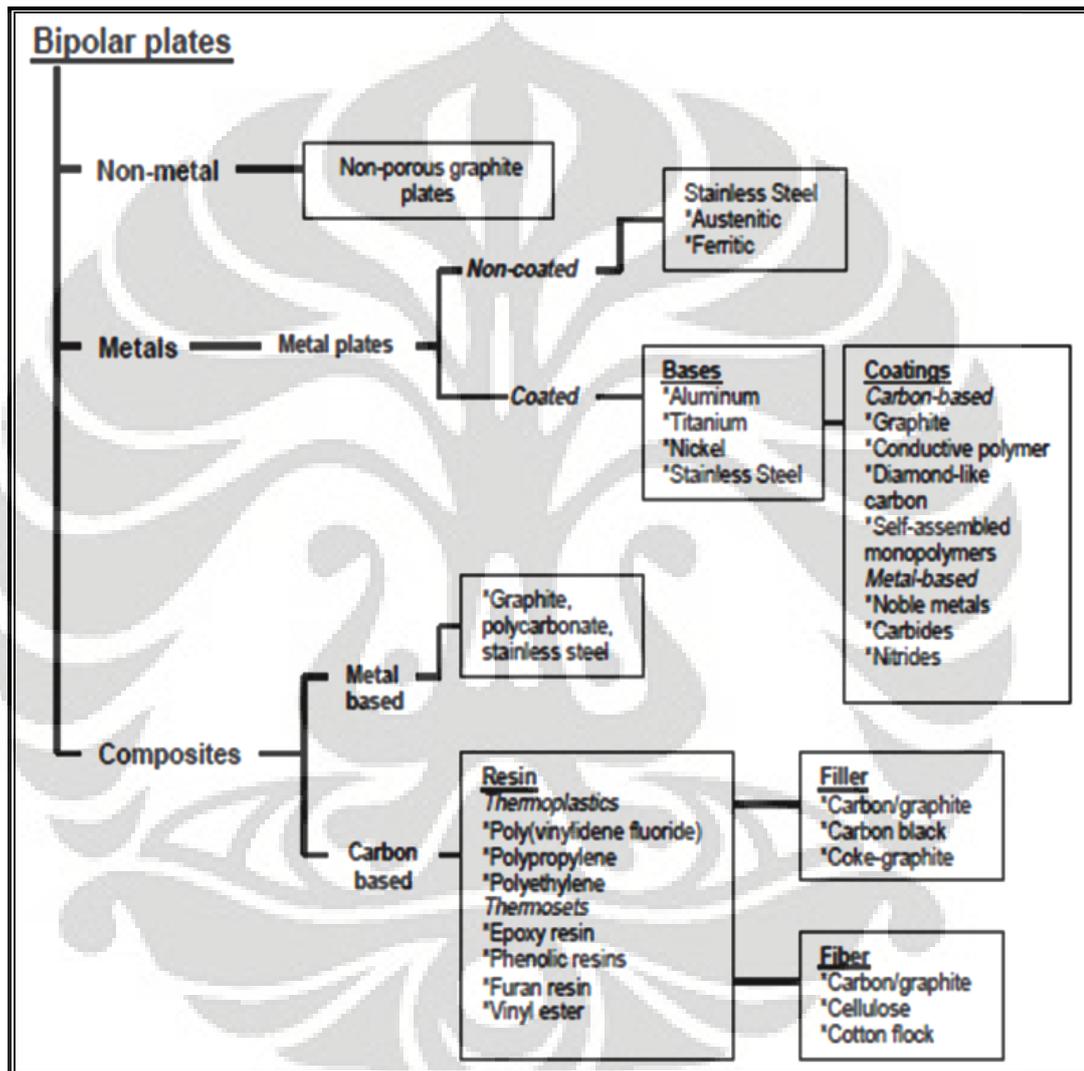
Kebanyakan pelat bipolar PEMFC dibuat dengan menggunakan grafit dan stainless steel [10]. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa pelat bipolar hampir mempengaruhi 60 % biaya produksi dari sel bahan bakar sehingga perlu dikembangkan suatu material baru yang dapat mengurangi biaya produksi. Untuk mencari material yang sesuai dengan fungsi pelat bipolar, terlebih dahulu harus diketahui karakteristik yang harus dicapai oleh suatu pelat bipolar, seperti yang ada pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Karakteristik Pelat Bipolar [14]

Parameter	Kebutuhan
Konduktivitas	$> 10000 \text{ S/m}$
Kekuatan	Dapat menahan tekanan sebesar 200 Psi
Fleksural	$> 25 \text{ MPa}$
Bobot	Maksimum 200 gram per pelat
Volume	1 liter/kW
Harga	$< \$ 0,0045/\text{cm}^2$
<i>Current Density</i>	$< 10 \% \text{ 5000 jam operasi}$
Permeabilitas	Maksimum $10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}\cdot\text{cm}^2$
Korosi	$8 \times 10^{-7} \text{ mol/cm}^2$ per 5000 jam atau 0.0016 mA/cm^2 per 5000 jam

2.3.1 Jenis - Jenis Pelat Bipolar

Saat ini, telah banyak jenis – jenis pelat bipolar berdasarkan material utama penyusunnya, diantaranya pelat bipolar logam dan paduannya, grafit, dan komposit, baik berbasis polimer maupun karbon, seperti yang terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Klasifikasi Material Pelat Bipolar [19]

Material – material yang digunakan dalam pembuatan pelat bipolar tentu memiliki kelebihan dan kekurangan masing – masing. Adapun sifat dari material tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Kelebihan dan Kekurangan dari Material Pelat Bipolar [19,20]

Material	Kelebihan	Kekurangn
Grafit	<ul style="list-style-type: none"> • Ketahanan korosi baik • Resisitivitas rendah • Stabil • Densitas rendah • Ketahanan terhadap kontak elektroda rendah 	<ul style="list-style-type: none"> • Sifat mekanik yang buruk (getas) • Porositas • Volume dan berat besar • Biaya produksi mahal
Logam	<ul style="list-style-type: none"> • Konduktivitas listrik baik • Konduktivitas panas baik • Biaya produksi rendah • Proses fabrikasi yang mudah • Sifat mekanik yang baik 	<ul style="list-style-type: none"> • Perlu pelapis • Terbentuk lapisan oksida hasil korosi
Komposit karbon – karbon	<ul style="list-style-type: none"> • Ketahanan terhadap korosi baik • Resistansi kontak yang rendah • Densitas rendah 	<ul style="list-style-type: none"> • Kekuatan mekanik rendah • Konduktivitas listrik rendah • Harga tinggi
Komposit karbon - polimer	<ul style="list-style-type: none"> • Biaya rendah • Ketahanan terhadap korosi cukup baik • Bobotnya ringan • Tidak menggunakan proses permesinan 	<ul style="list-style-type: none"> • Kekuatan mekanik rendah • Konduktivitas listrik rendah

2.3.1.1 Pelat Bipolar Grafit

Pelat bipolar dengan material utama, yaitu grafit banyak digunakan pada sistem PEMFC dikarenakan dapat menghasilkan konduktivitas listrik tinggi, tahan terhadap korosi dan memiliki densitas lebih rendah dibandingkan pelat logam [8].

Pelat bipolar grafit cenderung getas dan berpori sehingga sifat mekanik yang dihasilkan buruk. Akibatnya, pelat ini membutuhkan suatu proses pengerjaan lebih lanjut sehingga akan menaikkan biaya produksi.

Dikarenakan sifatnya yang getas, pelat bipolar harus lebih tebal agar menghasilkan kekuatan mekanis yang cukup ketika dilakukan proses pengerjaan pelat dan perakitan sel bahan bakar. Akibatnya, berat dan volume dari pelat bipolar grafit menjadi lebih besar dan susunan sel yang dihasilkan pun menjadi lebih berat. Hal ini akan meningkatkan biaya produksi dari pelat (sekitar > US\$10/pelat) sehingga menjadi pertimbangan dalam penggunaannya pada transportasi [14].

2.3.1.2 Pelat Bipolar Logam

Penggunaan material logam pada pelat bipolar PEMFC memberikan banyak keuntungan pada aplikasi transportasi, diantaranya biaya produksi yang rendah, dapat menghasilkan lapisan sangat tipis (<200 μm) sehingga dapat mengurangi berat dan volume dari susunan sel, dan memiliki sifat konduksi termal dan mekanis yang baik [8]. Pelat bipolar logam biasanya akan mudah mengalami korosi atau pelarutan dari unsur lain karena penggunaannya di lingkungan yang memiliki pH sekitar 2-3 dan temperatur operasi sekitar 80°C. Ion logam yang terlarut akan mengganggu membran PEM sehingga konduktivitas yang dihasilkan menjadi rendah [19] dan juga lapisan oksida (produk korosi) yang terbentuk di permukaan pelat akan meningkatkan resistivitas listrik dan menurunkan energi listrik yang dihasilkan. Untuk mengatasi hal ini, maka digunakan dua jenis material logam, yaitu :

1. Tanpa pelapis (*non-coated*)

Material logam yang termasuk dalam jenis ini adalah hanya stainless steel (SS). Material SS memiliki kekuatan yang relatif tinggi, stabil terhadap lingkungan kimia, permeabilitas gas rendah, dapat diproduksi secara massal dan biaya produksi yang rendah. Diantara kelebihan tersebut, stainless steel memiliki ketahanan korosi yang jauh lebih baik dari material logam lainnya (tanpa

pelapisan). Biasanya, stainless steel yang digunakan adalah tipe austenitic (AISI 349) dan ferritik (AISI 446), yang memiliki kandungan Cr yang tinggi sehingga dapat meminimalkan terjadinya fenomena korosi [19].

2. Dengan Pelapis (*coated*)

Material yang biasa digunakan dalam aplikasi ini adalah aluminium, titanium dan nikel. Untuk meningkatkan ketahanan korosi dari material logam tersebut, maka perlu dilakukan suatu perlakuan khusus, yaitu dengan membentuk suatu lapisan pada permukaan pelat, dengan menggunakan material yang tahan korosi dan konduktif (seperti kisi titanium nitrida) [14]. Dalam proses ini, koefisien dari ekspansi termal yang terbentuk antara logam dasar dan lapisan harus sama sehingga mengurangi pembentukan pori – pori kecil yang dapat menyebabkan korosi. Biasanya jenis pelapisan yang digunakan ada dua, yaitu dengan menggunakan karbon dan logam. Pelapisan dengan karbon, meliputi grafit, polimer konduktif dan intan. Sedangkan logam, meliputi logam mulia, logam nitrida dan logam karbida [19].

2.3.1.3 Pelat Bipolar Komposit

Jenis pelat ini dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu komposit berbasis logam dan karbon. Biasanya, pelat bipolar dengan material komposit logam menggunakan grafit berpori, plastik polikarbonat, dan stainless steel. Sedangkan pada komposit berbasis karbon biasa digunakan penguat berupa polimer baik *thermoplastic* seperti polypropylene dan polyethylene serta *thermoset*, seperti epoxy resin, phenolic resin, maupun vinil ester. Selain itu, pada komposit karbon biasa ditambahkan bahan pengisi (*filler*) maupun fiber guna meningkatkan sifat dari pelat bipolar ini [14].

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

persyaratan dari pelat bipolar. Adapun sifat – sifat yang dihasilkan dari pelat bipolar komposit, antara lain :

- a) Memiliki kekuatan yang cukup baik dibanding dengan material kandidat lain selain logam
- b) Memiliki berat yang lebih ringan
- c) Nilai konduktivitas yang tinggi
- d) Resistansi kontak permukaan yang sangat kecil
- e) *Gas impermeability*, tahan korosi
- f) Harga material dan proses relatif kecil

2.4 Komposit

Material komposit merupakan kombinasi dari dua material atau lebih yang memiliki fasa dan sifat yang berbeda, dan membentuk suatu material baru yang memiliki sifat lebih baik daripada material penyusunnya. Mekanisme pembentukan material komposit terjadi dalam skala makroskopis. Material komposit terdiri dari dua penyusun utama, yaitu matriks dan penguat.

Matriks merupakan fasa yang sangat penting dan pada umumnya memiliki jumlah terbanyak dalam sistem komposit. Sifat yang akan dihasilkan dari komposit akan bergantung pada material yang dipilih sebagai matriks. Adapun fungsi dari matriks pada komposit adalah :

- Mentransfer tegangan ke serat.
- Menginfiltrasi serat dan cepat membeku.
- Membentuk ikatan koheren antar permukaan matrik dan penguat.
- Melindungi dan memisahkan serat.
- Tetap stabil setelah proses manufaktur.

Sedangkan penguat merupakan material tambahan yang berfungsi untuk memperbaiki sifat dari matriks sehingga sifat material penguat lebih baik dari sifat matriks. Pada umumnya, komposit dibagi menjadi tiga kelompok berdasarkan material utama penyusunnya, yaitu sebagai berikut :

- a) Komposit berbasis logam
merupakan jenis komposit dengan material utama adalah logam.

b) Komposit berbasis keramik

merupakan jenis komposit dengan keramik sebagai matriks

c) Komposit berbasis polimer

Jenis komposit ini menggunakan material polimer sebagai material penyusun utama.

Ketiga jenis komposit tersebut memiliki karakteristik yang berbeda sesuai dengan penggunaannya di berbagai aplikasi. Biasanya karakteristik yang diperoleh berasal dari sifat dari material penyusunnya sehingga untuk membuat suatu material komposit, terlebih dahulu perlu diketahui sifat – sifat dari material, seperti yang ada pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Sifat Material Komposit [7]

Jenis Komposit	Keuntungan	Kerugian
<i>Metal Matriks Composit (MMC)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur penggunaan tinggi • Kekuatan dan kekakuan baik • Ketangguhan yang baik • Konduktivitas listrik dan panas baik • Dapat difabrikasi dengan metode konvensional 	<ul style="list-style-type: none"> • Bobot yang berat • Ketahanan korosi buruk • Biaya produksi mahal
<i>Ceramic Matriks Composit (CMC)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur penggunaan sangat tinggi (> 2000⁰ C) • Densitas rendah • Elastik modulus besar 	<ul style="list-style-type: none"> • Kegetasan tinggi • Ketahanan <i>mechanical</i> dan <i>thermal shock</i> buruk
<i>Polymer Matriks Composit (PMC)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Bobot ringan • Fabrikasi dan pembentukan mudah • Ketangguhan baik • Bisa diproses dengan teknik polimer konvensional 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur penggunaan rendah • Sensitif terhadap lingkungan yang banyak mengandung air

Universitas Indonesia

2.4.1 Sifat Material Komposit

Pada umumnya sifat material komposit, dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, diantaranya adalah [7] :

1. Material penyusun

Sifat komposit akan ditentukan dari material penyusunnya. Dalam penelitian ini, digunakan material polimer sebagai matriks karena memiliki sifat mekanis yang baik dan harganya relatif murah. Namun, polimer memiliki kendala dalam menghantarkan arus listrik sehingga diperlukan penambahan material lain yang bersifat konduktif, dan juga berfungsi sebagai material penguat, seperti grafit dan *carbon black*. Dengan adanya penambahan material konduktif, maka akan mengurangi sifat isolator dari polimer.

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

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.3)$$

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} = \frac{m_f + m_m}{V_f + V_m + V_v} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{V_f + V_m + V_m} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{1} \quad (2.4)$$

dimana, E = Modulus Elastisitas (komposit (cl), penguat (f), matriks (m))

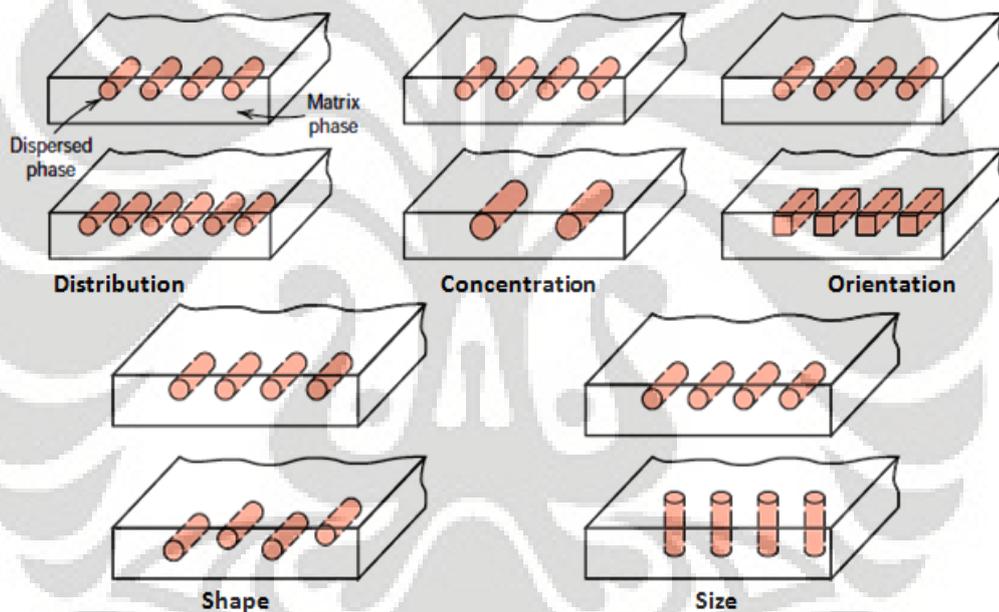
V = Fraksi volume (komposit (cl), penguat (f), matriks (m))

ρ = Densitas (komposit (cl), penguat (f), matriks (m))

3. Bentuk fasa yang terdispersi

Fasa yang terdispersi dalam matrik juga mempengaruhi sifat komposit, baik dari distribusi, konsentrasi, orientasi, ukuran maupun bentuk dari fasa, seperti yang terlihat pada Gambar 2.6.

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

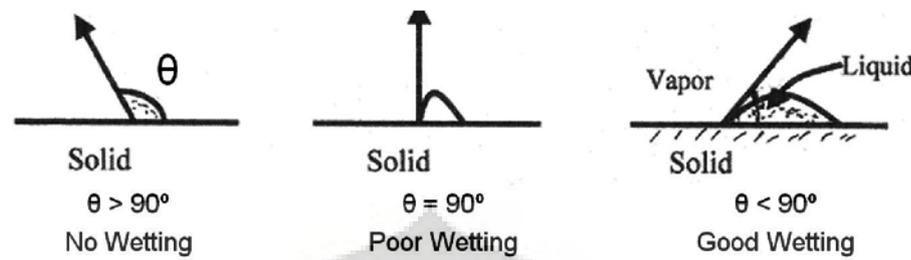


Gambar 2.6. Parameter dari Fasa Terdispersi [21]

4. Daya Pembasahan

Merupakan kemampuan matriks Epoxy untuk membasahi seluruh permukaan grafit agar terjadi kekuatan ikatan yang baik dan mereduksi jumlah porositas. Kemampubasahan matriks terhadap penguat dapat dilihat melalui sudut kontak (*contact angle*) antara matriks dan penguat, seperti Gambar 2.7. Apabila sudut kontak yang terbentuk di bawah 90° , maka kemampubasahan dari matriks baik, sedangkan bila sudut kontak lebih dari 90° , maka pembasahan tidak akan

terjadi sehingga diperlukan *wetting agent* untuk meningkatkan daya pembasahan dari matriks.

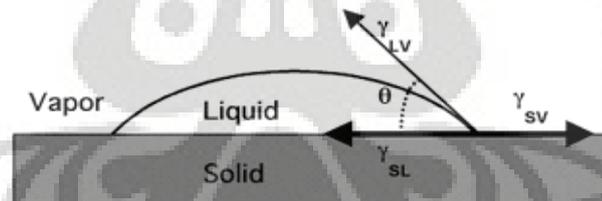


Gambar 2.7. Daya Pembasahan Berdasar Sudut Kontak [7]

Pembasahan yang baik memerlukan *surface energy* (energi permukaan) dari adherend yaitu *reinforcement* yang lebih besar dari energi permukaan matriks, dimana dapat ditentukan dengan persamaan “*work of adhesion* (W_A)”, yaitu energi yang dibutuhkan untuk memisahkan dua material dan didefinisikan sebagai energi permukaan. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 2.8.

$$W_A = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \quad (2.5)$$

dimana, γ = surface free energy

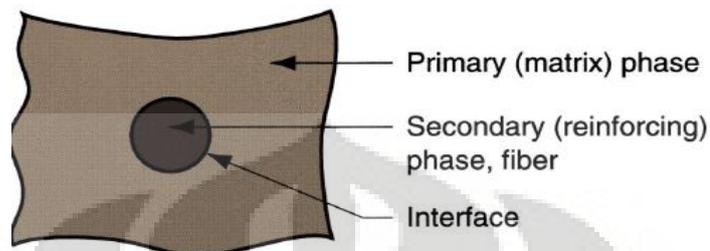


Gambar 2.8. Keseimbangan Tiga Tegangan Permukaan Kondisi Wetting Tetes Cairan pada Permukaan Padat [22]

5. Ikatan antarmuka dan antarfasa

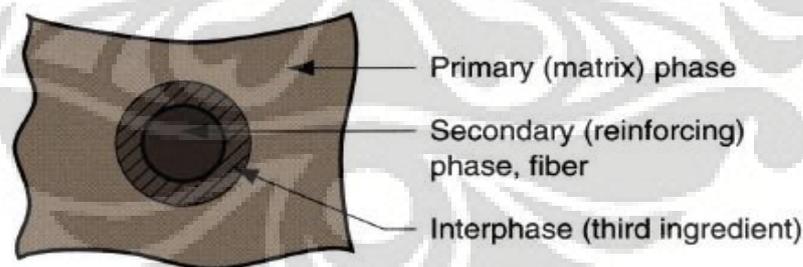
Ikatan antara penguat dan matriks memiliki peranan yang besar dalam penentuan sifat komposit. Hal ini berkaitan erat dengan fenomena antarmuka dan interfasa. Ikatan antarmuka adalah ikatan yang terbentuk antara dua fasa yang berbeda. Ikatan antarmuka berfungsi sebagai media transfer beban dari matriks dan penguat. Semakin luas bidang sentuh antara permukaan, semakin besar efek yang dihasilkan dari ikatan tersebut sehingga dapat meningkatkan sifat ikatan dari

material komposit yang diinginkan. Ikatan antarmuka ini mempengaruhi kekuatan, kekakuan, ketahanan mulur, dan degradasi akibat lingkungan pada material komposit. Gambar 2.9 merupakan ikatan antarmuka yang terjadi antara matriks dan penguat.



Gambar 2.9. Ikatan Antarmuka [7]

Sedangkan interfasa adalah sebuah fenomena dimana terbentuk sebuah lapisan fasa ketiga dalam suatu ikatan antarmuka, seperti yang terlihat pada Gambar 2.10. Interfasa dapat terbentuk apabila ikatan antarmuka dari konstituen penyusun sangat baik dan mampu berdifusi sehingga akan menciptakan daerah baru, yang biasa disebut fasa ketiga. Untuk mendapatkan ikatan interfasa dari dua material yang berbeda, maka dapat dilakukan dengan menambahkan suatu aditif. Fasa ketiga yang terbentuk akan memiliki sifat gabungan dari kedua fasa pembentuknya sehingga sangat berpengaruh terhadap sifat komposit yang terbentuk.



