



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

BERINGIN SAPUTRA

0606074640

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

DESEMBER 2009



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN *POLYANILINE* TERHADAP
KARAKTERISASI KOMPOSIT *EPOXY RESIN*/GRAFIT
SINTESIS 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)**

BERINGIN SAPUTRA

0606074640

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

DESEMBER 2009

Universitas Indonesia

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Beringin Saputra

NPM : 0606074640

Tanda Tangan :

Tanggal : 21 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Beringin Saputra
NPM : 0606074640
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Penambahan *Polyaniline* terhadap Karakterisasi Komposit *Epoxy* Resin/rafit Sintesis 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 : Dr. Ir. Bambang Prihandoko, MT ()

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

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 23 Desember 2009

Universitas Indonesia

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/rafit Sintesis 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. 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;
3. Saudara Dania Febriani, Farah Fauziah, Gabriel Sembiring, Kenya Diestha dan Rio Kurniawan selaku rekan penulis dalam penelitian ini;
4. Kedua orang tua dan adik penulis yang telah memberikan semangat dan bantuan baik dukungan moral dan material;
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

Universitas Indonesia

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

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

Nama : Beringin Saputra

NPM : 0606074640

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Departemen : Metalurgi dan Material

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

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

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 21 Desember 2009

Yang menyatakan

(Beringin Saputra)

Universitas Indonesia

ABSTRAK

Nama : Beringin Saputra
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : **Pengaruh Penambahan *Polyaniline* terhadap Karakterisasi Komposit *Epoxy Resin*/Grafrit Sintesis dan *Carbon Black* sebagai Material Pelat Bipolar untuk *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell***

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) merupakan salah satu teknologi ramah lingkungan yang cukup menjanjikan bila digunakan pada bidang transportasi dan aplikasi lainnya karena memiliki efisiensi yang tinggi dan temperatur operasi yang rendah. Pelat bipolar merupakan komponen penting dari PEMFC yang berperan terhadap lebih dari 60 % berat dan 30 % total biaya dari keseluruhan *fuel cell*. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan pelat bipolar yang ringan, mudah diproses dan murah dengan konduktivitas dan kekuatan yang baik. Pelat bipolar terbuat dari material komposit dengan pencampuran antara grafit sintesis, *carbon black* dan *epoxy resin* sebagai matriks dan penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg, 100 mg, 150 mg dan 200 mg pada mesin *hot press* dengan temperatur 70⁰ C selama 4 jam. Nilai konduktivitas semakin meningkat dari 0,231 S/cm menjadi 0,293 S/cm pada penambahan *polyaniline* dari 50 mg menjadi 200 mg dan kekuatan fleksural yang dihasilkan mendekati 20 MPa.

Kata kunci :

Polymer electrolyte membrane fuel cell, pelat bipolar, komposit, grafit sintesis, *carbon black*, *epoxy resin*, konduktivitas, *polyaniline*

ABSTRACT

Nama : Beringin Saputra
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : **The Influence of Polyaniline Addition on Characterization of Composite Epoxy Resin/Synthetic Graphit and Carbon Black as Bipolar Plate Material for Polymer Electrolyt Membrane Fuel Cell**

The Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) is a promising candidate as zero-emission power source for transport and other applications due to its high efficiency and low-temperature operation. Bipolar plate is a vital component of PEM fuel cells, which constitute more than 60% of the weight and 30% of the total cost in a fuel cell stack. The objective of this research is to develop lightweight, easy-to-process, and cheap bipolar plate with high conductivity and good mechanical strength. The bipolar plate was made by composit material with mixing graphite synthetic, carbon black, and epoxy resin as a matrix and 50 mg, 100 mg, 150 mg, and 200 mg polyaniline addition by hot press molding process at temperature 70⁰ C for 4 hours. The conductivity increase from 0,231 S/cm to 0,293 S/cm with the addition of polyaniline from 50 mg to 200 mg and the flexural strength reach allmost 20 MPa.

Keywords :