Gambar 2.10. Ikatan Interfasa [7]

2.5 Pelat Bipolar Komposit Polimer – Karbon

Pengembangan material komposit berbasis polimer untuk pelat bipolar sedang mengalami peningkatan karena material ini memiliki berat yang lebih ringan dibandingkan material lain, seperti stainless steel, aluminium, maupun

grafit, harganya juga relatif lebih murah dan tahan terhadap korosi. Polimer yang digunakan sebagai matriks dapat berasal dari golongan termoplastik atau termoset yang kemudian dapat dicampur dengan bahan pengisi konduktif, seperti *carbon black*, serat karbon, grafit atau logam paduan yang memiliki titik lebur yang rendah [14].

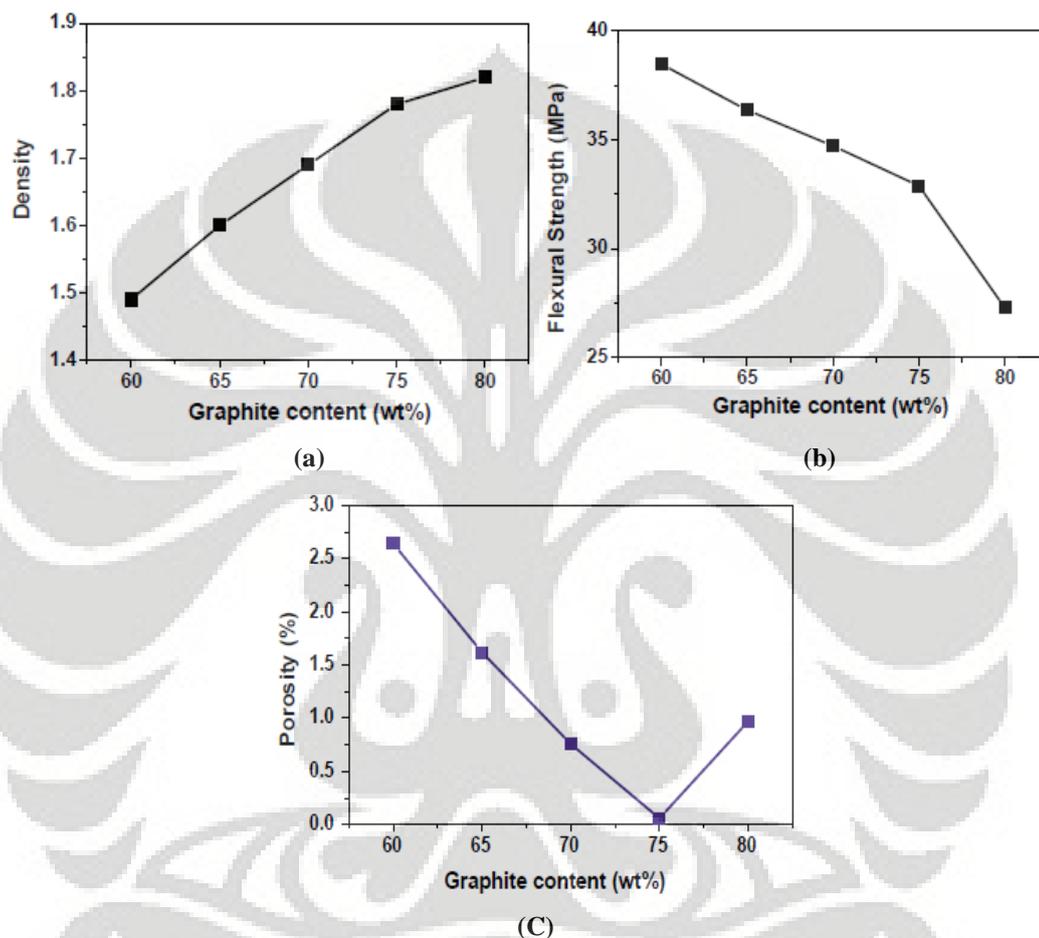
Material polimer termoplastik yang biasa digunakan, antara lain polyethylene dan polypropylene. Material ini dijadikan sebagai matriks dikarenakan memiliki beberapa kelebihan, yaitu ketahanan terhadap lingkungan kimia, sifat mekanik baik, impermeabilitas dan harga yang murah. Akan tetapi, bila dibandingkan dengan termoplastik, material termoset (seperti resin epoxy, phenolic, dan polyester) memiliki kelebihan dalam hal waktu produksi, dimana jenis material ini membutuhkan waktu yang lebih singkat karena material termoset dapat langsung dilepas dari cetakan ketika masih dalam keadaan panas.

Meskipun, pelat bipolar komposit polimer memiliki banyak kelebihan dibandingkan pelat bipolar berbahan dasar grafit atau logam, namun material komposit polimer memiliki kendala, yaitu konduktivitas yang dihasilkan tidak mencapai standar pelat bipolar (sekitar 10 S/cm), karena kebanyakan polimer memiliki konduktivitas yang rendah [14]. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu bahan tambahan guna meningkatkan konduktivitas dari pelat dan biasanya adalah karbon, baik yang berbentuk grafit, serat karbon, maupun *carbon black*. Namun, sebelum menambahkan suatu material konduktif ke dalam sistem komposit, maka terlebih dahulu perlu diketahui konduktivitas dari material tersebut, seperti pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7. Perbandingan Nilai Konduktivitas dari Material Pelat Bipolar [20]

Material	Konduktivitas (S/cm)
Polimer	1
Grafit	10^3
Komposit Polimer / Grafit	10
Fe Paduan	5300×10^3
Ti	2400×10^3
Emas	45000×10^3

Namun, penambahan dari karbon ini harus dibatasi, sekitar 50 – 80% karena apabila kandungannya terlalu banyak, maka akan menurunkan sifat mekanis dari pelat bipolar, baik kekuatan fleksural, densitas maupun porositas, dan juga akan mempersulit ketika dilakukan proses pencetakan [20,23]. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Pengaruh Jumlah Grafit terhadap Densitas (a), Kekuatan Fleksural (b) dan Porositas (c) [23]

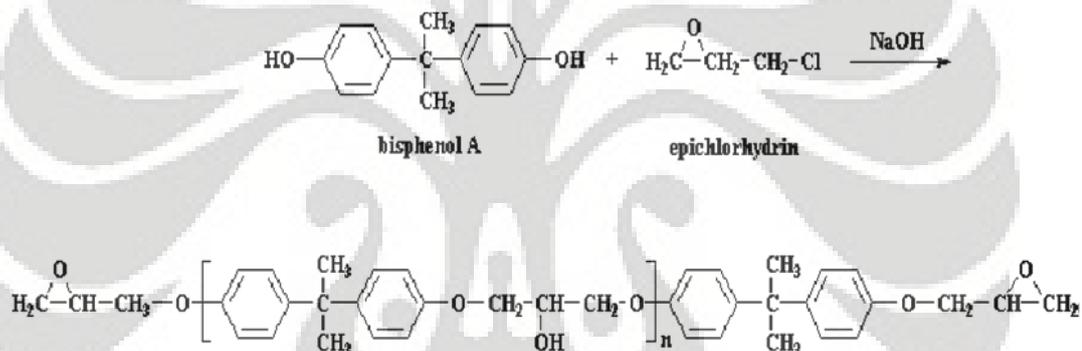
2.6 Material Pelat Bipolar Komposit Polimer

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

Universitas Indonesia

2.6.1 Epoxy Resin

Epoxy merupakan salah satu jenis termoset yang tidak dapat menerima siklus pemanasan dan pendinginan secara kontinu, seperti jenis termoplastik. Ketika dipanaskan pada tahap awal, polimer ini akan melunak dan mampu mengalir di dalam cetakan. Tapi pada temperatur yang tinggi, epoxy akan mengalami reaksi kimia sehingga menjadi keras dan tidak mampu kembali ke bentuk semula dan jika dipanaskan ulang, epoxy tidak mampu melunak kembali melainkan akan terdegradasi [24]. Epoxy juga merupakan salah satu jenis polimer yang mengalami proses *curing*, baik secara polimerisasi maupun *crosslink* ketika dicampur dengan unsur katalis atau *hardener*. Biasanya epoxy resin dihasilkan dari reaksi antara *epichlorohydrin* dan *bisphenol-A*, seperti yang terlihat pada Gambar 2.12.

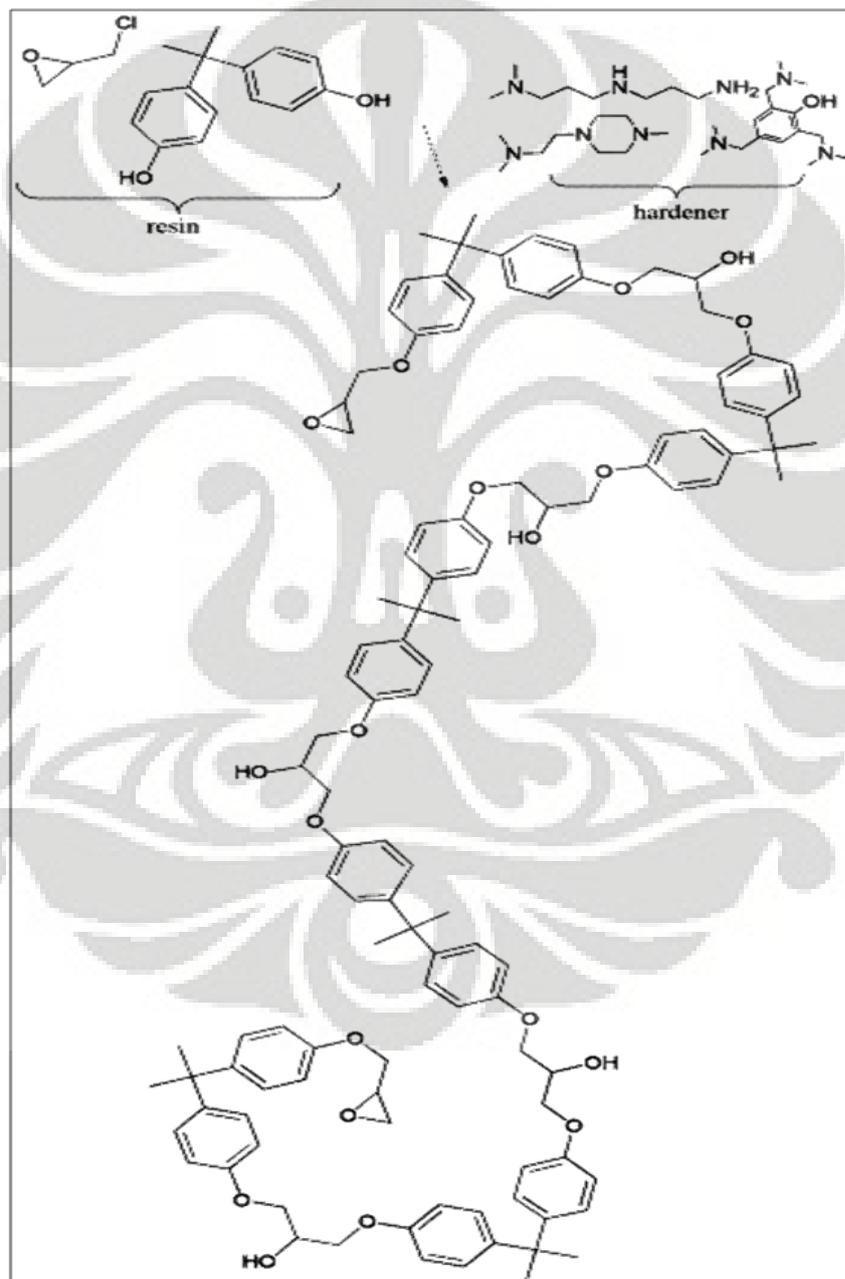


Gambar 2.12. Reaksi Pembentukan Epoxy [25]

Struktur kimia dan berbagai macam proses reaksi *curing* akan mempengaruhi sifat dari epoxy. Pada umumnya, epoxy memiliki sifat, sebagai berikut [26] :

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

Pada material komposit, epoxy sering digunakan sebagai material utama atau matriks dibandingkan dengan polimer lainnya. Hal ini dikarenakan epoxy memiliki daya isi dan menjadi penguat yang baik pada sistem komposit. Selain itu reaksi yang terjadi antara epoxy resin dengan unsur lain tidak memerlukan daya pembasahaan yang banyak sehingga proses pencampuran pun lebih sederhana. Namun, epoxy bersifat isolator sehingga diperlukan penambahan material lain untuk meningkatkan konduktivitasnya, bila digunakan pada aplikasi PEMFC.

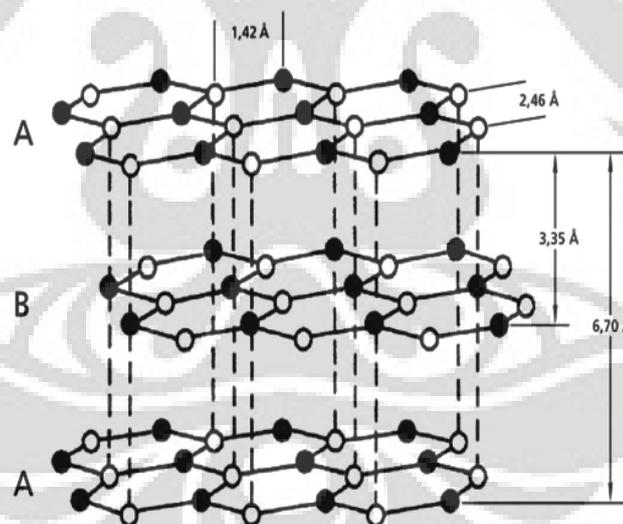


Gambar 2.13. Reaksi antara Epoxy Resin dan Hardener [26]

Pada komponen pelat bipolar, epoxy resin dicampurkan dengan hardener, seperti yang terlihat pada Gambar 2.13, dengan tujuan untuk menghasilkan reaksi *curing* sehingga diperoleh matriks polimer yang kuat dan mempunyai sifat mekanis yang baik. Biasanya, proses *curing* yang dilakukan dengan pemberian panas akan menghasilkan polimer yang tahan terhadap kimia dan panas yang baik daripada proses *curing* pada temperatur ruang [26].

2.6.2 Grafit Limbah Dapur Busur Listrik (*Electric Arc Furnace*)

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, seperti pada Gambar 2.14. Kisi yang terbentuk memiliki kekakuan yang tinggi, tetapi mudah mengalami pergeseran antar lapisan. Dengan struktur seperti ini, grafit akan menghasilkan sifat unik sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi, baik sebagai material utama maupun material pengisi.



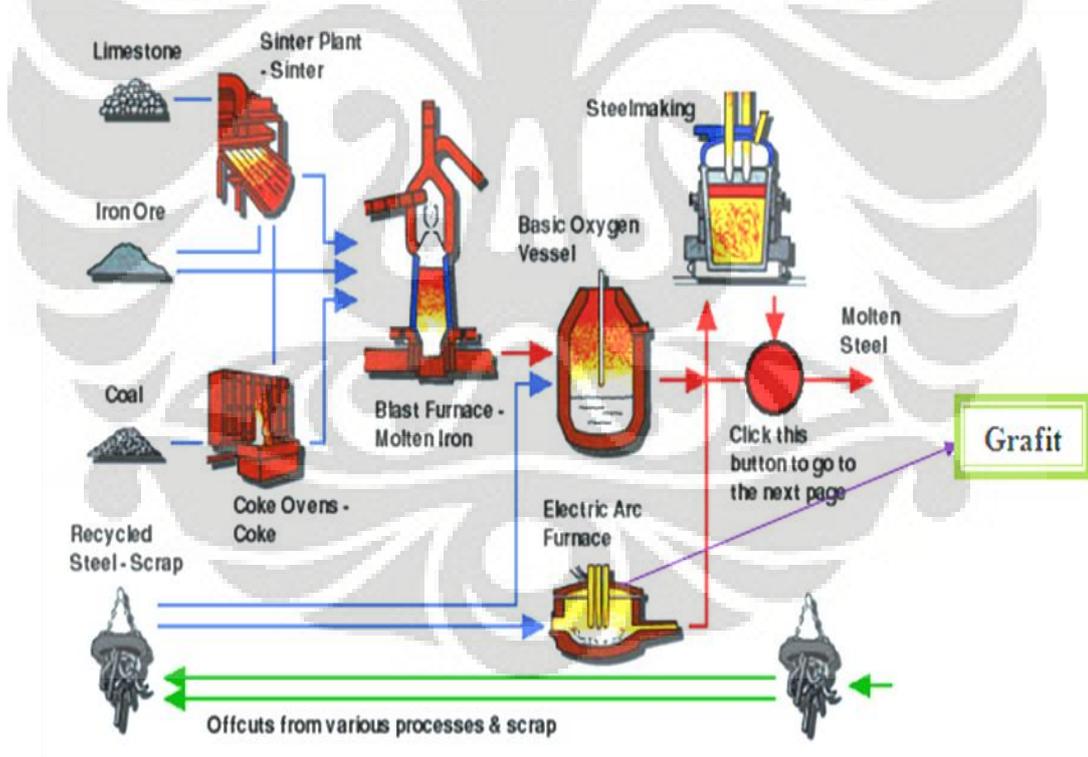
Gambar 2.14. Struktur Kristal Grafit [27]

Adapun sifat kimia dan fisika dari grafit adalah [27] :

- Memiliki konduktivitas panas dan listrik yang sangat baik
- Memiliki sifat pelumasan yang baik pada tekanan dan temperatur yang tinggi
- Ketahanan oksidasi dan daya tahan terhadap unsur kimia tinggi
- Kemampuan untuk mengikat molekul kimia diantara lapisan grafit

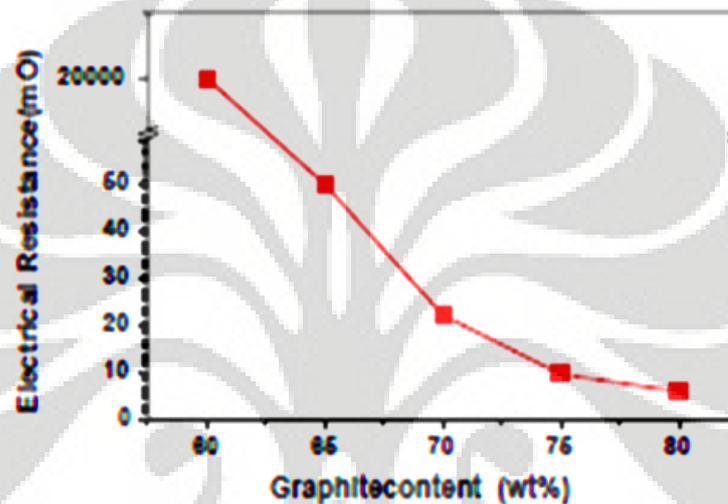
Biasanya, grafit alami terbentuk akibat tekanan dan panas yang tinggi dari dalam bumi, sedangkan grafit sintesis terbentuk secara mekanis, dimana grafit ini memiliki kekuatan mekanik yang tinggi dan mengandung sedikit abu.

Pada proses peleburan besi dan baja, khususnya dengan menggunakan tungku busur listrik seperti yang terlihat pada Gambar 2.15, dibutuhkan suatu elektroda yang berfungsi untuk menghantarkan arus yang besar sehingga dapat melebur besi spons (*sponge iron*) dan besi tua (*scrap*) sebagai bahan baku utama pembuatan besi dan baja. Untuk mencapai tujuan ini, maka dibutuhkan suatu material yang memiliki konduktivitas yang tinggi sehingga dapat menghasilkan busur listrik. Oleh karena itu, grafit dipilih sebagai material utama untuk aplikasi elektroda karena memiliki resistivitas 0,25 dari karbon. Grafit yang digunakan adalah grafit sintesis yang diperoleh dengan memanaskan karbon pada temperatur tinggi.



Gambar 2.15. Proses Peleburan Besi dan Baja [28]

Pada penelitian ini, grafit limbah hasil proses peleburan besi baja digunakan sebagai material penguat pada sistem komposit berbasis polimer dikarenakan harganya yang murah dibandingkan grafit sintesis lainnya dan juga mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah elektroda. Grafit dalam matriks polimer dapat berfungsi sebagai aditif konduktif yang dapat mengurangi resistansi listrik dari komposit pelat bipolar, seperti yang terlihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Pengaruh Jumlah Grafit terhadap Resistansi Listrik [23]

Ukuran, arah dan bentuk dari partikel grafit juga akan mempengaruhi sifat yang dihasilkan, terutama konduktivitas listrik. Grafit yang memiliki arah orientasi partikel yang tegak lurus terhadap arah penekanan pada saat pencetakan, akan memiliki nilai konduktivitas yang lebih baik dibandingkan dengan arah orientasi yang sejajar dengan arah penekanan. Selain itu, kekuatan fleksural dari grafit yang berbentuk partikel lebih baik daripada grafit dengan bentuk *flake* karena tegangan yang diterima oleh grafit akan tersebar merata di seluruh permukaannya sehingga regangan yang terjadi akan semakin kecil. Pada Tabel 2.8 terlihat bahwa semakin kecil ukuran dari partikel, akan menurunkan nilai konduktivitasnya dan secara tidak langsung juga akan meningkatkan kekuatan fleksuralnya.

Tabel 2.8. Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel dari Grafit [29]

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

2.6.3 Carbon Black

Carbon black merupakan suatu partikel yang terbentuk dari karbon sebagai unsur penyusun utama, yang memiliki mikrostruktur hampir sama dengan grafit. Kebanyakan *carbon black* dihasilkan dari proses pembakaran tidak sempurna dari hidrokarbon cair. Biasanya, carbon black digunakan sebagai agen penguat dalam karet dan juga sebagai aditif yang dapat meningkatkan konduktivitas dari polimer [30]. Selain itu, *carbon black* juga diproduksi dengan berbagai macam proses, seperti pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9. Klasifikasi Proses Manufaktur dan Penggunaan dari *Carbon Black* [31]

Chemical Process	Production Process	Feedstock	Uses
Thermal-oxidative decomposition			
Closed System (Turbulent flow)	Furnace black process	Aromatic oils based on coal tar or crude oil, natural gas	Tires, non-tire rubber applications, and pigments
	Lampblack process	Aromatic oils based on coal tar or crude oil	Mechanical rubber goods, electrodes, and carbon brushes
Open System (Diffusion flames)	Dequssa gas black process	Coal tar distillates	Mechanical rubber goods, electrodes, and carbon brushes
	(Channel black process) ^a	Natural Gas	Pigments
Thermal decomposition			
Discontinuous	Thermal black process	Natural Gas (Oils)	Specialty applications
Continuous	Acetylene black process	Acetylene	Electric cells and conductive and antistatic rubber and plastic applications

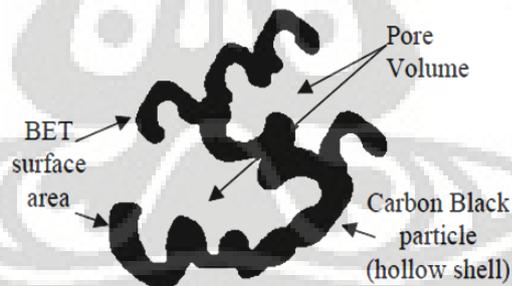
Fungsi dari *carbon black* ditentukan dari campuran antara kimia karbon, energi permukaan, dan partikel. Umumnya, sifat *carbon black* berhubungan dengan proses pelarutan yang bergantung pada ukuran dan struktur partikel [32].

- Ukuran Partikel / Luas permukaan

Ukuran dari partikel dan luas permukaan akan menentukan sifat yang dihasilkan dari *carbon black*. Ukuran partikel yang kecil akan memiliki luas permukaan yang tinggi sehingga akan lebih mudah untuk dibasahi dan dapat dengan mudah larut ketika dicampur dengan material lain daripada *carbon black* yang memiliki ukuran yang besar dengan. Selain itu, ukuran partikel yang kecil akan menghasilkan konduktivitas listrik yang tinggi.

- Struktur

Struktur *carbon black* yang besar akan lebih mudah larut dari pada struktur *carbon black* yang kecil karena memiliki bidang terpadat yang rendah sehingga ketika *carbon black* dicampurkan dengan polimer resin, maka resin akan mengisi bidang kosong dari karbon dan membentuk ikatan kimia yang baik. Gambar 2.17 dan Tabel 2.10 merupakan struktur dan sifat umum dari *carbon black*.

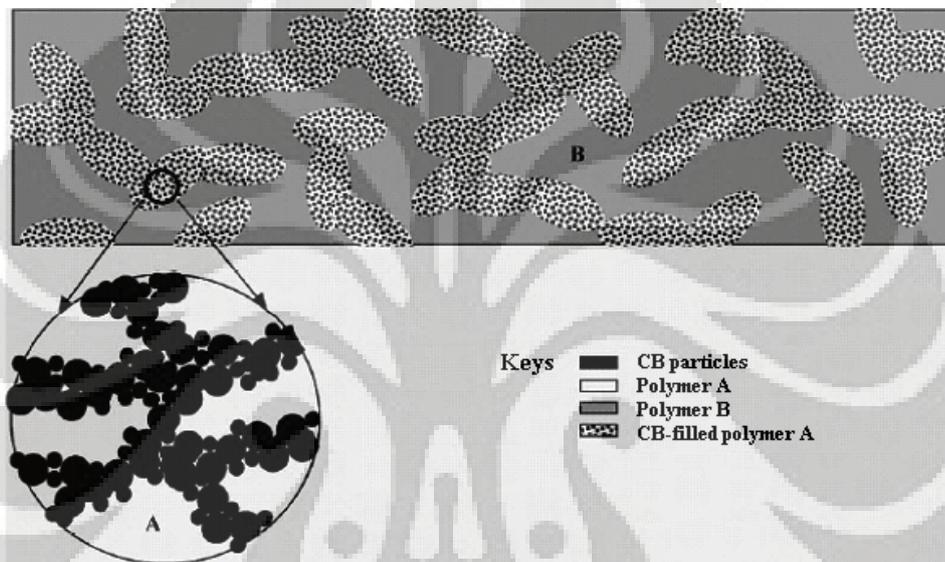


Gambar 2.17. Struktur dari *Carbon Black* [31]

Tabel 2.10. Sifat Umum *Carbon Black* ANK EC600 JD [31]

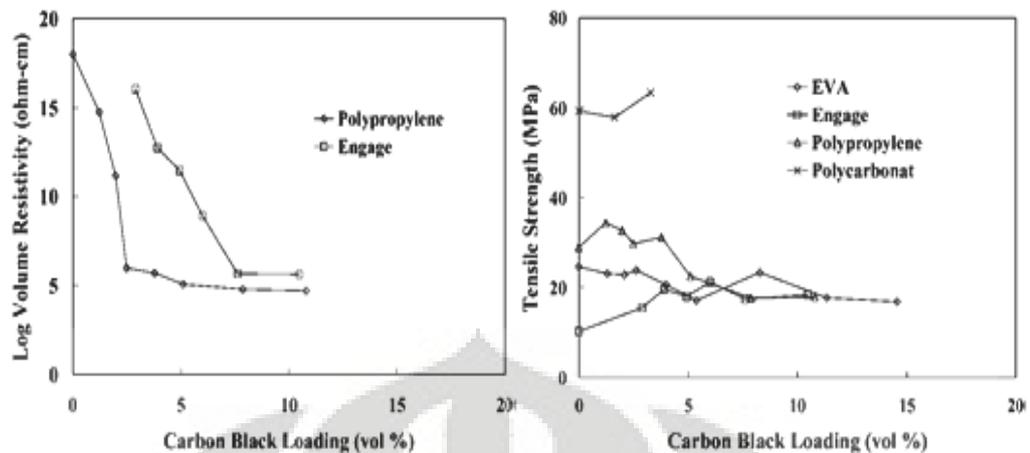
Electrical Resistivity	0.01-0.1 ohm-cm
Aggregate Size	20-100 nm
Specific Gravity	1.8 g/cm ³
Apparent bulk density	100-120 kg/m ³
Ash content, max %	0.1
Moisture, max %	0.5
BET Surface Area	1250 m ² /g
Pore Volume	480-510 cm ³ /100g
pH	8-10

Pada pelat bipolar komposit polimer, perlu dilakukan penambahan suatu material konduktif dengan tujuan untuk meningkatkan konduktivitas dari pelat sehingga dapat menghantarkan listrik dalam sel bahan bakar, biasanya material tersebut adalah *carbon black* karena memiliki konduktivitas yang baik dan harga yang cukup rendah, dibandingkan dengan *carbon active*. Pada sistem komposit, *carbon black* akan mengikat polimer dan membentuk jaringan antar karbon, seperti pada Gambar 2.18, sehingga dengan mudah dapat mengalirkan arus listrik dan mengurangi efek isolator dari polimer.



Gambar 2.18. Skema *Carbon Black* dalam Matriks Polimer pada Komposit [20]

Namun, penambahan *carbon black* yang terlalu banyak akan menurunkan sifat mekanis dari pelat bipolar karena *carbon black* memiliki struktur yang berpori. Akibatnya ketahanan pelat bipolar ketika diberi suatu pembebanan akan berkurang. Densitas yang dihasilkan juga akan meningkat seiring dengan penambahan *carbon black*, mengingat densitasnya yang cukup besar, yaitu sekitar $1,8 \text{ gr/cm}^3$. Gambar 2.19 merupakan pengaruh *carbon black* terhadap sifat pelat bipolar.



Gambar 2.19. Pengaruh Penambahan *Carbon Black* [33]

2.6.4 Polimer Konduktif

Polimer konduktif merupakan polimer organik yang dapat menyalurkan listrik atau dengan kata lain polimer yang memiliki konduktivitas listrik yang baik. Beberapa komponen dapat bersifat konduktor maupun semikonduktor. Polimer konduktif dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu polimer konduktif elektron, polimer konduktif ion dan polimer konduktif proton. Namun, dalam penelitian ini menggunakan polimer konduktif elektron dengan tujuan agar dapat mentransfer elektron sehingga pelat bipolar yang dibuat dapat menghantarkan energi listrik dengan baik. Adapun jenis - jenis polimer konduktif dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11. Jenis dan Sifat dari Polimer Konduktif [34]

Polimer	Konduktivitas (S/cm)	Stabilitas	Kemampuan Proses
<i>Polyactylene</i>	$10^3 - 10^5$	Buruk	Terbatas
<i>Polyphenylene</i>	1000	Buruk	Terbatas
PPS	100	Buruk	Sangat baik
PPV	1000	Buruk	Terbatas
<i>Polypyroles</i>	100	Baik	Baik
<i>Polythiophenes</i>	100	Baik	Sangat baik
<i>Polyaniline</i>	10	Baik	Baik

Polimer konduktif memiliki banyak kelebihan dibandingkan polimer lainnya, diantaranya adalah ketika polimer konduktif dicampurkan ke dalam suatu polimer yang kurang konduktif, maka nilai konduktivitas dari polimer tersebut akan meningkat. Hal ini dikarenakan polimer konduktif memiliki kemampuan untuk merubah sifat dasar dari suatu polimer yang tidak konduktif menjadi lebih konduktif. Namun, polimer konduktif memiliki beberapa kekurangan, yaitu polimer konduktif merupakan campuran yang bersifat tidak stabil, bahkan pada temperatur yang tidak terlalu tinggi ($> 150^{\circ}\text{C}$). Polimer ini juga mudah berubah warna menjadi gelap akibat sifatnya yang sangat mudah teroksidasi bila bereaksi dengan udara. Polimer ini tidak larut pada kebanyakan pelarut organik, sehingga dibutuhkan beberapa penambahan metode yang menyebabkan biaya produksinya menjadi lebih mahal dan tidak ekonomis.

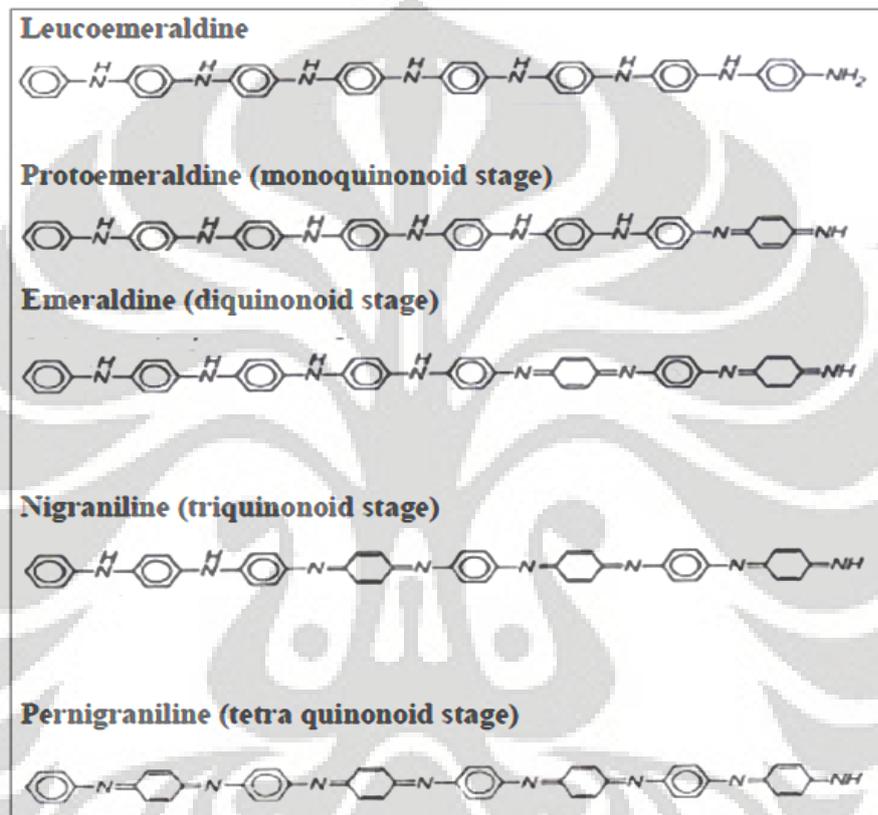
2.6.4.1 *Polyaniline* (PANI)

Polyaniline merupakan suatu jenis polimer *phenylene* yang mempunyai gugus $-\text{NH}-$ di satu sisi rantai polimer, dan disisi lain terdapat cincin *phenylene*. *Polyaniline* juga merupakan hasil reaksi oksidasi dari *aniline* dibawah kondisi asam dan pertama kalinya ditemukan sebagai *aniline black* pada tahun 1862 [35].

Polyaniline memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan polimer konduktif lainnya, yaitu [35] :

- mudah untuk disintesis,
- *doping* yang dilakukan pada *polyaniline* sangat sederhana, yaitu dalam suasana asam,
- merupakan polimer konduktif yang mempunyai struktur dan sifat elektrik yang dapat dikontrol dengan proses oksidasi dan protonasi,
- memiliki kestabilan yang tinggi terhadap reaksi dan lingkungan kimia, elektrokimia,
- memiliki nilai konduktivitas hingga 400 S/cm, dan
- merupakan material yang dapat diproduksi dalam keadaan leleh maupun dalam larutan.

Berdasarkan keadaan oksidasi dan struktur kimianya, *polyaniline* dibagi menjadi tiga kelompok utama, yaitu *penigraniline base*, *leucoemeraldine base*, *emeraldine base*. *Penigranilin base* diperoleh dalam keadaan tereduksi, *leucoemeraldine base* diperoleh ketika dalam keadaan teroksidasi, sedangkan *emeraldine base* merupakan campuran dari jenis *penigranilin base* dan *leucoemeraldine base*. Gambar 2.20 merupakan jenis – jenis dari *polyaniline*.



Gambar 2.20. Struktur dan Jenis *Polyaniline* [35]

Material *polyaniline* akan menjadi konduktif ketika dalam keadaan teroksidasi, dan *polyaniline* juga dapat di-*doping* dengan oksidan, seperti iodin dan *protonic acid doping*. Namun, konduktivitas yang dihasilkan oleh polyanilin menjadi lebih rendah ketika menggunakan *iodine doping*. Dari semua jenis *polyaniline*, *emeraldine base* merupakan *polyaniline* yang memiliki konduktivitas yang tinggi karena di-*doping* dengan menggunakan *protonic acid*. Konduktivitas dari *polyaniline* juga dipengaruhi oleh kandungan air. Apabila sampel *polyaniline*

berada dalam keadaan kering, maka konduktivitasnya akan jauh (lima kali) lebih rendah daripada sampel yang mengandung air.

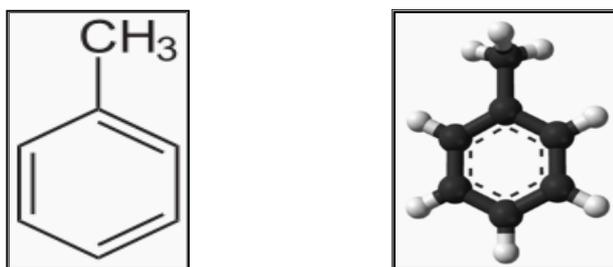
Selain, biaya yang relatif murah dan mudah diproses, polyanilin juga memiliki kestabilan terhadap panas yang baik, dibandingkan dengan polimer konduktif lainnya. Namun, *polyaniline* memiliki kendala dalam hal sifat mekanik yang dihasilkan. Untuk mengatasi hal ini, maka perlu dilakukan pencampuran dengan polimer lain yang memiliki sifat fisik dan mekanik yang baik dan harga yang murah sehingga akan dihasilkan ketahanan temperatur yang baik, peningkatan transparansi, dan tentunya dapat menghilangkan kekurangan dari *polyaniline* [36].

Dalam proses pencampuran antara *polyaniline* dengan polimer lain, biasanya digunakan dua metode, yaitu [37] :

- metode sintesis, dimana terjadi polimerisasi dari *aniline* ketika dicampur ke dalam matrix polimer
- metode pencampuran, dimana *polyaniline* diaduk dengan polimer lain sebagai matriks. Metode ini juga termasuk pelarutan dari PANI dengan matrix polimer.

Karena kelarutan dari *polyaniline* lebih besar dibandingkan polimer lain, maka pencampuran dapat dilakukan dengan menggunakan metode pelarutan, dimana *polyaniline* akan dilarutkan sebagai partikel halus ($<20 \mu\text{m}$). Penambahan *polyaniline* ke dalam polimer dengan berat molekul yang lebih besar, akan mempengaruhi sifat fisik dan konduktivitas dari polimer [36], khususnya epoxy. Berdasarkan penelitian sebelumnya, bahwa dengan penambahan polyanilin, maka dapat meningkatkan konduktivitas epoxy 10 kali lebih besar dibandingkan tanpa penambahan PANI. Namun, PANI dipengaruhi oleh pH, dimana ketika PANI berada pada pH tinggi, maka konduktivitas yang dihasilkan mengalami penurunan karena sifatnya berubah menjadi isolator sehingga lingkungannya pun harus diperhatikan [36].

2.5.5 Toluene



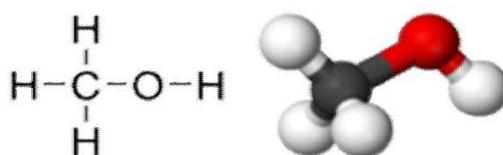
Gambar 2.21. Struktur Kimia dari Toluene [38]

Toluene, yang juga dikenal dengan nama methylbenzene atau toluol, merupakan suatu cairan pelarut dengan aroma seperti pengencer cat. Kebanyakan toluene digunakan pada aplikasi industri sebagai pelarut. Disini, toluene digunakan sebagai pelarut dari *polyaniline* dan epoxy resin sehingga *polyaniline* dapat larut dan berikatan dengan epoxy resin dan hal ini dapat meningkatkan konduktivitas dari epoxy resin. Adapun sifat dan struktur dari *toluene*, dapat dilihat pada Tabel 2.12 dan Gambar 2.21.

Tabel 2.12. Sifat Umum Toluene [38]

Properties	
Molecular formula	C ₇ H ₈ or C ₆ H ₅ CH ₃
Molar mass	92.14 g/mol
Appearance	colorless liquid
Density	0.8669 g/mL
Melting point	-93 °C
Boiling point	110.6 °C
Solubility in water	0.47 g/l (20–25°C)
Viscosity	0.590 cP at 20°C

2.5.6 Metanol



Gambar 2.22. Struktur dari Metanol [39]

Metanol yang digunakan disini berfungsi sebagai pelarut dan pengencer untuk epoxy resin serta epoxy hardener (yang awalnya sangat kental), sehingga epoxy dapat bercampur dengan grafit. Dengan adanya metanol, daya pembasahan epoxy terhadap grafit meningkat dan dapat membasahi seluruh permukaan grafit sehingga ikatan yang terbentuk antara epoxy dan grafit menjadi lebih kuat.

Selain itu, metanol juga dapat berfungsi sebagai *dopant* dari *polyaniline* karena merupakan salah satu jenis alkohol yang tergolong pelarut organik polar. Dengan adanya penambahan metanol pada komposisi pelat bipolar, menyebabkan konduktivitas dari pelat meningkat. Adapun struktur dan sifat dari metanol dapat dilihat pada Gambar 2.22 dan Tabel 2.13.

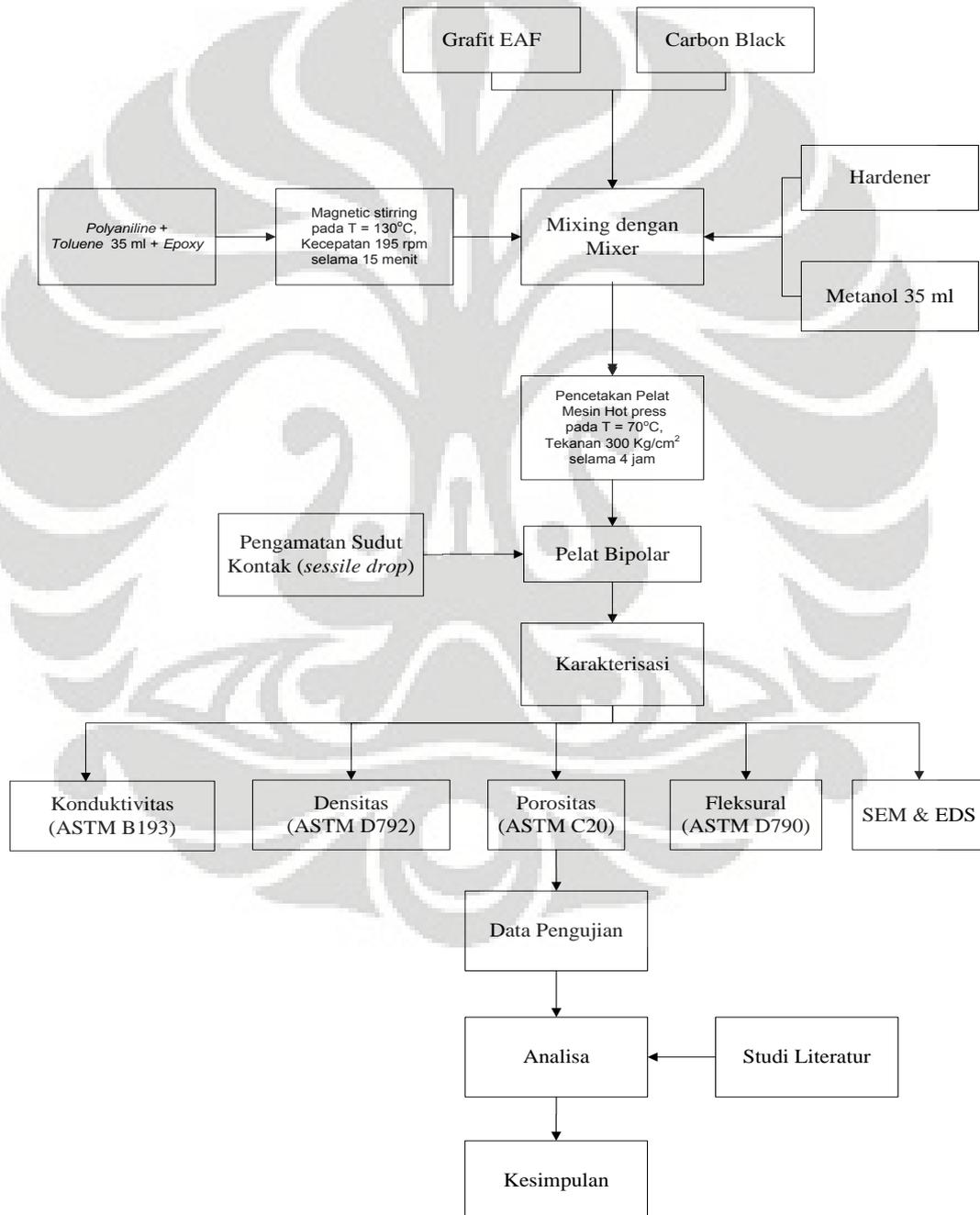
Tabel 2.13. Sifat Umum Metanol [39]

Molecular formula	CH ₃ OH
Molar mass	32.05 g/mol
Appearance	colorless liquid
Density	0.7918 g/cm ³
Melting point	-97 °C, -142.9 °F (176 K)
Boiling point	64.7 °C, 148.4 °F (337.8 K)
Solubility in water	miscible

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini adalah gambar diagram alir penelitian dari proses pembuatan dan karakterisasi pelat bipolar dengan variabel penambahan *polyaniline*.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Peralatan

Berikut ini adalah peralatan yang digunakan didalam penelitian untuk menghasilkan pelat bipolar dan pengujian karakterisasi terhadap pelat bipolar tersebut.

a) Peralatan Preparasi Sampel

Adapun peralatan yang digunakan dalam proses pembuatan pelat bipolar, antara lain :

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Beaker glass | 6. Mixer |
| 2. Planetary ball mill | 7. <i>Hot plate magnetic stirring</i> |
| 3. Ball mill (Alumina) | 8. Cetakan <i>stainless steel</i> 15cm x 15 cmx 0,4cm |
| 4. Mesin pengguncang | 9. Mesin <i>hot press</i> |
| 5. Timbangan digital | 10. Amplas 100#, 240#, 320#, dan 1200# |
| 6. Jangka sorong | 11. Spatula |
| 7. Gergaji | 12. Sarung tangan |
| 8. Pipet volume | 13. Termometer |
| 9. Kain katun | 14. Tissue |

b) Peralatan Pengujian Karakterisasi

Adapun peralatan yang digunakan dalam proses karakterisasi dari pelat bipolar yang telah dibuat, adalah

1. *Conductivity Four Point Probe Test Machine*
2. *Oven*
3. *Universal Testing Machine*
4. *Scanning Electron Microscope*
5. *Ultrasonic Cleaner*
6. *Dryer*

3.2.2 Bahan

Dalam penelitian ini, pelat bipolar yang akan dibuat menggunakan material komposit polimer, dimana *epoxy resin* yang merupakan salah satu jenis termoset berfungsi sebagai matriks. Disamping itu, digunakan material lain,

seperti grafit EAF (limbah hasil peleburan baja) dan *carbon black* yang berfungsi sebagai penguat. Untuk meningkatkan konduktivitas yang akan dihasilkan dari pelat bipolar ini, maka perlu ditambahkan suatu aditif, yaitu *polyaniline* yang merupakan salah satu jenis polimer konduktif. Material penyusun dari komposit harus memiliki daya pembasahan yang baik sehingga dalam pembuatan pelat bipolar kali ini, menggunakan *toluene* sebagai pelarut dari *polyaniline* dan *methanol* sebagai pelarut atau pengencer dari *epoxy resin*. Pelat bipolar yang akan dibuat mempunyai berat total 180 gram.

1. *Epoxy Resin*

Pada penelitian ini digunakan *epoxy resin* (Bhispenol A-epichlorohydrin) dengan merek dagang Eposchon. Epoxy yang merupakan polimer jenis termoset ini digunakan untuk mengikat atau membasahi material penguat, seperti grafit dan *carbon black*, serta aditif, yaitu *polyaniline*. Disini, *epoxy resin* membutuhkan suatu *coupling agent* sebagai stimulan terjadinya proses polimerisasi dengan baik pada suhu ruang. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan perbandingan 1:1 antara *epoxy resin* dengan *hardener*. Secara keseluruhan *epoxy* yang digunakan adalah 20% dari total berat pelat bipolar. Adapun jumlah *epoxy resin* yang digunakan untuk setiap pembuatan pelat bipolar dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan spesifikasi dari *epoxy resin* dapat dilihat pada Lampiran 11 dan 12.

2. Grafit EAF

Dalam penelitian ini digunakan grafit elektroda busur listrik (*electric arc furnace*) sisa dari proses peleburan baja PT. Krakatau Steel. Ukuran partikel dari grafit EAF yang digunakan adalah < 325 mesh (< 44 μ m). Awalnya, persentase jumlah grafit ini diambil dari total jumlah karbon yang digunakan yaitu 80% dari total berat pelat bipolar. Namun, dikarenakan adanya penambahan material lainnya, yaitu *polyaniline*, maka jumlah grafit EAF yang digunakan akan berkurang seiring dengan penambahan material tersebut. Jumlah grafit EAF yang digunakan pada setiap pembuatan pelat bipolar dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan spesifikasi dari Grafit limbah EAF dapat dilihat pada Lampiran 13.

3. *Carbon Black*

Pada penelitian ini *carbon black* digunakan sebagai material semi konduktif. *Carbon black* dengan luas permukaan yang luas akan mampu menyaring arus listrik dan membentuk jaringan karbon yang konduktif. Namun, struktur *carbon black* yang berporos akan mengurangi sifat mekanis dari komposit [31]. Dalam setiap pembuatan pelat bipolar disini, digunakan *carbon black* optimum, yaitu 5% dari total material penguat yang digunakan. Jumlah dari *carbon black* dapat dilihat pada Tabel 3.1

4. *Polianiline*

Dalam penelitian ini, *polyaniline* berfungsi sebagai aditif konduktif yang mampu meningkatkan konduktivitas dari material komposit polimer. *Polyaniline* yang digunakan adalah dengan merk dagang yaitu Aldrich. Jumlah *polyaniline* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan spesifikasi dari *polyaniline*, dapat dilihat pada Lampiran 14.

5. *Metanol*

Penggunaan methanol berfungsi sebagai pengencer polimer *epoxy* pada saat pencampuran bahan-bahan pelat bipolar. Dalam penelitian ini menggunakan metanol dengan merk dagang Brataco dan spesifikasi dari metanol dapat dilihat Lampiran 14. Disini, metanol yang digunakan sebesar 35 ml.

6. *Toluene*

Penggunaan *toluene* berfungsi sebagai pelarut dari polyanile sehingga dapat dicampurkan dengan *epoxy resin*. Dalam penelitian ini menggunakan *toluene* dengan merk dagang Brataco dan spesifikasi dapat dilihat pada Lampiran 14. Dalam proses pengenceran *polyaniline* yang dilakukan pada penelitian ini, *toluene* yang digunakan sebesar 35 ml.

3.3 Proses Pembuatan Pelat Bipolar

Sifat dan karakteristik yang akan dihasilkan oleh suatu pelat bipolar, bergantung pada proses pembuatannya. Oleh karena itu diperlukan beberapa langkah yang dimulai dari proses persiapan material hingga proses pencetakan pelat dan pembuatan sampel uji.

3.3.1 Proses Penghalusan Grafit

Grafit yang berasal dari elektroda EAF (*Electric Arc Furnace*) hasil proses peleburan baja dihancurkan terlebih dahulu melalui proses *milling* dengan menggunakan mesin *disc mill* dan *planetary ball mill* dalam keadaan kering. Pada mesin *disc mill* menggunakan toples (*jar*) dan bola penghancur berbahan dasar alumina. Melalui proses ini, bongkahan limbah grafit dapat dihaluskan menjadi partikel – partikel halus berukuran <325 mesh. Proses ini dilakukan selama 50 jam dan perbandingan antara jumlah grafit yang akan dihaluskan dengan berat bola alumina yang digunakan adalah 1 : 10. Sedangkan pada mesin *planetary ball mill* menggunakan bola baja yang telah dikeraskan dan perbandingan antara jumlah grafit dengan berat bola adalah 1 : 8. Proses penghalusan pada mesin *planetary ball mill* berlangsung selama 50 jam dan menggunakan kecepatan 20 Hz atau 180,95 rpm.

3.3.2 Komposisi Pelat Bipolar

Pada penelitian ini akan dibuat empat buah pelat bipolar dengan berat total masing – masing pelat adalah 180 gr. Penelitian ini lebih difokuskan pada pencarian komposisi yang tepat dari *polyaniline* sebagai aditif yang dapat meningkatkan konduktivitas dari pelat bipolar yang kemudian dicampur dengan *carbon black* optimum, yaitu 5% yang diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya [9]. Penambahan aditif *polyaniline* dilakukan dalam jumlah yang sedikit, yaitu pada rentang 50 mg, 100 mg, 150 mg, dan 200 mg, mengingat nilai ekonomis dari pembuatan pelat bipolar, sehingga dari sini dapat dilihat bahwa dengan kadar yang sedikit, maka dapat diketahui sejauh mana pengaruh aditif *polyanilin*

terhadap sifat pelat bipolar yang dihasilkan. Pada Tabel 3.1 dapat dilihat komposisi dari pelat bipolar yang akan dibuat.

Tabel 3.1. Komposisi dari Pelat Bipolar

Penguat (<i>Reinforcement</i>) (80%)						Polimer (20%)	
Grafit EAF		<i>Carbon Black</i>		Polyaniline		Epoxy Resin	
(gr)	(%)	(gr)	(%)	(gr)	(%)	(gr)	(%)
136,75	94,965	7,2	5	0,05	0,035	36	20
136,70	94,930	7,2	5	0,10	0,070	36	20
136,65	94,896	7,2	5	0,15	0,104	36	20
136,60	94,860	7,2	5	0,20	0,140	36	20

3.3.3 Proses Pencampuran

Seluruh material yang akan digunakan pada proses pembuatan pelat bipolar terlebih dahulu ditimbang sesuai dengan komposisi pada tabel 3.1. Setelah proses penimbangan, kemudian dilanjutkan dengan pencampuran dari material tersebut. Adapun langkah – langkahnya adalah sebagai berikut :

1. *Polyaniline* diencerkan dengan menggunakan toluene (35 ml) dan dicampurkan ke dalam resin epoxy.
2. Larutan yang mengandung polyaniline dan resin diaduk dengan menggunakan *magnetic stirring* pada temperatur 130°C dengan kecepatan 195 rpm selama 15 menit, seperti yang terlihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Proses *Mixing* dari *Polyaniline* dan *Epoxy Resin*

3. Larutan tersebut dimasukkan ke dalam *beaker glass* 500 ml yang telah berisi grafit EAF, *carbon black* dan methanol 35 ml dan kemudian diaduk menggunakan *mixer* selama 5 menit pada temperatur ruang.
4. *Hardener* yang telah diencerkan dengan menggunakan methanol 35 ml, dimasukkan ke dalam *beaker glass* dan diaduk selama 5 menit pada temperatur ruang.
5. Pengadukan kemudian dilanjutkan di mesin *hot plate* pada temperatur 100°C dan selama 15 menit hingga bakalan kering dan membentuk pellet. Proses ini juga bertujuan untuk menghilangkan methanol dan toluene yang ada pada bakalan sehingga pelat yang dihasilkan memiliki permukaan dan struktur yang tidak berpori. Gambar 3.3 merupakan hasil *mixing* dari proses pembuatan pelat bipolar.



Gambar 3.3. Hasil *Mixing*

3.3.4 Proses Pencetakan

Hasil pencampuran yang telah siap, kemudian dimasukkan ke dalam cetakan berukuran 15 cm x 15 cm x 0,4 cm. Dalam proses ini, bakalan harus tersebar merata didalam cetakan agar menghasilkan pelat dengan ketebalan yang seragam. Lalu, cetakan diletakkan pada *hydraulic pressure machine* untuk dilakukan proses *hot press* pada temperatur 70°C dengan menggunakan tekanan sebesar 300 kg/cm² selama 4 jam, seperti pada Gambar 3.4. Setelah proses pencetakan, dibutuhkan proses pendinginan selama 12 jam dengan tujuan untuk menghindari terjadinya perubahan dimensi dari pelat.



Gambar 3.4. Hasil *Mixing* dalam Cetakan (Kiri) dan Penempatan di Mesin *hot press* (Kanan)

3.3.5 Proses Pembuatan Sampel Uji

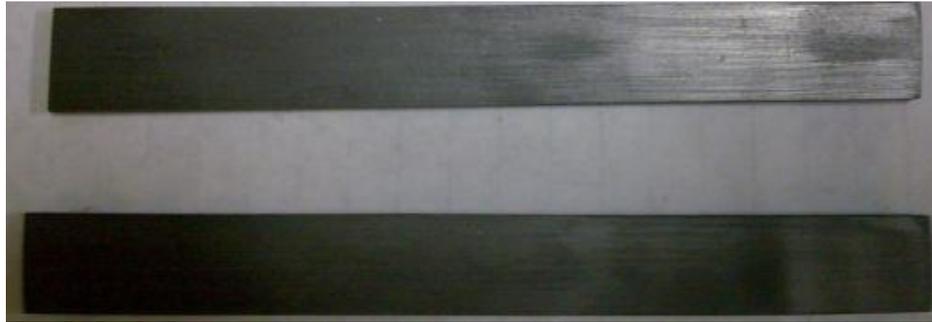
Pelat yang sudah dihasilkan kemudian dilanjutkan dengan pembuatan sampel uji, dimana dalam proses ini pelat akan dibagi menjadi 4 bagian, yaitu :

- a. Untuk pengujian konduktivitas, sampel dibuat dengan ukuran 2 x 2 cm (seperti Gambar 3.5) sebanyak 5 buah untuk satu variabel. Masing – masing sampel diampelas hingga rata agar arus yang ditembakkan pada permukaan sampel, dapat ditangkap sehingga menghasilkan nilai konduktivitas yang akurat.



Gambar 3.5. Sampel Uji Porositas

- b. Untuk pengujian densitas, dan porositas dibuat sampel kecil dengan ukuran 2 x 2 cm sebanyak 5 buah untuk masing – masing variabel.
- c. Untuk pengujian kekuatan fleksural, sampel yang dibutuhkan berjumlah 5 buah untuk masing – masing variabel dengan ukuran 12cm x 1,3cm x 0,3cm, seperti pada Gambar 3.6. sampel ini harus diampelas hingga permukaannya rata dengan tujuan agar menghilangkan retak mikro yang dapat menyebabkan terjadinya retak sehingga akan dihasilkan nilai kekuatan fleksural yang lebih akurat.



Gambar 3.6. Sampel Uji Fleksural

- d. Untuk pengujian *scanning electron mikroskop* dan EDS, sampel yang digunakan adalah berasal dari sampel hasil uji fleksural, yaitu bagian muka patahan yang berukuran 1,3 cm x 1 cm (seperti Gambar 3.7) sebanyak 1 buah untuk masing – masing variabel.



Gambar 3.7. Sampel Pengamatan SEM dan EDS

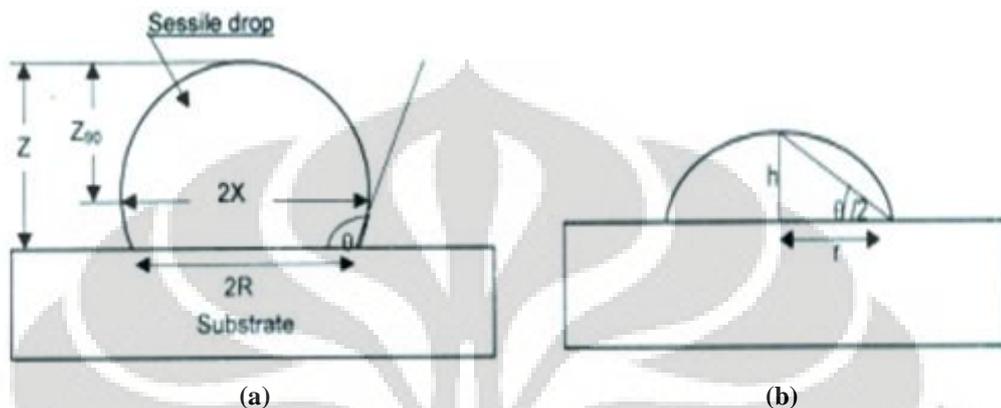
3.4 Proses Karakterisasi Pelat Bipolar

Untuk mendapatkan suatu pelat bipolar yang sesuai dengan persyaratan, terlebih dahulu harus dilakukan beberapa pengujian agar mengetahui sifat dan karakteristik yang dihasilkan dari pelat bipolar tersebut. Adapun pengujian yang akan dilakukan, antara lain :

3.4.1 Pengamatan Sudut Kontak

Pengamatan ini dilakukan dengan tujuan untuk melihat sudut kontak yang terbentuk antara *epoxy resin* dengan pelat bipolar yang telah dibuat dengan penambahan *polyaniline* sebesar 50 mg, 100 mg, 150 mg dan 200 mg. Apabila sudut kontak yang terbentuk $< 90^\circ$, maka dapat dikatakan bahwa pembasahan yang terjadi antara *epoxy resin* dengan material lainnya baik dan ikatan antarmuka yang dihasilkan juga akan baik. Akan tetapi, jika sudut kontak yang terbentuk

lebih dari 90° , maka pembasahan yang terjadi kurang baik sehingga ikatan yang terbentuk juga rendah. Apabila hal ini terjadi, maka dibutuhkan suatu *wetting agent* dengan tujuan untuk meningkatkan daya pembasahan dari material yang digunakan sebagai matriks. Gambar 3.8 merupakan metode pengukuran dari sudut kontak dan untuk penjelasan lebih lanjut, dapat dilihat pada Lampiran 8.



Gambar 3.8. Metode Pengukuran untuk Sudut Kontak (a) $> 90^\circ$ dan (b) $< 90^\circ$

Apabila sudut kontak yang terbentuk $< 90^\circ$, maka persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{h}{r} \quad (3.1)$$

dimana, h = tinggi (mm)
 r = jari – jari (mm)

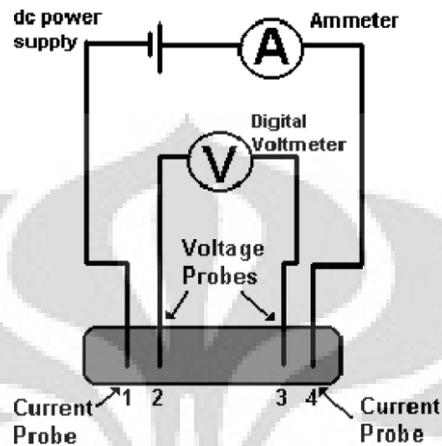
Untuk metode pengukuran sudut kontak $> 90^\circ$, dapat dilihat pada Lampiran 8.

3.4.2 Pengujian Konduktivitas

Pengujian konduktivitas ini sangat penting untuk dilakukan, mengingat fungsi dari pelat bipolar, yaitu sebagai pengumpul dan pembawa elektron dari anoda ke katoda. Dengan adanya pengujian ini, maka dapat diketahui sejauh mana pelat bipolar mampu menghantarkan arus listrik.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat digital Veeco FPP 5000 - *four point probe test*. Seperti yang terlihat pada Gambar 3.9, alat ini terdiri dari empat buah kawat yang kemudian diletakkan pada permukaan sampel. Arus akan

mengalir melalui kawat no.1 dan 4. Apabila sampel memiliki ketahanan terhadap aliran dari arus listrik, maka akan terjadi penurunan tegangan karena arus mengalir sepanjang sampel. Penurunan tegangan ini terjadi pada kawat 2 dan 3 yang kemudian diukur dengan voltmeter digital.



Gambar 3.9. Skema mesin *four probe test*

Proses pengujian konduktivitas dilakukan di Pusat Penelitian Fisika LIPI, Puspiptek, Serpong dengan cara menaruh specimen uji di dalam mesin uji yang kemudian dijepit dengan cakram agar specimen dapat fokus pada arus yang akan ditembakkan.



Gambar 3.10. Mesin Veeco FPP 5000 - *four point probe test*

Adapun prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut :

1. Siapkan sampel dengan permukaan rata yang akan diuji
2. Nyalakan voltmeter dan ubah tipe mesin menjadi DC

3. Masukkan sampel kedalam alat *four point probe test* (sampel diletakkan tepat ditengah dimana 4 buah *probe* berada)
4. Pilih mode *slice* sesuai dengan bentuk sampel yang akan diuji
5. Masukkan data ketebalan dari sampel yang akan diuji
6. Tutup sampel dengan penutup alat
7. Nilai resistivitas (R) akan terlihat pada indikator alat

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

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.2)$$

dimana, σ = nilai konduktivitas (S/cm)
 ρ = resistivitas (Ω cm)

3.4.3 Pengujian Densitas

Pengujian dilakukan di Pusat Penelitian Fisika LIPI, Puspiptek, Serpong dengan menggunakan prinsip Archimedes, dimana massa di udara akan berbeda dengan massa di dalam air akibat adanya gaya ke atas dari sampel. Pengujian ini didasarkan pada standar pengujian ASTM D792. Adapun prosedur dari pengujian densitas adalah sebagai berikut :

1. sampel ditimbang pada temperatur ruang ($25 \pm 20^\circ\text{C}$) sehingga diperoleh massa kering dari sampel
2. Kemudian sampel dicelupkan dalam *beaker glass* berisi air. Pencelupan ini harus dilakukan hingga seluruh permukaan sampel berada di tengah – tengah *beaker glass*, tidak boleh menyentuh dasar dan pinggir dari *beaker glass*, seperti yang terlihat pada gambar 3.11.
3. Setelah diperoleh berat kering dan basah dari sampel, kemudian dapat dilakukan perhitungan densitas dengan menggunakan persamaan 3.3.



Gambar 3.11. Penimbangan sampel di udara (kiri) dan di air (kanan)

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

$$\rho = \frac{A}{A - B} \times \rho \text{ air} \quad (3.3)$$

dimana, $\rho = \text{bulk density (gr/cm}^3\text{)}$
 $A = \text{massa sampel kering (gr)}$
 $B = \text{massa sampel tergantung dalam air (gr)}$
 $\rho \text{ air} = \text{rapat massa air (0,9775 gr/cm}^3\text{)}$

3.4.4 Pengujian Porositas

Porositas merupakan rongga atau pori – pori yang terbentuk akibat adanya udara yang terperangkap dalam pelat. Pori – pori yang terbentuk akan mempengaruhi performa dari pelat bipolar. Untuk mengetahui seberapa besar porositas pada pelat, maka dapat dilakukan dengan menggunakan pengujian berdasarkan standar ASTM C20. Prinsipnya, pengujian ini dilakukan dengan melihat perbedaan berat dari sampel, baik dalam keadaan kering (setelah dipanaskan), maupun dalam keadaan jenuh (setelah direndam). Adapun langkah – langkah pengujian yang dilakukan, antara lain :

1. Sampel dikeringkan dengan cara dipanaskan dalam oven pada temperatur 110°C selama 1 jam dengan tujuan untuk menghilangkan uap air, minyak, maupun cairan yang ada pada sampel.
2. Sampel yang telah dikeringkan kemudian ditimbang pada temperatur ruang dan catat berat sampel sebagai *dry weight* (D).
3. Sampel tersebut kemudian direndam dalam air yang dipanaskan pada suhu 100°C di atas *hot plate* selama 2 jam hingga keadaan menjadi jenuh, seperti pada Gambar 3.12. Hal ini dimaksudkan agar air masuk melalui pori – pori yang ada dalam sampel dan mengisi pori – pori tersebut. Sampel yang direndam harus berada ditengah – tengah *beaker glass* dan tidak boleh menyentuh bagian dasar dan dinding gelas.



Gambar 3.12. Sampel direbus pada $T=100^{\circ}\text{C}$

4. Kemudian, sampel dimasukkan ke dalam air dingin selama 12 jam
5. Lalu, sampel ditimbang dalam air, dimana posisi sampel tepat berada ditengah – tengah *beaker glass* atau dalam keadaan melayang dan catat beratnya sebagai *suspended weight* (S).
6. Proses kemudian dilanjutkan dengan menghilangkan air yang ada pada permukaan sampel dengan menggunakan kain katun atau linen dan lakukan penimbangan pada temperatur ruang dan catat hasilnya sebagai berat jenuh (S_w).

7. Setelah mendapatkan berat sampel dari berbagai keadaan, maka dapat dilanjutkan dengan menghitung nilai porositas dari sampel yang akan mewakili sifat dari pelat bipolar.

Perhitungan nilai porositas dapat dihitung dengan persamaan:

$$\% \text{ Porositas} = \frac{S_w - D}{D - S} \times 100\% \quad (3.4)$$

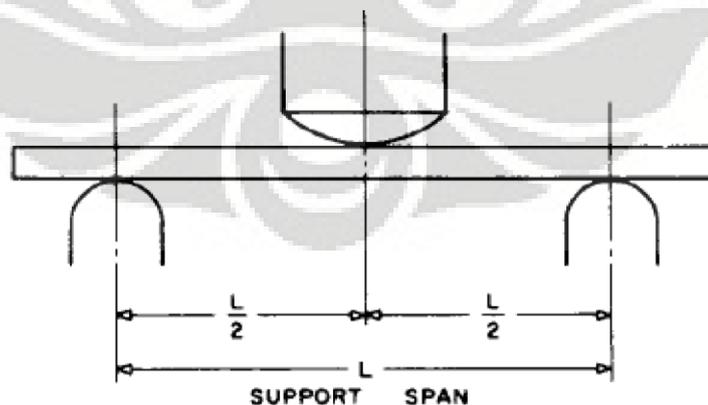
dimana, $S_w = \text{Saturated Weight}$ (gram)

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

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

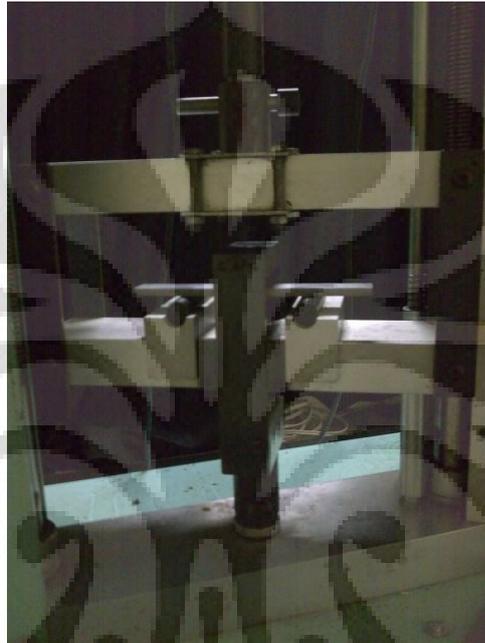
3.4.5 Pengujian Fleksural

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 keluar dari sistem sel bahan bakar. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM D790, yaitu “*standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electric insulating materials*”. Pengujian dilakukan dengan metode *three point bending*, dimana beban akan diberikan pada bagian tengah sampel uji. Ukuran dari sampel uji adalah 6 cm x 1,3 cm x 0,3 cm.



Gambar 3.13. Skema Pengujian Fleksural

Prinsip pengujian ini adalah sampel diletakkan ditengah – tengah diantara dua penahan, yang kemudian diberikan beban tekan di bagian tengah sampel dengan kecepatan 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 2,2 mm/menit.



Gambar 3.14. Proses Uji Fleksural

Dari pengujian akan diperoleh beban maksimal (P) yang diberikan pada sampel hingga patah dan untuk mendapatkan nilai kekuatan fleksural dari sampel, maka digunakan persamaan, seperti dibawah ini.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.5)$$

dimana, σ_f = tegangan / kekuatan lentur (MPa)

P = beban maksimal (N)

L = panjang specimen (mm)

b = lebar specimen (mm)

d = tebal specimen (mm)

3.4.6 Pengamatan Scanning Electron Microscopy dan EDS

Scanning electron microscope merupakan suatu pengamatan dengan menembakkan elektron pada permukaan sampel dan hamburan elektron yang berasal dari tumbukan akan ditangkap oleh detektor yang kemudian dapat menghasilkan citra dari sampel hingga dengan kedalaman tertentu. Pada penelitian ini, pengamatan SEM dilakukan untuk :

- a. Menganalisa morfologi permukaan pelat bipolar
- b. Mengetahui porositas yang terbentuk pada struktur komposit
- c. Mengetahui ikatan dan daya pembasahan antara matriks dan penguat
- d. Mengidentifikasi bentuk struktur butir dan persebaran butir dalam sampel

Adapun prosedur pengujian SEM adalah :

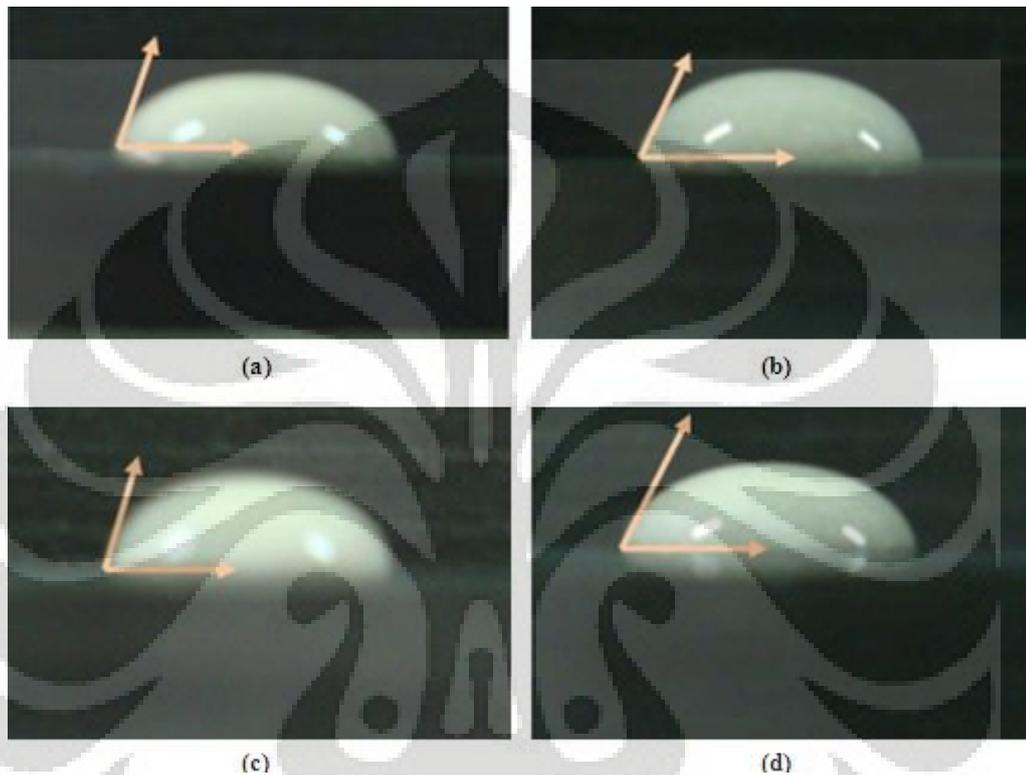
1. Potong sampel dengan ukuran tertentu (sesuai dengan *chamber* pada SEM) dan bersihkan sampel
2. Proses pembersihan sampel dilakukan dengan pemberian *ultrasonic* pada sampel didalam larutan alkohol selama 5 menit
3. Keringkan seluruh permukaan sampel dengan menggunakan mesin pengering
4. Sampel diletakkan ke dalam *chamber* yang kemudian akan divakum.
5. Setelah divakum, elektron ditembakkan pada sampel.
6. Selanjutnya dilakukan pengambilan gambar terhadap bagian-bagian yang diinginkan dengan perbesaran yang diinginkan

Pada penelitian ini, sampel yang digunakan berasal dari sampel hasil uji fleksural dengan ukuran 1,3 cm x 1 cm dengan perbesaran yang dilakukan mencapai 2000 x sehingga dapat terlihat dengan ikatan yang terjadi antara matriks dan penguat.

Pengamatan yang dilakukan disini juga disertai dengan pengujian *energy dispersive spectrometry* (EDS). Pengamatan ini digunakan untuk memberikan informasi jenis unsur yang terkandung dalam bahan (kualitatif), dan memberikan informasi jumlah unsur yang terdapat dalam bahan tersebut (kuantitatif). Dalam pengamatan ini, sampel yang digunakan adalah sampel hasil uji fleksural dengan penambahan *polyaniline* 200 mg.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

IV. 1 Pengamatan Sudut Kontak



Sudut Kontak antara Pelat Bipolar dengan Penambahan PANI a) 50 mg, b) 100 mg, c) 150 mg dan d) 200 mg

Pengamatan sudut kontak dilakukan dengan metode *sessile drop*, dimana polimer epoksi resin ditetaskan pada pelat bipolar yang telah ditambahkan PANI 50 mg, 100 mg, 150 mg dan 200 mg. Pengamatan ini dilakukan dengan tujuan untuk melihat daya pembasahan dari epoxy terhadap material penyusun pelat lainnya, yaitu grafit EAF, *carbon black* dan *polyaniline*. Daya pembasahan dari epoxy dapat diketahui dengan melihat sudut kontak yang terbentuk antara epoxy dengan pelat. Seperti yang telah dijelaskan pada sebelumnya, bahwa material akan mudah dibasahi oleh material lain jika sudut kontak yang terbentuk diantara keduanya lebih kecil dari 90° . Selain itu, dengan adanya suatu pembasahan yang baik, maka ikatan yang terbentuk antara *epoxy resin* dengan material pengisi lainnya juga akan baik.

Pada Gambar 4.1 terlihat sudut kontak dari masing – masing pelat bipolar ketika epoksi ditetaskan diatas permukaannya. Dari seluruh gambar, pelat bipolar dengan penambahan 50 mg *polyaniline* memiliki sudut kontak yang lebih kecil dibandingkan pelat bipolar lainnya, yaitu $59,49^\circ$. Hal ini menandakan bahwa pembasahan yang terjadi antara epoksi terhadap material lainnya berlangsung baik. Begitu pula dengan pelat bipolar dengan penambahan 200 mg *polyaniline*, walaupun sudut kontak yang terbentuk sedikit lebih besar dari pelat bipolar dengan 50 mg PANI, yaitu $60,14^\circ$.

Pada Gambar 4.1 b) dan c), sudut kontak yang terbentuk antara epoksi dengan material penyusun pelat lainnya sangat besar, yaitu $65,81^\circ$ dan $71,68^\circ$, sehingga dapat dikatakan daya pembasahan dari kedua pelat ini cukup buruk. Daya pembasahan yang rendah, dapat memungkinkan terbentuknya ikatan yang lemah antar material dan hal ini dapat mempengaruhi sifat dan performa dari pelat bipolar.

Secara keseluruhan, daya pembasahan dari seluruh pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* cukup baik karena sudut kontak yang terbentuk antara tetesan epoksi terhadap pelat lebih kecil dari 90° . Hal ini juga menandakan bahwa proses pencampuran yang telah dilakukan ketika proses pembuatan pelat bipolar berlangsung cukup baik, dimana dalam proses ini digunakan metanol sebagai pelarut epoksi dan *toluene* sebagai pelarut *polyaniline* sehingga dapat mempercepat proses pembasahan dari grafit dan *carbon black*.

IV.2 Pengamatan Visual

Dalam penelitian ini, pelat bipolar yang dibuat dengan variabel penambahan *polyaniline* sebesar 50 mg, 100 mg, 150 mg dan 200 mg untuk masing – masing pelat. Pelat bipolar yang dihasilkan memiliki ukuran sekitar 15 cm x 15 cm x 0,4 cm. Hampir semua pelat bipolar memiliki bentuk, permukaan dan karakteristik yang sama, namun untuk lebih jelasnya akan dijabarkan sebagai berikut.

Gambar 4.2 merupakan pelat bipolar dengan menggunakan penambahan *polyaniline* sebesar 50 mg. Pada gambar tersebut, terlihat bahwa pelat bipolar

yang dihasilkan memiliki permukaan yang halus dan rata. Selain itu, pelat juga memiliki kekerasan yang baik, dan tidak rapuh. Disini, tidak terdapat pori – pori pada permukaan pelat yang biasanya disebabkan oleh metanol.



Gambar 4.2. Pelat Bipolar 1 dengan Penambahan *Polyaniline* 50 mg



Gambar 4.3. Pelat Bipolar 2 dengan Penambahan *Polyaniline* 100 mg

Gambar 4.3 merupakan pelat bipolar dengan penambahan 100 mg *polyaniline* sebagai aditif konduktif. Pelat yang dihasilkan hampir sama dengan pelat bipolar dengan penambahan 50 mg *polyaniline*, yaitu memiliki permukaan

yang halus dan rata dikarenakan pada permukaan pelat tidak ditemukan adanya pori – pori yang diakibatkan oleh penguapan dari metanol.



Gambar 4.4. Pelat Bipolar 3 dengan Penambahan *Polyaniline* 150 mg

Pembuatan pelat bipolar ketiga dilakukan dengan menggunakan penambahan *polyaniline* sebanyak 150 mg. Pada Gambar 4.4, terlihat bahwa pelat bipolar yang dihasilkan memiliki permukaan yang halus dan rata, serta kekerasan dan ketangguhan yang cukup baik (tidak rapuh)



Gambar 4.5. Pelat Bipolar 4 dengan Penambahan *Polyaniline* 200 mg

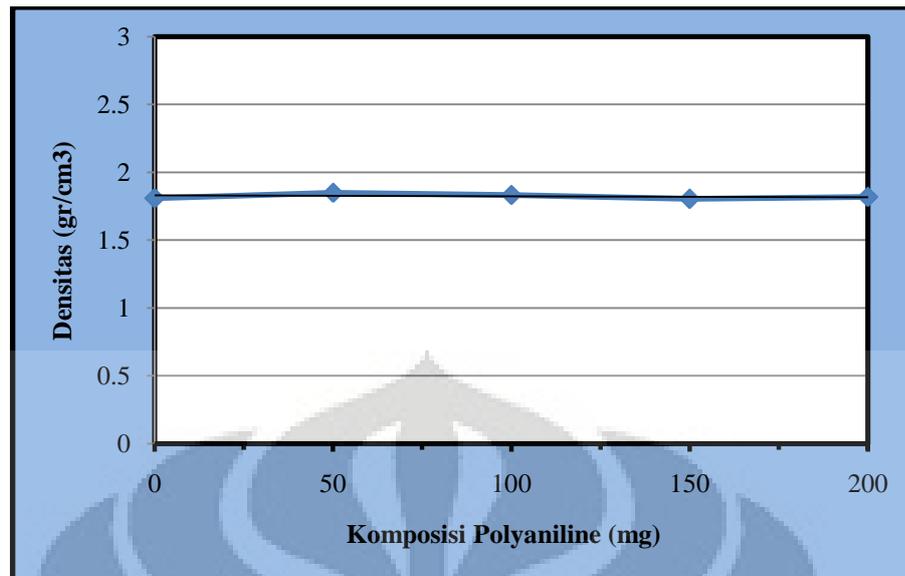
Pelat bipolar terakhir yang dihasilkan dengan menambahkan *polyaniline* sebanyak 200 mg memiliki permukaan hampir sama dengan pelat bipolar lainnya, yaitu halus dan rata. Namun, pelat bipolar ini memiliki kekerasan dan ketangguhan yang jauh lebih baik dibandingkan pelat lainnya. Hal ini dibuktikan ketika proses pemotongan sampel, dimana pelat ini sangat sulit untuk dipotong dan dijadikan sampel. Pelat bipolar dengan 200 mg PANI juga memiliki ketebalan yang tidak seragam di setiap sisinya dan hal ini disebabkan oleh pengisian bakalan dalam cetakan tidak rata. Bila dibandingkan dengan pelat lainnya, pelat bipolar 4 memiliki ketebalan yang jauh lebih besar.

IV.3 Pengujian Densitas

Salah satu syarat dari pembuatan pelat bipolar yang dilakukan disini adalah memiliki berat yang rendah sehingga dapat mengunrangi berat total dari sistem sel bahan bakar. Besarnya berat suatu pelat dapat dilakukan dengan pengujian densitas, dimana dalam penelitian ini menggunakan prinsip Archimedes. Pelat bipolar dengan densitas yang rendah akan dapat meningkatkan efisiensi dari sel sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi, khususnya *portable application*. Tabel 4.1 merupakan hasil pengujian yang telah dilakukan pada pelat dengan penambahan *polyaniline* dan Gambar 4.2 merupakan grafik pengaruh dari *polyaniline* terhadap densitas pelat bipolar.

Tabel 4.1 Data Uji Densitas

Komposisi PANI (mg)	Densitas (gr/cm ³)
0	1.81
50	1.85
100	1.83
150	1.80
200	1.82



Gambar 4.6. Grafik Pengaruh Komposisi *Polyaniline* terhadap Densitas Pelat Bipolar

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa penambahan *polyaniline* tidak mempengaruhi nilai densitas secara signifikan. Hal ini disebabkan oleh penambahan *polyaniline* dengan jumlah yang relatif sedikit hampir tidak mempengaruhi nilai densitas yang dihasilkan dan seperti yang diketahui densitas dari *polyaniline* adalah sekitar $1,2 \text{ gr/cm}^3$. Akibatnya, densitas yang dihasilkan hampir sama dengan densitas grafit, yaitu sekitar $1,8 \text{ gr/cm}^3$.

Pada prinsipnya hampir semua jenis polimer memiliki spesifik volume, begitu pula dengan epoksi resin. Spesifik volume akan dipengaruhi oleh temperatur, dimana ketika suatu polimer didinginkan secara perlahan maka nilai spesifik volume akan rendah. Adanya penurunan temperatur menyebabkan terjadinya pergerakan termal dari molekul polimer sehingga molekul – molekul tersebut mempunyai kesempatan untuk tersusun secara berdekatan. Hal ini tentunya akan mengurangi spesifik volume dari *epoxy resin*, dan secara tidak langsung meningkatkan nilai densitasnya. Spesifik volume juga dipengaruhi oleh tekanan. Ketika suatu polimer diberi penekanan, maka spesifik volume yang ada pada polimer tersebut akan berkurang dikarenakan jarak antar molekul polimer menjadi semakin rapat. Hal ini mengakibatkan terjadinya penurunan dari spesifik volume dan meningkatkan densitas dari polimer.

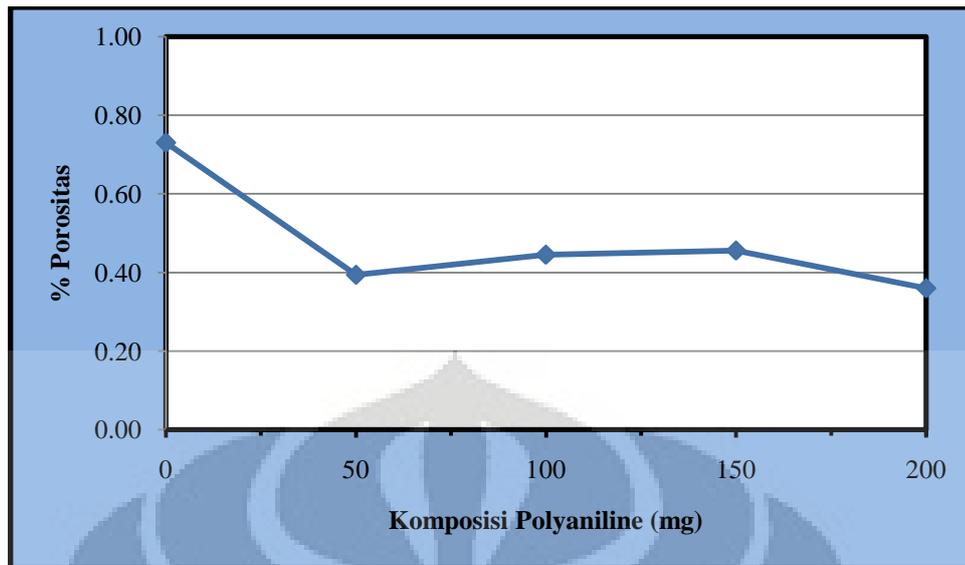
Pada penelitian ini, densitas yang dihasilkan dari pembuatan pelat bipolar umumnya cukup kecil dan perubahan yang terjadi tidak terlalu signifikan, yaitu berkisar antara 1,81 hingga 1,85 gr/cm³. Hal ini dikarenakan temperatur dan tekanan yang digunakan sama, yaitu 70°C dan 300 kg/cm² sehingga tidak terlalu mempengaruhi nilai densitas yang diperoleh. Nilai densitas dari keempat pelat bipolar telah memenuhi persyaratan, yaitu <5 gr/cm³. Seperti yang diketahui bahwa semakin kecil nilai densitas dari suatu pelat bipolar, maka akan dapat mengurangi berat dan volume dari sel bahan bakar sehingga dapat lebih mudah digunakan pada berbagai aplikasi.

IV.4 Pengujian Porositas

Selain memiliki densitas yang rendah, pelat bipolar juga harus memiliki persentase porositas yang kecil dengan tujuan agar tidak adanya gas lain yang masuk ke dalam sistem yang dapat mengganggu performa dan kerja dari sel. Nilai porositas dari pelat bipolar diharapkan sekecil mungkin sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan performa dari sel bahan bakar. Pada tabel 4.2 terlihat bahwa persentase porositas yang diperoleh cukup fluktuatif pada setiap pelat bipolar yang dibuat dan untuk melihat lebih jelasnya pengaruh penambahan *polyaniline* terhadap nilai porositas dari pelat, dapat dilihat pada Gambar 4.7.

Tabel 4.2 Data Uji Porositas

Komposisi PANI (mg)	% Porositas
0	0.73
50	0.39
100	0.45
150	0.46
200	0.36



Gambar 4.7. Grafik Pengaruh Komposisi *Polyaniline* terhadap % Porositas

Gambar 4.7, terlihat bahwa % porositas pada pelat bipolar tanpa penambahan *polyaniline* cukup besar, yaitu 0,73% ^[9]. Namun, ketika ditambahkan dengan *polyaniline* dengan jumlah yang sedikit (50 – 200 mg), akan dapat menurunkan persentase (%) porositas yang cukup besar, yaitu 0,36 %. Meskipun *polyaniline* memiliki kesulitan untuk larut dalam polimer lain, tetapi polimer ini dapat mengisi ruang kosong yang ada, baik antara epoksi dengan grafit maupun *carbon black* sehingga akan terjadi penurunan porositas. Oleh karena itu, semakin banyak *polyaniline* yang ditambahkan, maka ruang kosong yang terbentuk dalam matrik komposit semakin sedikit sehingga porositas yang terbentuk akan semakin berkurang.

Porositas yang ada pada pelat bipolar mungkin disebabkan oleh adanya metanol dan *toluene* yang digunakan sebagai pelarut dari epoksi dan *polyaniline*. Dalam penelitian ini, pelat bipolar dicetak pada temperatur cukup tinggi, yaitu 70°C yang menyebabkan kedua pelarut tersebut akan mengalami penguapan. Apabila penyebaran metanol dan *toluene* pada saat proses pencampuran tidak merata (pembasahan hanya terjadi di sebagian dari material), maka ketika proses pencetakan kedua pelarut ini akan menguap dan kemudian terbentuk pori – pori akibat tidak adanya epoksi atau grafit yang mengisi didaerah tersebut. Semakin banyak jumlah metanol dan *toluene* yang mengumpul di salah satu bagian pelat

bipolar, maka kemungkinan terbentuknya porositas akan semakin besar dikarenakan lamanya waktu yang dibutuhkan oleh kedua pelarut tersebut untuk mengalami penguapan.

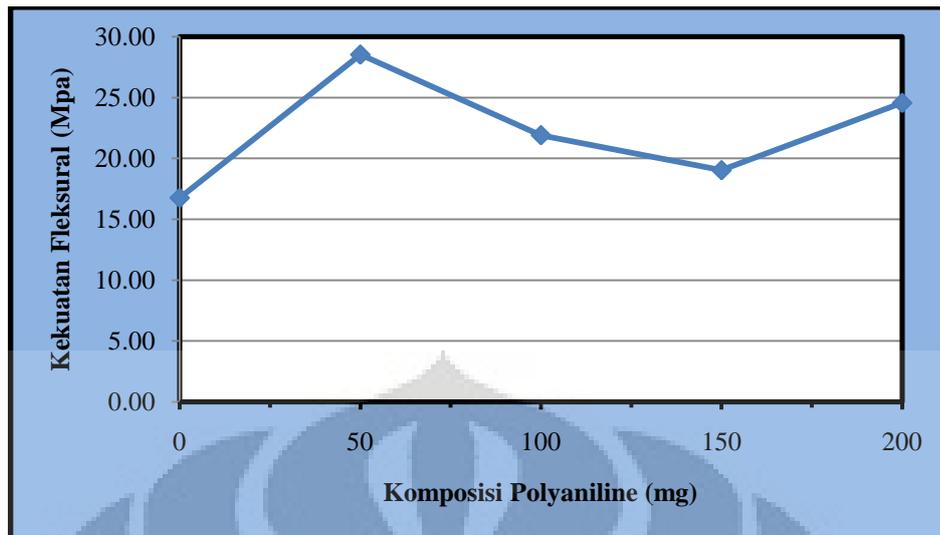
Namun, secara keseluruhan porositas akan menurun seiring dengan penambahan dari polimer konduktif, *polyaniline*. Porositas yang diperoleh disini adalah berkisar antara 0,36 – 0,46 % dan itu menandakan bahwa pelat bipolar ini memenuhi persyaratan dikarenakan nilai porositas yang sangat kecil, yaitu < 1 % sehingga tidak terlalu berpengaruh terhadap reaksi yang terjadi dalam sel bahan bakar.

IV.5 Pengujian Fleksural

Salah satu syarat dari pelat bipolar adalah memiliki kekuatan fleksural yang baik, yaitu sekitar 25 MPa dengan tujuan agar dapat menahan tekanan dari gas, baik yang masuk maupun keluar dari sistem sel dan juga dapat menahan komponen lain dari sel bahan bakar ketika dilakukan proses perakitan. Semakin tinggi kekuatan fleksural dari pelat bipolar, maka semakin baik performa yang akan dihasilkan. Pada penelitian ini, keempat pelat bipolar yang dibuat memiliki kekuatan fleksural yang beragam, seperti pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.8.

Tabel 4.3 Data Uji Fleksural

Komposisi PANI (mg)	Fleksural (MPa)
0	16.75
50	28.52
100	21.90
150	19.02
200	24.55



Gambar 4.8. Grafik Pengaruh Penambahan *Polyaniline* terhadap Kekuatan Fleksural

Dari Gambar 4.8, terlihat bahwa kekuatan dari pelat bipolar mengalami peningkatan cukup tinggi ketika penambahan *polyaniline*. Peningkatan ini cukup jelas terlihat antara pelat bipolar tanpa penambahan *polyaniline* dengan pelat bipolar dengan penambahan 50 mg *polyaniline*. Hal ini terjadi akibat adanya ikatan yang cukup kuat antara grafit dan epoksi resin. Ikatan tersebut terjadi karena daya pembasahan dari epoksi resin yang baik terhadap grafit, *carbon black* dan *polyaniline*. Daya pembasahan ini terjadi karena adanya metanol sebagai pelarut dari epoksi resin dan *toluene* sebagai pelarut dari *polyaniline* sehingga mampu membasahi seluruh permukaan material. Meskipun, terdapat penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg, namun efek dari penambahan tersebut belum terlihat.

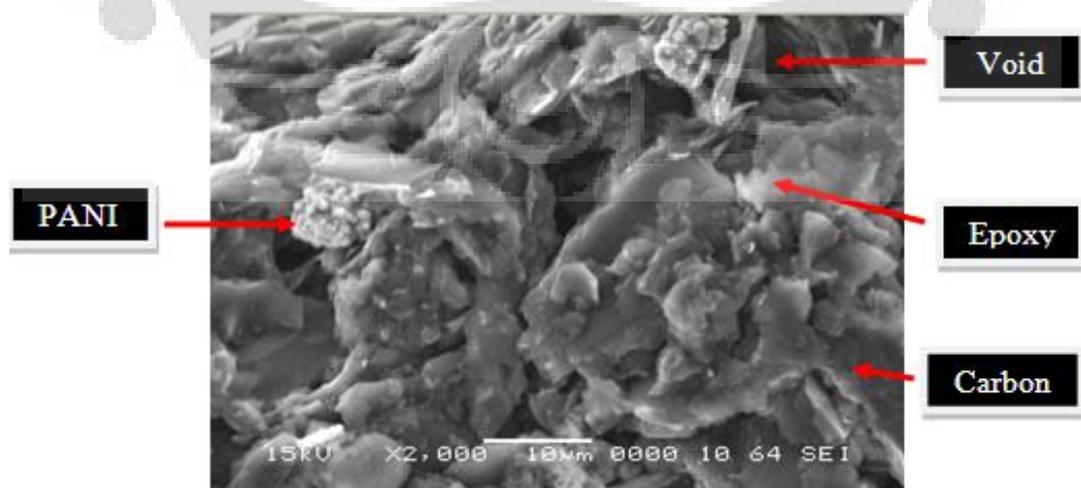
Pada penambahan *polyaniline* sebanyak 100 mg dan 150 mg, terjadi penurunan kekuatan fleksural disebabkan oleh tidak terbentuknya ikatan yang kuat antara epoksi resin dengan grafit dan *carbon black* atau dengan kata lain epoksi resin tidak dapat membasahi seluruh permukaan dari grafit dan *carbon black*. Berkurangnya jumlah grafit akan menurunkan kekuatan fleksural dari pelat bipolar. Disini, penambahan *polyaniline* masih belum memberikan efek terhadap kekuatan fleksural dari pelat (karena kadarnya sedikit) sehingga pengaruh dari grafit dan *carbon black* masih dominan terhadap kekuatan yang dihasilkan oleh pelat bipolar.

Peningkatan kekuatan fleksural terjadi lagi ketika pelat bipolar ditambahkan *polyaniline* sebanyak 200 mg. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.12 yang merupakan hasil pengamatan SEM, dapat dilihat bahwa pembasahan yang terjadi antara *epoxy* dengan grafit dan *carbon black* sangat baik sehingga ikatan yang terbentuk di antara material tersebut juga baik. Adanya penambahan *polyaniline*, tentu akan mempengaruhi kekuatan fleksural dari pelat bipolar. Semakin banyak *polyaniline* yang ditambahkan, maka kekuatan fleksural yang dihasilkan akan semakin meningkat. Pada penelitian ini, pengaruh *polyaniline* baru terlihat pada penambahan sebesar 200 mg.

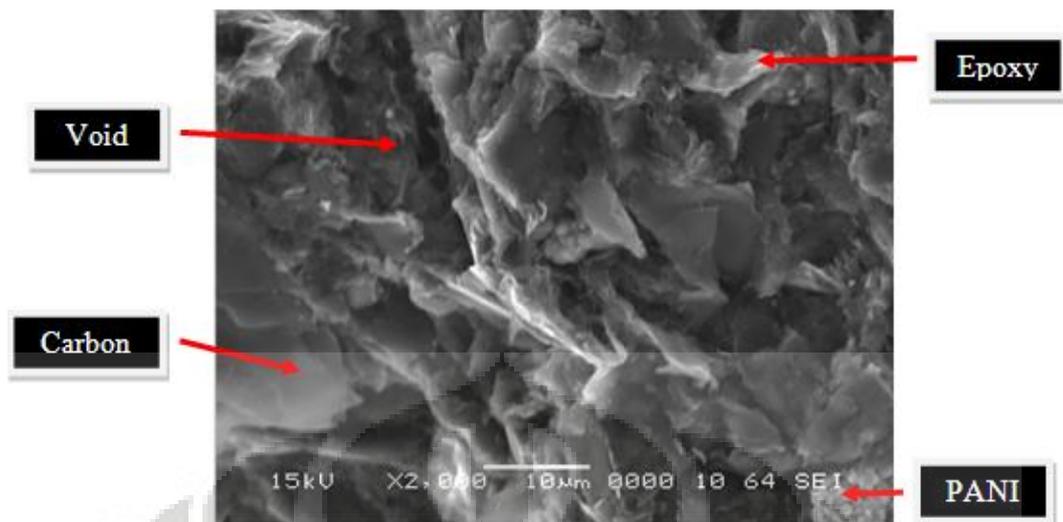
Secara keseluruhan, penambahan dari *polyaniline* akan dapat meningkatkan kekuatan fleksural dari pelat bipolar dengan catatan penyebaran dari material yang merata dan daya pembasahan yang baik antar material. Dalam penelitian ini, kekuatan pelat bipolar sudah mencapai 25 MPa (untuk pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* 50 mg dan 200 mg) sehingga telah memenuhi persyaratan untuk suatu pelat bipolar.

IV.6 Pengamatan Scanning Electron Microscope dan EDS

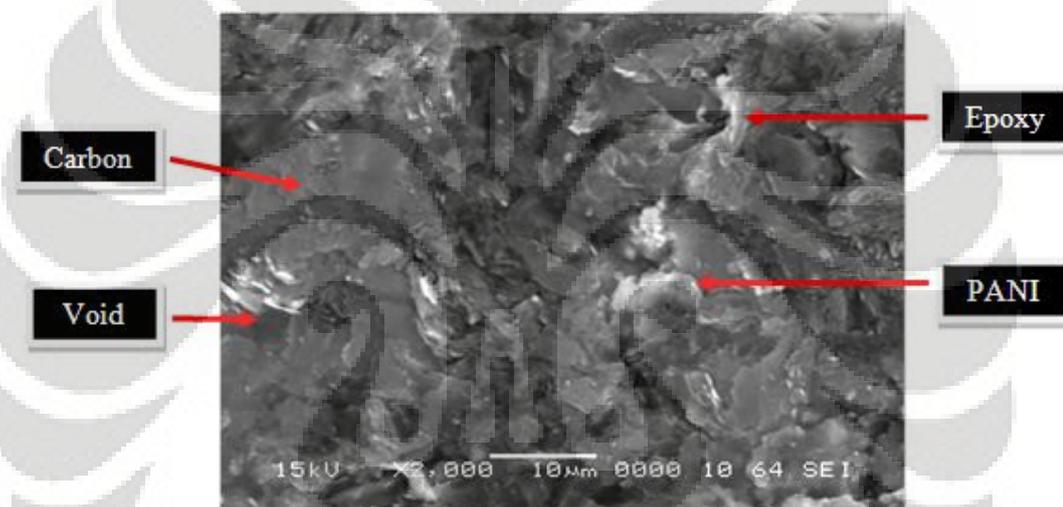
Pengamatan pelat bipolar dengan menggunakan *scanning electron microscope* bertujuan untuk mengetahui ikatan yang terjadi dan daya pembasahan antara epoksi dengan material pengisi, yaitu grafit, *carbon black* dan *polyaniline* dan morfologi permukaan. Dalam pengamatan ini, digunakan permukaan patahan dari sampel hasil uji fleksural dan adapun hasil pengamatan yang telah dilakukan dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



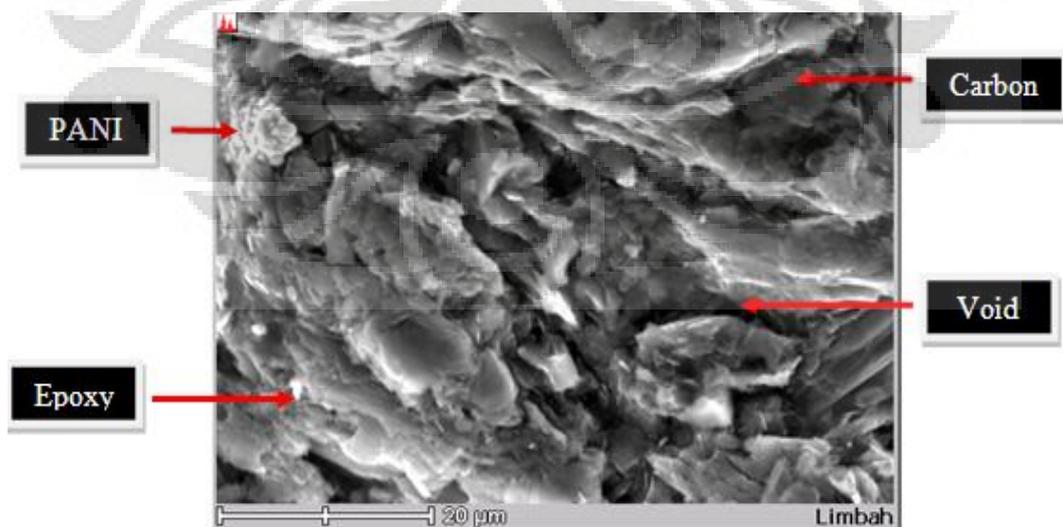
Gambar 4.9. Hasil SEM Pelat Bipolar Penambahan 50 mg PANI



Gambar 4.10. Hasil SEM Pelat Bipolar Penambahan 100 mg PANI



Gambar 4.11. Hasil SEM Pelat Bipolar Penambahan 150 mg PANI



Gambar 4.12. Hasil SEM Pelat Bipolar Penambahan 200 mg PANI

Pada pelat bipolar dengan penambahan 50 mg dan 200 mg *polyaniline* dapat terlihat bahwa ikatan yang terbentuk antara epoksi resin dan grafit cukup kuat, dimana epoksi resin hampir dapat membasahi seluruh permukaan dari grafit, seperti dalam Gambar 4.9 dan 4.12. Hal ini sangat berbeda dengan pelat bipolar dengan penambahan 100 mg dan 150 mg *polyaniline*. Pada pelat bipolar dengan 100 mg PANI, epoksi resin hanya dapat membasahi sebagian dari permukaan grafit dan *carbon black*, sedangkan pada pelat bipolar dengan penambahan 150 mg PANI, epoksi resin hampir tidak dapat membasahi seluruh permukaan dari grafit dan *carbon black*. Akibatnya, ikatan yang terbentuk antara epoksi dengan grafit dan *carbon black* pun tidak kuat.

Kekuatan ikatan antara matriks dan material penguat akan menentukan sifat dan performa dari pelat bipolar yang dihasilkan, terutama sifat kekuatan fleksuralnya. Ketika beban diberikan pada pelat bipolar yang memiliki ikatan cukup kuat antara matriks dan penguat (seperti pada Gambar 4.9 dan 4.12), maka energi yang dibutuhkan untuk memutuskan ikatan tersebut akan jauh lebih besar, dibandingkan dengan pelat bipolar yang memiliki ikatan lemah antara matriks dan penguatnya (seperti pada Gambar 4.10 dan 4.11).

Pada hasil SEM seluruh pelat bipolar, terdapat ruang – ruang kosong atau biasa dinamakan *void*. Ruang – ruang kosong ini dipengaruhi oleh ikatan yang terbentuk antara epoksi resin sebagai matriks terhadap material penguat, seperti grafit, *carbon black* dan *polyaniline*. Semakin kuat ikatan, maka ruang – ruang kosong yang akan terbentuk semakin banyak ketika diberi suatu beban tekan pada pelat bipolar. Hal ini dikarenakan adanya pemutusan ikatan yang sangat sulit terjadi sehingga menyebabkan pergeseran antar bidang dari material penyusun dan kemudian membentuk suatu ruang kosong atau *void*. Apabila pembebanan terus dilakukan, maka pergeseran akan mengalami perambatan dan *void* yang terbentuk pun akan semakin banyak dan besar.

Pada pelat bipolar dengan penambahan 50 mg *polyaniline*, jumlah dan luas dari ruang kosong yang terbentuk lebih besar dan kemudian diikuti dengan pelat bipolar dengan penambahan 200 mg, 100 mg dan 150 mg *polyaniline*. Disini terlihat bahwa ikatan antar muka yang terbentuk sangat kuat sehingga ketika

diberi pembebanan akan sulit untuk diputus dan hal ini terbukti dari kekuatan fleksural yang diperoleh, yaitu 28,52 MPa. Begitu juga dengan pelat bipolar dengan penambahan 200 mg *polyaniline* yang memiliki kekuatan fleksural sekitar 24,55 MPa.

Gambar 4.10 dan 4.11, terlihat bahwa void – void yang terbentuk tidak terlalu banyak, terutama pada pelat bipolar dengan penambahan 150 mg PANI. Morfologi permukaan yang cenderung rata disebabkan oleh ikatan antar muka dari material penyusun sangat lemah sehingga ketika dilakukan pembebanan, maka ikatan tersebut akan sangat mudah putus tanpa disertai dengan adanya pergeseran bidang yang relatif besar dan energi yang dibutuhkan pun juga rendah, yaitu 21,90 MPa dan 19,02 MPa untuk pelat bipolar dengan penambahan PANI sebesar 100 mg dan 150 mg.

Pada Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa adanya suatu struktur yang berada diantara *epoxy resin*, grafit dan *carbon black*. Setelah dibandingkan dengan literatur bahwa struktur ini merupakan struktur dari *polyaniline*. Pemisahan yang terjadi antara *polyaniline* dengan material lainnya dikarenakan masih sedikitnya jumlah PANI yang digunakan sehingga tidak dapat larut dengan baik diantara matriks *epoxy*.

Pengamatan EDS juga dilakukan dalam penelitian ini dengan tujuan untuk melihat unsur yang terdapat pada titik tertentu dari material. Pengamatan dilakukan pada sampel pelat bipolar dengan penambahan 200 mg PANI hasil perpatahan uji fleksural dan hasil dari pengamatan tersebut ada pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Unsur – Unsur pada Pelat Bipolar dengan 200 mg PANI

Unsur	Massa (%)
C	77,79
N	2,52
O	3,87
Cl	2,08
Ca	1,21
Fe	9,87
In	2,66

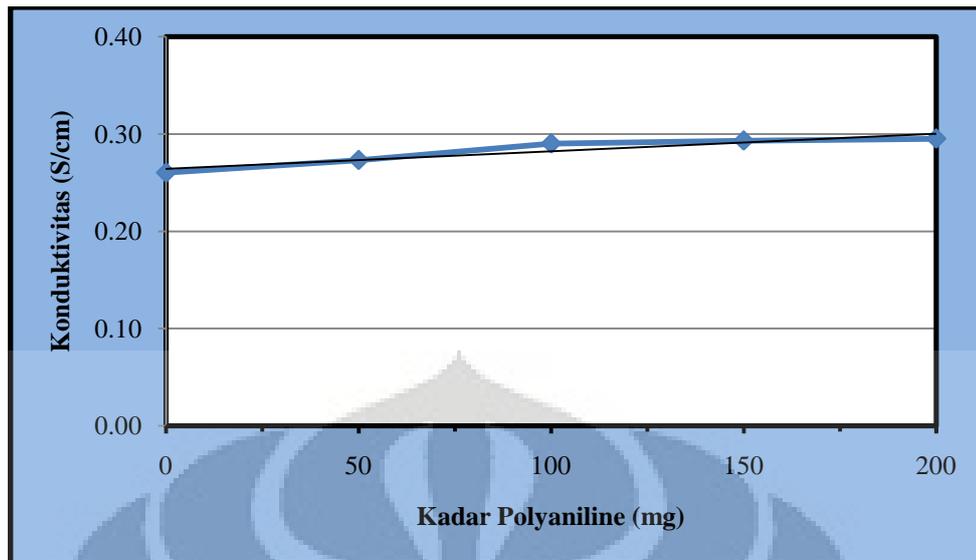
Pada pelat bipolar dengan PANI 200 mg, terdapat unsur karbon (C) dengan jumlah cukup besar dikarenakan hampir semua material yang digunakan dalam pelat bipolar berbasis karbon. Unsur N menandakan bahwa di titik ini terdapat *polyaniline*, mengingat terdapat adanya ikatan -NH- pada struktur rantai utamanya, dan begitu juga dengan unsur Cl yang merupakan bagian dari *polyaniline*. Hal ini dimungkinkan bahwa sebelumnya *polyaniline* yang digunakan telah di-*doping* dengan asam hidroklorin. Unsur – unsur lain, seperti Fe, Ca, In diduga berasal dari *carbon black* yang digunakan. Hal ini disebabkan oleh kandungan karbon yang ada pada *carbon black* hanya sekitar 10 % sehingga dimungkinkan adanya unsur lain pada *carbon black*. Akibatnya, ketika proses pembuatan pelat bipolar, unsur – unsur tersebut akan ikut tercampur ke dalam pelat.

IV.7 Pengujian Konduktivitas

Pelat bipolar merupakan komponen yang memiliki fungsi penting dalam suatu sel bahan bakar, yaitu sebagai pengumpul dan pembawa elektron dari anoda ke katoda. Untuk mendukung fungsi tersebut, maka diperlukan suatu material dengan konduktivitas yang baik sehingga dapat memenuhi persyaratan dari suatu pelat bipolar (> 100 S/cm). Dalam penelitian ini, digunakan suatu penambahan material konduktif agar dapat meningkatkan konduktivitas dari pelat dan untuk mengetahui pengaruh dari penambahan tersebut, maka dilakukan suatu pengujian konduktivitas dengan menggunakan *four point probe test machine*. Adapun hasil dari pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Data Uji Konduktivitas

Kadar PANI (mg)	Konduktivitas (S/cm)
0	0.26
50	0.27
100	0.29
150	0.293
200	0.30

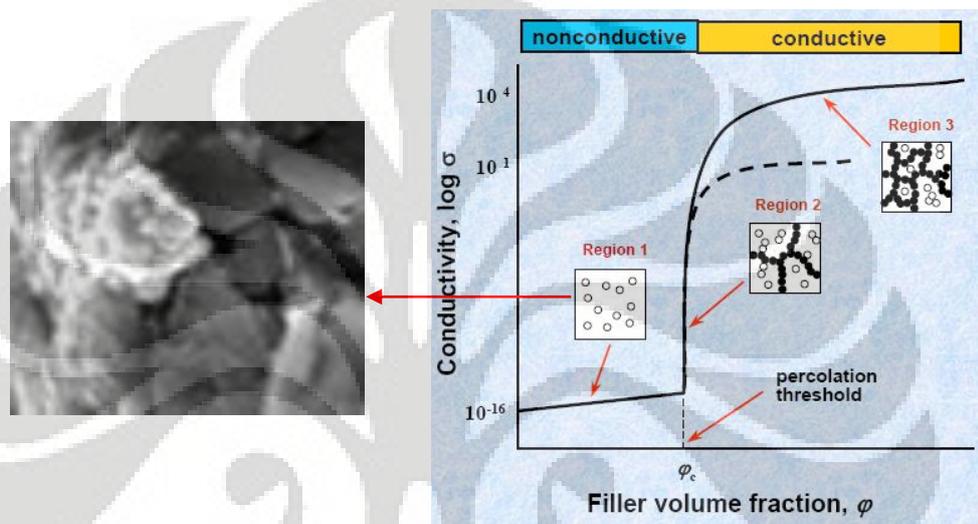


Gambar 4.13. Grafik Pengaruh *Polyaniline* terhadap Konduktivitas Pelat Bipolar

Dari Gambar 4.13, terlihat adanya peningkatan nilai konduktivitas dari pelat bipolar tanpa penambahan *polyaniline* hingga pelat bipolar 5 dengan penambahan 200 mg *polyaniline*. Peningkatan ini terjadi karena adanya peningkatan kadar *polyaniline* yang merupakan polimer konduktif sehingga akan dapat membantu mengalirkan elektron dalam pelat bipolar. Dalam sistem komposit, material *polyaniline*, grafit dan *carbon black* akan saling membentuk suatu ikatan yang konduktif. Oleh karena adanya ikatan tersebut, maka pergerakan elektron dalam pelat bipolar akan berlangsung dengan baik.

Namun, karena kelarutan dari *polyaniline* yang sangat sulit sehingga ketika dicampurkan dengan epoksi resin, *polyaniline* tidak dapat larut dalam matriks, melainkan akan berdiri sendiri dan berikatan dengan epoksi resin, seperti yang terlihat pada hasil SEM dari pelat bipolar. Akibatnya, ikatan konduktif yang terbentuk antara *polyaniline* dan grafit serta *carbon black* tidak sempurna sehingga nilai konduktivitas yang dihasilkan pun tidak maksimal. Rendahnya nilai konduktivitas yang dihasilkan juga dapat disebabkan oleh jumlah yang sedikit dan penyebaran *polyaniline* yang kurang merata. Pada Gambar 4.14, sangat jelas terlihat bahwa *polyaniline* hanya mengumpul di salah satu bagian dari sistem dan hal ini jelas tidak dapat mengurangi sifat isolator dari epoksi secara signifikan sehingga penambahan yang dilakukan pun tidak banyak memberi perubahan dari

nilai konduktivitas. Pada penelitian ini penambahan *polyaniline* sebagai polimer konduktif masih dibawah batas *percolation threshold*, dimana *polyaniline* belum dapat terdispersi dengan baik di dalam matriks sehingga konduktivitas yang dihasilkan belum optimum. Apabila jumlah *polyaniline* terus ditingkatkan, maka akan terjadi suatu ikatan yang baik antara *polyaniline* dengan material konduktif lainnya, seperti grafit dan *carbon black* sehingga dapat meningkatkan konduktivitas dari pelat bipolar.



Gambar 4.14. Grafik Pengaruh Penambahan Bahan Pengisi terhadap Konduktivitas Listrik [40]

Ukuran partikel dari material pun juga akan mempengaruhi nilai konduktivitas dari pelat bipolar. Semakin kecil ukuran partikel, maka luas permukaan akan semakin besar sehingga ikatan konduktif yang terbentuk antar sesama material akan semakin baik dan akibatnya pergerakan elektron pun akan berlangsung dengan mudah. Pada penelitian ini, ukuran *carbon black* yang digunakan adalah 140 mesh (105 μm), sedangkan ukuran partikel grafit adalah <325 mesh (44 μm). Besarnya ukuran *carbon black* meyebabkan fungsinya tidak optimum, yaitu sebagai jaringan penghubung antar grafit dalam matriks epoksi, dikarenakan *carbon black* tidak dapat mengisi ruang kosong antar grafit secara merata sehingga perpindahan elektron pun akan terganggu.

Tabel 4.5 memperlihatkan nilai konduktivitas yang dihasilkan dari pelat bipolar, yaitu berkisar antara 0,25 hingga 0,3 S/cm. Rendahnya nilai konduktivitas ini dikarenakan masih terisolasinya material konduktif, yaitu grafit dan *carbon*

black oleh epoksi yang merupakan material isolator yang baik sehingga pergerakan elektron antar material menjadi terhambat dan arus yang mengalir diantara material tersebut juga akan terhalang.

IV.8 Perbandingan Pelat Bipolar

Pada penelitian ini, material komposit yang dibuat adalah berbasis polimer termoset, yaitu epoksi dan ditambahkan dengan material lain sebagai penguat berupa grafit limbah EAF dan *conducting filler* berupa *carbon black* dan *polyaniline*. Tabel 4.6 merupakan sifat dan karakteristik yang dihasilkan dari seluruh pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline*.

Tabel 4.6. Perbandingan Sifat Komposit

Penambahan PANI (mg)	Densitas (gr.cm ⁻³)	Porositas (%)	Kekuatan Fleksural (MPa)	Konduktivitas Listrik (S.cm ⁻¹)
0	1.81	0.73	16.75	0.26
50	1.85	0.39	28.52	0.27
100	1.83	0.45	21.90	0.29
150	1.80	0.46	19.02	0.293
200	1.82	0.36	24.55	0.30

Jika dilihat dari Tabel 4.6, pelat bipolar dengan penambahan 200 mg *polyaniline* memiliki sifat yang baik dibandingkan dengan pelat bipolar lainnya. Pelat ini memiliki berat yang ringan, ditandai dengan densitas yang rendah yaitu 1,818 gr/cm³ dan juga porositasnya pun memiliki nilai paling rendah, yaitu sekitar 0,36 %. Meskipun beratnya cukup ringan, namun kekuatan fleksuralnya tinggi, yaitu 24,549 dan mampu menghantarkan listrik cukup baik daripada pelat lainnya. Dari data ini dapat dilihat bahwa pelat yang dihasilkan memenuhi persyaratan dari suatu pelat bipolar (kecuali nilai konduktivitas) dan pengaruh dari *polyaniline* mulai terlihat ketika dilakukan penambahan sebanyak 200 mg.

BAB V

KESIMPULAN

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan pada kelima pelat bipolar, maka dapat diambil beberapa kesimpulan, sebagai berikut :

1. Pelat bipolar dengan penambahan 50 mg *polyaniline*, memiliki nilai densitas dan kekuatan fleksural paling besar, yaitu $1,85 \text{ gr/cm}^3$ dan 28,52 MPa serta porositas yang cukup kecil, yaitu 0,39%. Namun, konduktivitas yang dihasilkan paling kecil diantara pelat bipolar lainnya, yaitu 0,27 S/cm.
2. Pelat bipolar dengan penambahan 100 mg *polyaniline* memiliki densitas sekitar $1,83 \text{ gr/cm}^3$ dan porositas 0,45 %. Kekuatan fleksural yang dimiliki oleh pelat ini cukup besar, yaitu 21,90 MPa dan konduktivitas yang dihasilkan lebih baik daripada pelat bipolar dengan penambahan 50 mg *polyaniline*, yaitu 0,29 S/cm
3. Pelat bipolar dengan penambahan 150 mg *polyaniline* memiliki densitas paling rendah, yaitu $1,80 \text{ gr/cm}^3$ dan porositas yang paling besar, yaitu 0,46%, serta kekuatan fleksural paling rendah dibandingkan pelat bipolar lainnya, yaitu 19,02 MPa.
4. Komposisi pelat bipolar yang paling optimum adalah pada penambahan 200 mg karena memiliki densitas yang cukup rendah, yaitu $1,82 \text{ gr/cm}^3$, persentase porositas paling kecil, yaitu 0,36%, kekuatan fleksural yang cukup baik, yaitu 24,55 MPa dan nilai konduktivitas paling tinggi, yaitu 0,30 S/cm.
5. Pengaruh dari penambahan *polyaniline* sebagai *conducting filler* pada sistem komposit dengan matriks polimer baru terlihat ketika diberi penambahan sebesar 200 mg.

DAFTAR PUSTAKA

1. BP Statistical Review of World Energy, June 2005
(www.bp.com/statisticalreview)
2. Dampak Surutnya Cadangan Minyak Indonesia Oleh Praptono Djuned
3. US. Department of Energy. *Fuel Cell Handbook 7th Edition*. EG & G Technical Services Inc., Morgantown, West Virginia, November 2004
4. Listiani, Eniya Dewi. *Mass Transfer Study On Polymer Electrolyte Fuel Cell*. 2007.
5. Yuhua Wang. *Conductive Thermoplastic Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. 2006.
6. J.H. Hirschenhofer, D.B. Stauffer, R.R. Engleman, and M.G. Klett, *FuelCell Handbook Fourth Edition* (Parsons Corporation, 1998)
7. Anne Zulfia. *Diktat Kuliah Material Komposit*. Departemen Teknik Metalurgi dan Material. 2009.
8. Ling Du, Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (Pem) Fuel Cells, 2008
9. Dania Febriyani. *Pengaruh Carbon Black Terhadap Karakterisasi Komposit Epoxy/Grafit Eaf Sebagai Material Pelat Bipolar Pada Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (Pemfc)*. Belum dipublikasikan.
10. Mikkola, Mikko. *Experimental Studies on Polymer Electrolyte membrane Fuel Cell Stacks*. Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics.2001
11. A. Boudghene Stambouli, E. Traversa. *Fuel cells, an alternative to standard sources of energy*. University of Roma, 'Tor Vergata', Department of Chemical Science and Technology, Via della Ricerca Scientifica-00133, Roma, Italy. 2001.
12. www.wikipedia.com/fuelcell
13. Joshua Hertz, GJ La O', Jungik Kim. *Fuel Cells Fundamentals The Materials Science of Renewable Energy*. 2006

14. Yuhua Wang. Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC). University of Waterloo, Canada.2006
15. Nikhil H. Jalani. Development of Nanocomposite Polymer Electrolyte Membranes for Higher Temperature PEM Fuel Cells. Chemical Engineering, WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE.2006
16. http://www.thirdorbitpower.com/PEM_mechanism.html, tanggal 5-10-2009 jam 17.07
17. James Larminie and Andrew Dicks. *Fuel Cell Systems Explained*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England, 2000
18. Li, Xianguo and Imran Sabir. (2004). *Review of Bipolar Plate in PEM Fuel Cell: Flow-field designs*. Department of Mechanical Engineering, University of Waaterloo, 200 University Avenue West, Waterloo, Ontario, Canada, N2L,
19. Allen Hermann, Tapas Chaudhuri, Priscila Spagnol. *Bipolar plates forPEMfuel cells : A review*. International Journal of Hydrogen Energy 30 (2005) 1297 – 1302.
20. Xiao Zi Yuan, Haijiang Wang, Jiujun Zhang, David P. Wilkinson. *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells - From Materials to Processing*. Journal of New Materials for Electrochemical Systems 8, 257-267 (2005).
21. William D. Callister. *Fundamentals of Material Science and Engineering*. Willey International.
22. D.F. Caulfield et al., ***Wood Thermoplastic Composites Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite***, Chap 13 (Taylor and Francis,2005).
23. Hsu-Chiang Kuan , Chen-Chi M. Ma, Ke Hong Chen, Shih-Ming Chen. *Preparation, electrical, mechanical and thermal properties of composite bipolar plate for a fuel cell*. Journal of Power Sources 134 (2004) 7–17
24. Dr. Ir. A. Herman Yuwono, M. Phil. Eng, Ir. Sumadi Agustinus. *Diktat Kuliah Teknologi Polimer*. Departemen Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia. 2008.
25. <http://www.efunda.com/>
26. http://www.huntsman.com/advanced_materials/index.cfm?PageID=5865
27. Technical Information: *Graphite for Polymer Materials*, GK KROPFMUHL

28. Dr.Ing. Bambang Suharno, Ir. Bustanul Arifin, M.Phil.Eng. PEMBUATAN BAJA PADA EAF. Departemen Metalurgi dan Material FTUI. 2007
29. Zhang Jie, Zou Yan-wen, HE Jun, Influence of graphite particle size and its shape on performance of carbon composite bipolar plate, *Institute of Nuclear Energy and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, China*, 26 Juli 2005
30. The Fundamentals of Carbon black. Cabot Corporation Billerica, Massachusetts USA.
31. Erik H. Weber. Development and Modeling of Thermally Conductive Polymer/Carbon Composites. Bachelor of Science, Michigan Technological University. 1999
32. <http://www.moderndispersions.com/images/PLACE%20HOLDER%20FOR%20DISPERSION.pdf>
33. Jan-Chan Huang. Carbon Black Filled Conducting Polymers and Polymer Blends, *Plastics Engineering Department, University of Massachusetts Lowell, Lowell*, 18 Juni 2002.
34. Colin Pratt. Conducting Polymers
35. Shivkalyan. A. Kanhegaokar. Studies On Conducting Polymers Synthesis And Characterization Of Conducting Polymer Blends. Bharati Vidyapeeth Pune (Deemed University), Division Of Polymer Science & Engineering. January 2004
36. Richard D. Wells. The Effects Of Adding Inherently Conductive Polymers To Silver-Filled Epoxies. University Of Akron. December, 2006.
37. Panayota Tsotra, Oleg Gryshchuk, Klaus Friedrich. Morphological Studies of Epoxy/Polyaniline Blends. Institut fu'r Verbundwerkstoffe GmbH (IVW), University of Kaiserslautern. 2005.
38. <http://en.wikipedia.org/wiki/Toluene>
39. <http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol>
40. Ygen Mamuya. *Electrical Properties and Structure of Polymer Composite with Conductive Filler*. Institute of Macromolecular Chemical. Ukraine.

Lampiran 1 Hasil Pengujian Konduktivitas

	Epoxy (%)	CB (%)	Grafit EAF (%)	Resistivitas (Ωcm^{-1})	Konduktivitas (S/cm)	Konduktivitas Rata2 (Scm)
I	20	5	94,965	4.12	0.243	0.273
II	20	5	94,965	3.49	0.287	
III	20	5	94,965	3.46	0.289	
I	20	5	94,930	4.17	0.240	0.290
II	20	5	94,930	3.19	0.313	
III	20	5	94,930	3.15	0.317	
I	20	5	94,896	3.84	0.260	0.293
II	20	5	94,896	3.35	0.299	
III	20	5	94,896	3.12	0.321	
I	20	5	94,860	3.56	0.281	0.295
II	20	5	94,860	3.44	0.291	
III	20	5	94,860	3.18	0.314	

Lampiran 2 Hasil Pengujian Densitas

		A (Udara) (gr)	B (Air) (gr)	A-B (gr)	ρ air (gr/cm ³)		Densitas (gr/cm ³)	Densitas rata2 (gr/cm ³)
PANI 50 mg	I	3.102	1.430	1.671	0.996089	T = 28 ⁰ C	1.849	1.850
	II	3.017	1.392	1.625	0.996089		1.850	
	III	3.156	1.458	1.698	0.996089		1.851	
PANI 100 mg	I	3.010	1.373	1.637	0.996089	T = 28 ⁰ C	1.832	1.833
	II	2.834	1.295	1.540	0.996089		1.834	
	III	2.963	1.355	1.609	0.996089		1.835	
PANI 150 mg	I	3.104	1.371	1.733	0.996089	T = 28 ⁰ C	1.784	1.803
	II	2.762	1.241	1.521	0.996089		1.809	
	III	3.145	1.419	1.726	0.996089		1.815	
PANI 200 mg	I	3.826	1.720	2.106	0.996089	T = 28 ⁰ C	1.809	1.818
	II	3.622	1.642	1.980	0.996089		1.822	
	III	3.315	1.503	1.812	0.996089		1.823	

Lampiran 3 Hasil Pengujian Porositas

		D (gr)	S (gr)	Sw (gr)	Sw-D (gr)	D-S (gr)	Porositas (%)	Porositas Rata2 (%)
PANI 50 mg	I	3.009	1.388	3.016	0.006	1.621	0.382	0.394
	II	3.148	1.454	3.155	0.007	1.694	0.390	
	III	3.123	1.441	3.130	0.007	1.682	0.410	
PANI 100 mg	I	2.996	1.370	3.003	0.007	1.626	0.418	0,445
	II	3.082	1.412	3.089	0.008	1.670	0.455	
	III	2.952	1.350	2.959	0.007	1.602	0.462	
PANI 150 mg	I	2.747	1.247	2.754	0.007	1.500	0.440	0,456
	II	3.129	1.422	3.137	0.008	1.708	0.463	
	III	2.765	1.259	2.772	0.007	1.506	0.465	
PANI 200 mg	I	3.302	1.513	3.309	0.006	1.789	0.352	0,360
	II	3.813	1.748	3.820	0.007	2.065	0.363	
	III	3.610	1.657	3.617	0.007	1.953	0.363	

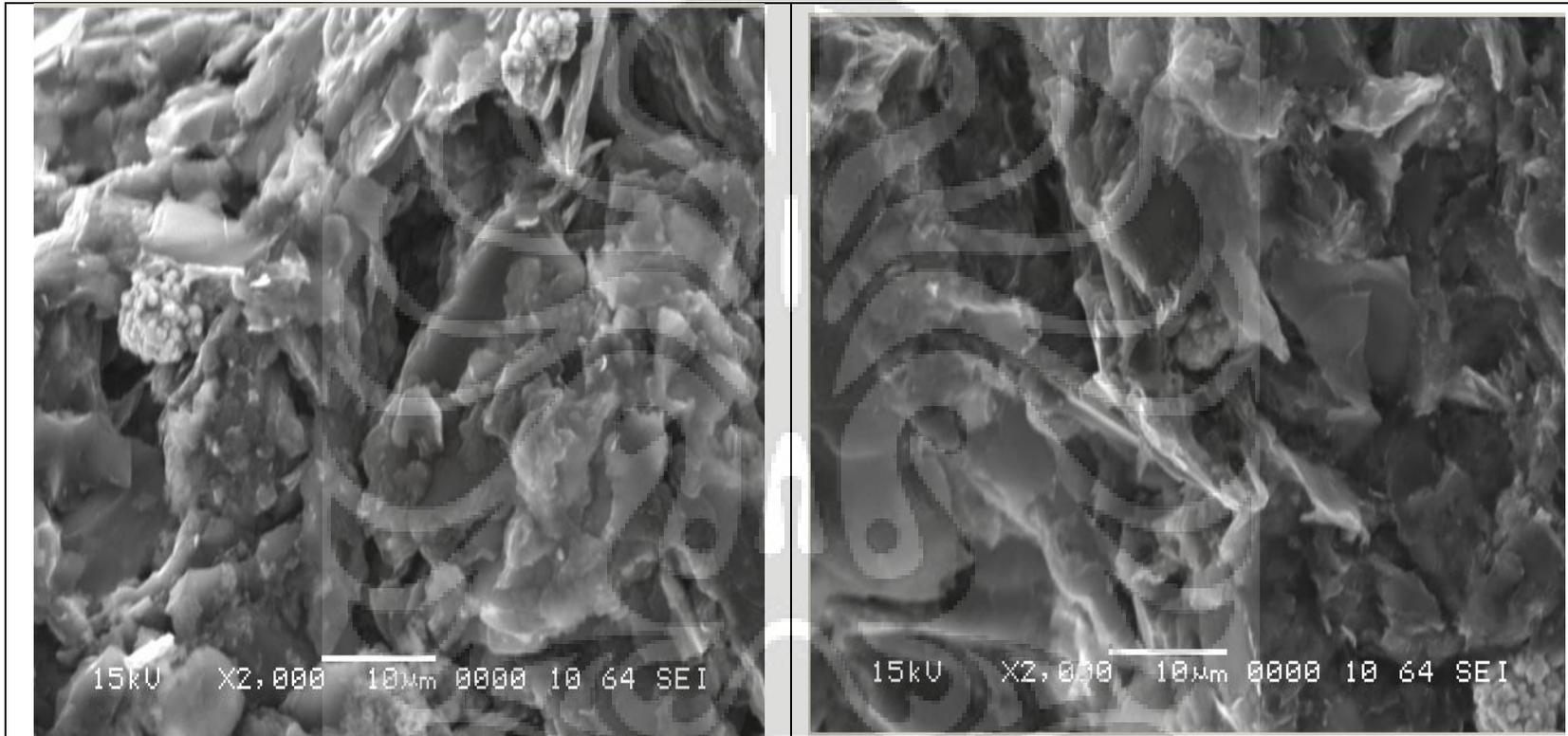
Lampiran 4 Hasil Pengujian Flexural

		b (mm)	d (mm)	L (mm)	P (N)	σ_f (MPa)	σ_f rata2 (MPa)
PANI 50 mg	I	16.1	3.2	64	48	27.950	28.520
	II	16.6	3.4	64	56	28.015	
	III	16.1	3.5	64	60.8	29.595	
PANI 100 mg	I	15.7	3.9	64	52.8	21.226	21.897
	II	15.5	3.4	64	40	21.431	
	III	15.1	3.7	64	49.6	23.034	
PANI 150	I	16	4.2	64	52.8	17.959	19.019
	II	16	3.8	64	46.4	19.280	
	III	15.5	4	64	51.2	19.819	
PANI 200 mg	I	15.8	4.3	64	67.2	22.082	24.549
	II	15.8	3.4	64	46.4	24.388	
	III	15.7	3	64	40	27.176	

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

	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0.999841	0.999847	0.999854	0.999860	0.999866	0.999872	0.999878	0.999884	0.999889	0.999895
1	0.999900	0.999905	0.999909	0.999914	0.999918	0.999923	0.999927	0.999930	0.999934	0.999938
2	0.999941	0.999944	0.999947	0.999950	0.999953	0.999955	0.999958	0.999960	0.999962	0.999964
3	0.999965	0.999967	0.999968	0.999969	0.999970	0.999971	0.999972	0.999972	0.999973	0.999973
4	0.999973	0.999973	0.999973	0.999972	0.999972	0.999972	0.999970	0.999969	0.999968	0.999966
5	0.999965	0.999963	0.999961	0.999959	0.999957	0.999955	0.999952	0.999950	0.999947	0.999944
6	0.999941	0.999938	0.999935	0.999931	0.999927	0.999924	0.999920	0.999916	0.999911	0.999907
7	0.999902	0.999898	0.999893	0.999888	0.999883	0.999877	0.999872	0.999866	0.999861	0.999855
8	0.999849	0.999843	0.999837	0.999830	0.999824	0.999817	0.999810	0.999803	0.999796	0.999789
9	0.999781	0.999774	0.999766	0.999758	0.999751	0.999742	0.999734	0.999726	0.999717	0.999709
10	0.999700	0.999691	0.999682	0.999673	0.999664	0.999654	0.999645	0.999635	0.999625	0.999615
11	0.999605	0.999595	0.999585	0.999574	0.999564	0.999553	0.999542	0.999531	0.999520	0.999509
12	0.999498	0.999486	0.999475	0.999463	0.999451	0.999439	0.999427	0.999415	0.999402	0.999390

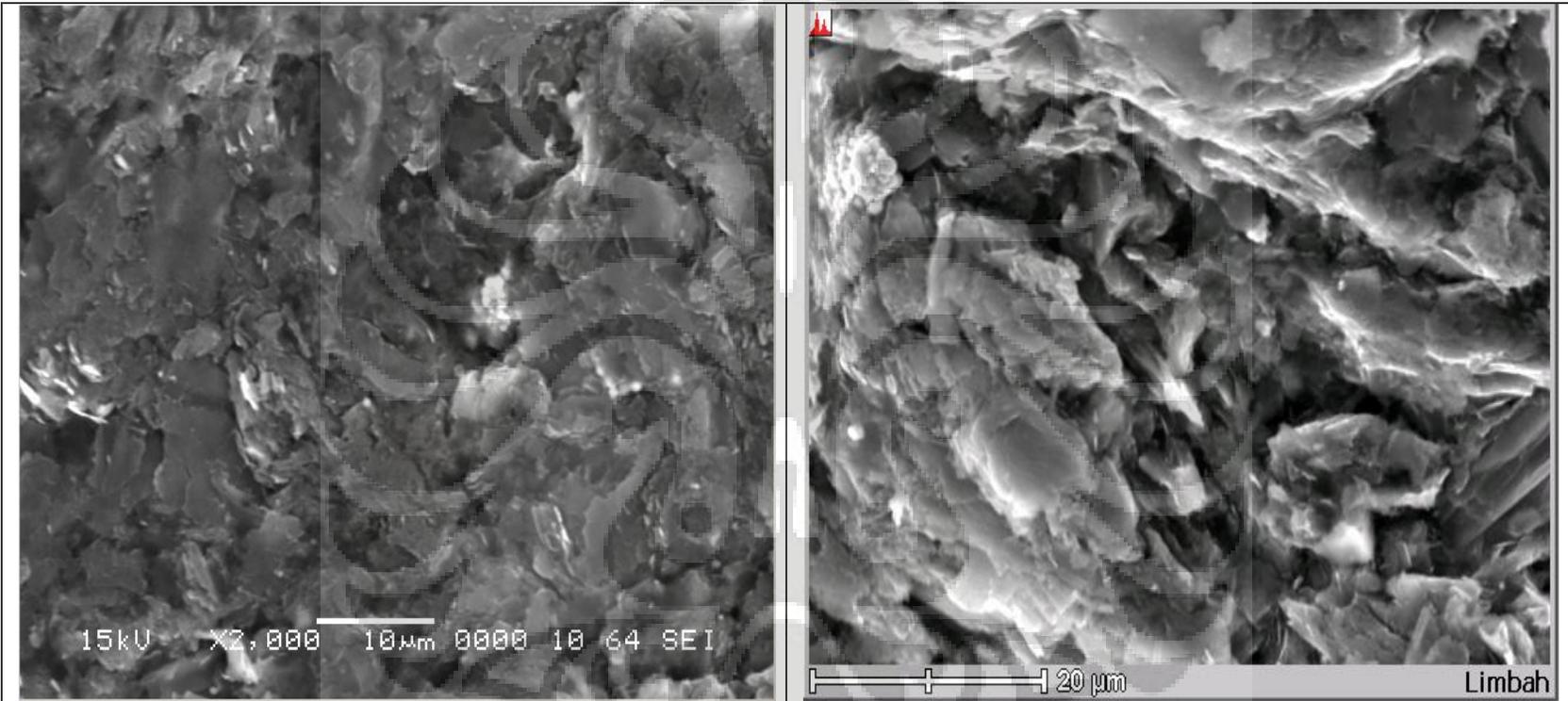
13	0.999377	0.999364	0.999352	0.999339	0.999326	0.999312	0.999299	0.999285	0.999272	0.999258
14	0.999244	0.999230	0.999216	0.999202	0.999188	0.999173	0.999159	0.999144	0.999129	0.999114
15	0.999099	0.999084	0.999069	0.999054	0.999038	0.999023	0.999007	0.998991	0.998975	0.998959
16	0.998943	0.998926	0.998910	0.998893	0.998877	0.998860	0.998843	0.998826	0.998809	0.998792
17	0.998774	0.998757	0.998739	0.998722	0.998704	0.998686	0.998668	0.998650	0.998632	0.998613
18	0.998595	0.998576	0.998558	0.998539	0.998520	0.998501	0.998482	0.998463	0.998444	0.998424
19	0.998405	0.998385	0.998365	0.998345	0.998325	0.998305	0.998285	0.998265	0.998244	0.998224
20	0.998203	0.998183	0.998162	0.998141	0.998120	0.998099	0.998078	0.998056	0.998035	0.998013
21	0.997992	0.997970	0.997948	0.997926	0.997904	0.997882	0.997860	0.997837	0.997815	0.997792
22	0.997770	0.997747	0.997724	0.997701	0.997678	0.997655	0.997632	0.997608	0.997585	0.997561
23	0.997538	0.997514	0.997490	0.997466	0.997442	0.997418	0.997394	0.997369	0.997345	0.997320
24	0.997296	0.997271	0.997246	0.997221	0.997196	0.997171	0.997146	0.997120	0.997095	0.997069
25	0.997044	0.997018	0.996992	0.996967	0.996941	0.996914	0.996888	0.996862	0.996836	0.996809
26	0.996783	0.996756	0.996729	0.996703	0.996676	0.996649	0.996621	0.996594	0.996567	0.996540
27	0.996512	0.996485	0.996457	0.996429	0.996401	0.996373	0.996345	0.996317	0.996289	0.996261
28	0.996232	0.996204	0.996175	0.996147	0.996118	0.996089	0.996060	0.996031	0.996002	0.995973
29	0.995944	0.995914	0.995885	0.995855	0.995826	0.995796	0.995766	0.995736	0.995706	0.995676
30	0.995646	0.995616	0.995586	0.995555	0.995525	0.995494	0.995464	0.995433	0.995402	0.995371
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9



(A) Hasil SEM Pelat Bipolar Penambahan 50 mg PANI

(B) Hasil SEM Pelat Bipolar Penambahan 100 mg PANI

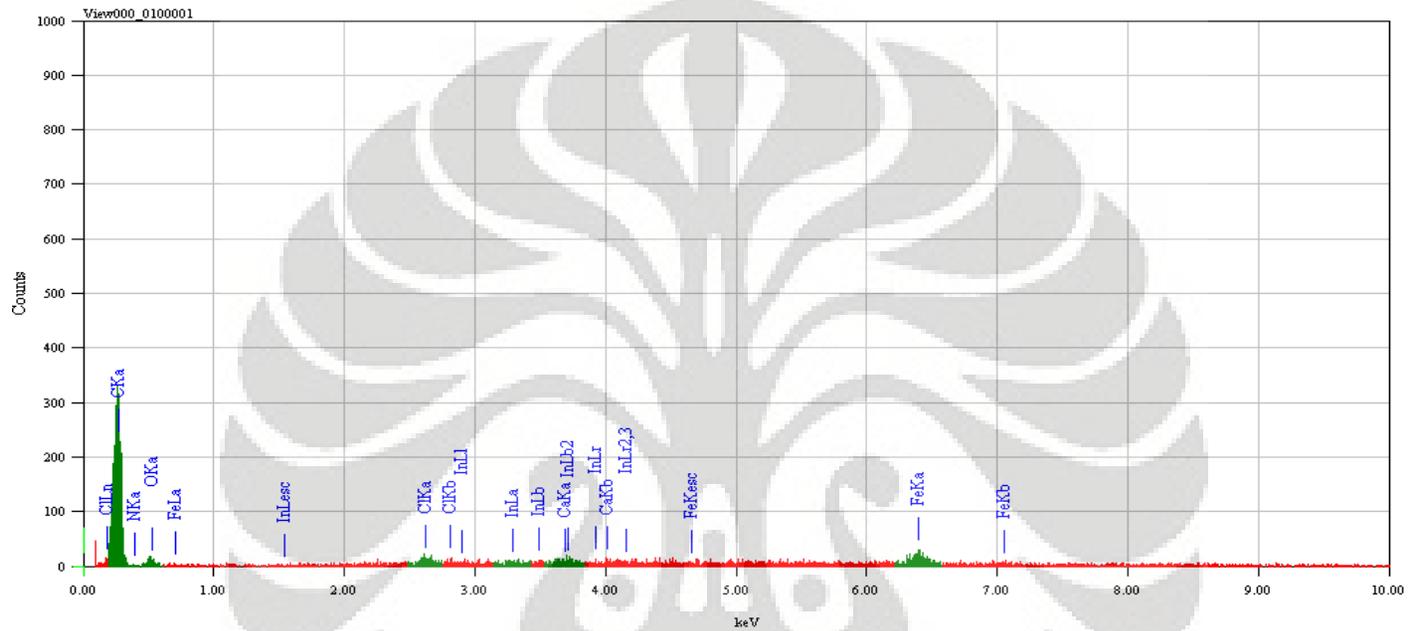
(Lanjutan)



(C) Hasil SEM Pelat Bipolar Penambahan 150 mg PANI

(D) Hasil SEM Pelat Bipolar Penambahan 200 mg PANI

Lampiran 7 Hasil Pengamatan EDS



Element	Class.	(keV)	Counts	mass%	Error%	At%	Compo...	mass%	Cation	K
C K	Ref...	0.277	2032.53	77.79	0.32	93.41	C	77.79	0.00	1.0000
N K*		0.392	118.67	2.52	0.83	2.59	N	2.52	0.00	0.5546
O				3.87		0.00		0.00	24.00	
Cl K		2.621	127.60	2.08	1.03	0.85	Cl	2.08	0.00	0.4265
Ca K		3.690	64.30	1.21	1.29	0.44	CaO	1.70	3.00	0.5285
Fe K		6.398	273.06	9.87	1.19	2.55	FeO	12.70	17.55	1.1879
In L		3.286	52.82	2.66	1.44	0.17	In ₂ O ₃	3.22	2.30	1.4884
Total				100.00		100.00		100.00	22.85	

Lampiran 8 Contoh Perhitungan Sudut Kontak

a) when $\theta > 90^\circ$ (non-wetting condition)

What is the contact angle between 99.8% pure Al and sintered SiC at 900°C under N_2 atmosphere after holding time of 5 minutes ?

The drop dimensions as defined by the Fig. 3.13a.

$$2R = 18 \text{ mm}$$

$$2X = 34 \text{ mm}$$

$$Z_{90} = 17 \text{ mm}$$

$$Z = 29 \text{ mm}$$

$$X / Z_{90} = 17 / 17 = 1$$

Using Bashforth and Adams (1883) Table I: $\beta = 0$

From Table V for $\beta = 0$:

$$(X/b)_{90} = 1 \Rightarrow X = b \Rightarrow b_1 = 17$$

$$(Z_{90}/b) = 1 \Rightarrow Z_{90} = b \Rightarrow b_2 = 17$$

$$\text{then } b_{\text{average}} = 17$$

Using their Table II for the values below;

$$R/b = 9 / 17 = 0.5294$$

$$Z/b = 29 / 17 = 1.7059$$

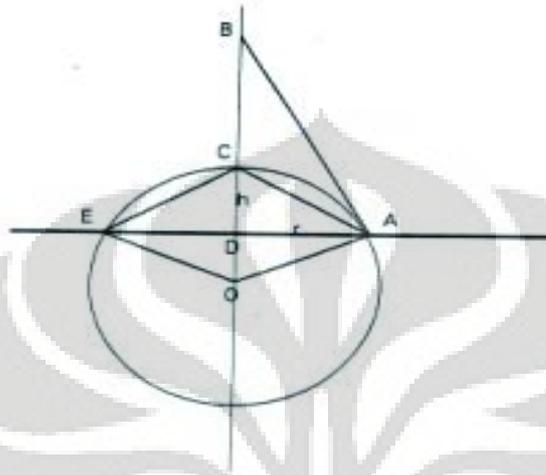
For our $\beta = 0$, therefore, we should look in Table II for $\beta = 0.125$ hence;

$$\theta_1 = 154^\circ$$

$$\theta_2 = 152^\circ$$

(Lanjutan)

b. when $\theta < 90^\circ$ (wetting condition)



The shape of sessile drop can be approximated by a spherical cap, represented by the area included between points A, C, E having a height equal to h , and a radius of its base equal to r .

In $\triangle OAE$

$\overline{OE} = \overline{OA}$ (\therefore they have the same radius)

$\overline{OD} \perp \overline{AE}$

$\therefore \overline{DE} = \overline{DA}$

In $\triangle CEA$

$\overline{DE} = \overline{DA}$

$\overline{EA} \perp \overline{CD}$

$\therefore \overline{CE} = \overline{CA}$

$\therefore \angle CED = \angle CAD$

$\therefore \overline{CE} = \overline{CA}$

$\therefore \angle CED = \angle CAD$

According to the property of a tangent line $\angle CED = \angle CAD$

$\therefore \angle CAB = \angle CAD$

$\tan \theta/2 = h/r$

$\theta/2 = \tan^{-1} h/r$

$\theta = 2 \tan^{-1} h/r$

(Lanjutan)

I

$\left(\frac{x}{z}\right) \phi = 90^\circ$										
β	'0	'1	'2	'3	'4	'5	'6	'7	'8	'9
0	1'00000	'02180	'04140	'05942	'07589	'09115	'10542	'11880	'13140	'14333
1	'15466	'16546	'17576	'18562	'19508	'20418	'21294	'22138	'22953	'23742
2	'24507	'25248	'25987	'26686	'27345	'28006	'28650	'29278	'29890	'30488
3	'31107	'31643	'32181	'32748	'33283	'33807	'34320	'34824	'35318	'35803
4	'36278	'36745	'37204	'37646	'38100	'38535	'38963	'39386	'39802	'40211
5	'40615	'41012	'41403	'41789	'42169	'42544	'42914	'43278	'43638	'43993
6	'44344	'44690	'45032	'45369	'45702	'46032	'46358	'46679	'46996	'47310
7	'47622	'47928	'48232	'48533	'48830	'49124	'49415	'49703	'49988	'50270
8	'50550	'50827	'51102	'51377	'51640	'51900	'52169	'52430	'52689	'52946
9	'53200	'53452	'53702	'53949	'54194	'54437	'54678	'54917	'55154	'55380
10	'55622	'55851	'56080	'56307	'56533	'56758	'56981	'57202	'57421	'57638
11	'57852	'58068	'58283	'58488	'58692	'58906	'59112	'59317	'59520	'59722
12	'59923	'60122	'60320	'60517	'60712	'60906	'61099	'61290	'61480	'61669
13	'61856	'62042	'62227	'62411	'62594	'62776	'62957	'63136	'63314	'63491
14	'63667	'63842	'64016	'64189	'64361	'64532	'64702	'64871	'65039	'65206
15	'65372	'65537	'65701	'65864	'66027	'66189	'66350	'66510	'66669	'66827
16	'66984	'67140	'67296	'67451	'67605	'67758	'67910	'68062	'68213	'68363
17	'68512	'68661	'68809	'68956	'69102	'69248	'69393	'69537	'69681	'69824
18	'69966	'70108	'70249	'70389	'70528	'70667	'70805	'70943	'71080	'71217
19	'71353	'71488	'71623	'71757	'71890	'72023	'72155	'72287	'72418	'72548
20	'72678	'72807	'72936	'73064	'73192	'73319	'73446	'73572	'73698	'73823
21	'73947	'74071	'74194	'74317	'74440	'74562	'74684	'74805	'74926	'75046
22	'75165	'75284	'75403	'75521	'75639	'75756	'75873	'75989	'76105	'76221
23	'76336	'76451	'76565	'76679	'76792	'76905	'77017	'77129	'77241	'77352
24	'77463	'77574	'77684	'77794	'77903	'78011	'78119	'78227	'78335	'78443
25	'78550	'78657	'78764	'78870	'78975	'79080	'79185	'79289	'79393	'79497
26	'79600	'79703	'79806	'79908	'80010	'80112	'80213	'80314	'80415	'80515
27	'80615	'80715	'80814	'80913	'81012	'81110	'81208	'81306	'81404	'81501
28	'81598	'81695	'81791	'81887	'81983	'82078	'82173	'82268	'82362	'82456
29	'82550	'82643	'82736	'82829	'82922	'83014	'83107	'83199	'83291	'83383
30	'83474	'83565	'83656	'83746	'83836	'83926	'84015	'84104	'84193	'84282
31	'84371	'84459	'84547	'84635	'84722	'84809	'84896	'84983	'85070	'85156
32	'85242	'85328	'85414	'85499	'85584	'85669	'85754	'85838	'85922	'86006
33	'86090	'86173	'86256	'86339	'86422	'86505	'86587	'86669	'86751	'86833
34	'86915	'86996	'87077	'87158	'87239	'87320	'87400	'87480	'87560	'87640
35	'87719	'87798	'87877	'87956	'88035	'88113	'88191	'88269	'88347	'88425

(Lanjutan)

II

ϕ	$\beta = 0'125$		$0'25$		$0'50$		$0'75$		$1'0$	
	$\frac{\pi}{\beta}$									
5	08715	00380	08714	00380	08711	00380	08709	00380	08707	00380
10	17337	01518	17334	01517	17332	01515	17316	01513	17300	01511
15	25955	03402	25827	03397	25774	03386	25720	03375	25668	03363
20	34139	06014	34076	05997	33992	05984	33890	05972	33771	05960
25	41141	09328	41022	09288	40790	09210	40564	09134	40344	09060
30	46798	13314	46600	13221	46217	13075	45849	12925	45495	12781
35	51049	17933	50749	17786	50373	17596	50028	17422	49709	17293
40	54838	23142	54413	22999	53908	22842	53582	22697	53286	22563
45	58115	28893	57545	28717	56978	28519	56703	28383	56529	28259
50	60834	35133	60104	34982	59372	34873	59122	34769	58904	34671
55	62955	41807	62055	41633	61407	41537	61028	41408	60787	41292
60	64445	48855	63371	48707	62227	48946	61706	48835	61561	48719
65	65278	56216	64822	56021	63807	56226	63259	56039	62827	55863
70	65430	63826	65127	63607	65045	63902	64396	63511	64502	63422
75	64889	71622	64348	71425	64047	71207	63332	71026	63025	70826
80	63644	79537	63495	79350	63226	79122	62685	78944	62539	78768
85	61794	87508	61974	87281	62098	87024	61478	86756	61391	86559
90	59242	95471	59297	95256	59223	95021	58736	94842	58529	94671
95	57098	103363	57081	103120	57007	102845	56688	102658	56402	102469
100	56677	111121	56647	110825	56597	110502	56363	110270	56140	110044
105	57002	118686	57024	118389	56886	118120	56595	117845	56526	117677
110	58095	126000	58143	125692	58209	125452	58018	125215	58144	125093
115	59793	133008	59842	133277	59902	133022	59967	132863	59877	132761
120	62333	139656	62359	139099	62326	138880	62382	138825	62312	138731
125	64360	145895	64343	145710	64366	145498	64301	145309	64283	145189
130	77923	151678	78345	148202	78127	148212	77365	148006	76428	147820
135	73082	158962	74122	146912	74637	145531	74318	145233	73686	145114
140	67902	166170	69635	143026	70029	1435912	71103	1425280	70794	1427165
145	62260	172888	64953	139420	67117	1438855	67765	1437843	67793	143669
150	56842	179489	60151	135781	63197	1441354	64350	1439020	64720	1438228
155	51150	177434	55320	132203	59246	1443427	60904	1431815	61615	1433045
160	45497	174778	50514	128792	55322	1445039	57472	1423238	58516	1428350
165	40023	170511	45850	125665	51482	1446252	54096	1414394	55458	1425296
170	34830	1777663	41202	122853	47773	1447076	50818	1405392	52476	1422958
175	30020	178298	37245	120502	44247	1447527	47672	1404448	49599	1421338
180	25864	178487	33439	118532	40941	1447888	44690	1403579	46853	1420459

(Lanjutan)

V

β	15°		30°		45°		60°		90°	
	$\frac{\pi}{2}$									
+										
0°	'25882	'03407	'50000	'13397	'70711	'20189	'86603	'30000	'1'00000	'1'00000
0°1	'25860	'03403	'49838	'13330	'70832	'20097	'86673	'29978	'98421	'98322
0°2	'25838	'03399	'49679	'13264	'70970	'19966	'86794	'29847	'96976	'96813
0°3	'25816	'03395	'49522	'13200	'71124	'19837	'86962	'29712	'95648	'95485
0°4	'25795	'03390	'49368	'13137	'71294	'19709	'87174	'29575	'94422	'94264
0°5	'25774	'03386	'49217	'13075	'71478	'19589	'87427	'29436	'93283	'93129
0°6	'25752	'03381	'49068	'13015	'71675	'19475	'87715	'29295	'92217	'92063
0°7	'25730	'03377	'48921	'12955	'71884	'19366	'88035	'29152	'91215	'91060
0°8	'25710	'03373	'48777	'12896	'72105	'19262	'88384	'29008	'90271	'90116
0°9	'25689	'03369	'48635	'12838	'72337	'19162	'88760	'28865	'89377	'89223
1°0	'25668	'03365	'48495	'12781	'72580	'19066	'89161	'28721	'88529	'88375
1°1	'25647	'03360	'48357	'12725	'72834	'18975	'89587	'28579	'87722	'87568
1°2	'25626	'03356	'48221	'12670	'73100	'18888	'90037	'28445	'86953	'86799
1°3	'25606	'03352	'48087	'12616	'73376	'18805	'90510	'28310	'86218	'86064
1°4	'25585	'03348	'47955	'12563	'73664	'18725	'91007	'28176	'85513	'85359
1°5	'25564	'03344	'47826	'12511	'73963	'18648	'91528	'28042	'84838	'84684
1°6	'25543	'03340	'47698	'12460	'74274	'18574	'92072	'27908	'84189	'84035
1°7	'25523	'03336	'47571	'12409	'74597	'18503	'92639	'27775	'83564	'83410
1°8	'25503	'03332	'47447	'12360	'74932	'18434	'93228	'27642	'82963	'82809
1°9	'25482	'03328	'47324	'12311	'75279	'18368	'93839	'27509	'82383	'82229
2°0	'25462	'03324	'47203	'12263	'75638	'18305	'94472	'27376	'81822	'81668
2°1	'25442	'03321	'47084	'12214	'76009	'18244	'95127	'27243	'81280	'81126
2°2	'25422	'03317	'46965	'12167	'76392	'18185	'95804	'27110	'80755	'80601
2°3	'25402	'03313	'46848	'12121	'76787	'18128	'96503	'26977	'80247	'80093
2°4	'25383	'03309	'46733	'12075	'77194	'18074	'97224	'26844	'79754	'79600
2°5	'25363	'03305	'46619	'12030	'77613	'18021	'97967	'26711	'79275	'79121
2°6	'25343	'03302	'46507	'11986	'78044	'17970	'98732	'26578	'78810	'78656
2°7	'25324	'03298	'46396	'11942	'78487	'17920	'99519	'26445	'78358	'78204
2°8	'25304	'03294	'46286	'11899	'78942	'17871	'100029	'26312	'77919	'77765
2°9	'25285	'03290	'46178	'11856	'79409	'17823	'100692	'26179	'77491	'77336
3°0	'25265	'03286	'46071	'11814	'79888	'17776	'101477	'26046	'77074	'76920
3°1	'25246	'03282	'45966	'11772	'80379	'17730	'102284	'25913	'76667	'76511
3°2	'25227	'03279	'45861	'11731	'80882	'17685	'103113	'25780	'76270	'76114
3°3	'25208	'03275	'45757	'11690	'81397	'17641	'103964	'25647	'75883	'75727
3°4	'25189	'03271	'45653	'11650	'81924	'17598	'104837	'25514	'75506	'75350
3°5	'25170	'03268	'45551	'11610	'82463	'17556	'105732	'25381	'75137	'74981
3°6	'25150	'03264	'45451	'11570	'83014	'17515	'106649	'25248	'74776	'74620
3°7	'25132	'03260	'45351	'11530	'83577	'17475	'107588	'25115	'74423	'74267
3°8	'25113	'03256	'45251	'11490	'84152	'17436	'108549	'24982	'74078	'73921

Lampiran 9 Gambar Alat Preparasi Sampel dan Karakterisasi

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

<p>Timbangan Digital</p>	
<p>Mixer</p>	
<p>Hot Plate Magnetic Stirring</p>	
<p>Cetakan Stainless Steel</p>	
<p>Mesin Hot Press</p>	

Lampiran 10 Gambar Alat Karakterisasi pelat Bipolar

Nama Alat	Foto Alat
Conductivity Four Point Probe Test Machine	
Oven	
Universal Testing Machine	

Scanning Electron
Microscope



Ultrasonic Cleaner



Dryer



Lampiran 11 Spesifikasi Epoxy Resin

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 calorine content	%	< 0.05
Colour according to the Gardner scale		< 1

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

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

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

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



Lampiran 12 Spesifikasi Epoxy Hardener

TECHNICAL DATA SHEET**EPOXY HARDENER V-140**

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

SPECIFICATION :

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

TYPICAL PROPERTIES :

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

TYPICAL PROPERTIES IN A CURED COATING :

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

TYPICAL CURED RESIN PROPERTIES :

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

CHEMICAL RESISTANCE PROPERTIES :

(weight change after 10 days immersion, %)

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

Dr. Justus Kimiatana
JAKARTA

Lampiran 13 Spesifikasi Grafit EAF PT. Krakatau Steel

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

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

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

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

MANUFACTURE :

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

(lanjutan)

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

CILEGON

INVENTORY CONTROL SYSTEM Item No : 00908011

DATE : 04.12.2007

GROUP/CLASS : 443019132

Nato-name : ELECTRODE,

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

GRAPHITE,ELECTRODE-D406X1800MM-20-46KA

GRAPHITE ELECTRODE
 GRADE: ULTRA HIGH POWER (UHP)
 DIA.: 406 MM
 LENGTH: 1800 MM
 POROSITY:15 - 26%
 BULK DENSITY:1.66-1.72 GR/CM3
 RESISTANCE:5.0-6.0 OHM/M
 THERMAL CONDUCTIVITY:120-300 W/MK
 COMPRESIVE STRENGTH:260-262 KG/CM2
 CURRENT CARRYING CAPACITY:20-46 KA
 WEIGHT OF EACH SET POLE & NIPPLE:+/- 410KG
 ASH CONTENT'S:0.5% MAX
 AVERAGE LINEAR 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 14 Spesifikasi *Polyaniline*, Metanol dan *Toluene*Spesifikasi *Polianiline*

Berat Molekul	20000
Titik Leleh	400°C
Sensitivitas Terhadap Udara	Tinggi
Cara Penyimpanan	Dibawah Kondisi <i>Vacuum</i>

Tabel 3.5 Spesifikasi Metanol

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

Tabel 3.6 Spesifikasi *Toluene*

Densitas	0,8669 g/cc
Viskositas pada T = 25°C	0,560 cP
Berat Molekul	92,15 g/mol
Tekanan Uap	75 torr
Surface Tension	27,93 dunes/cm
Konduktivitas Termal	0,1311 W/m-K
Titik Leleh	94,95°C
Titik Uap	110,6°C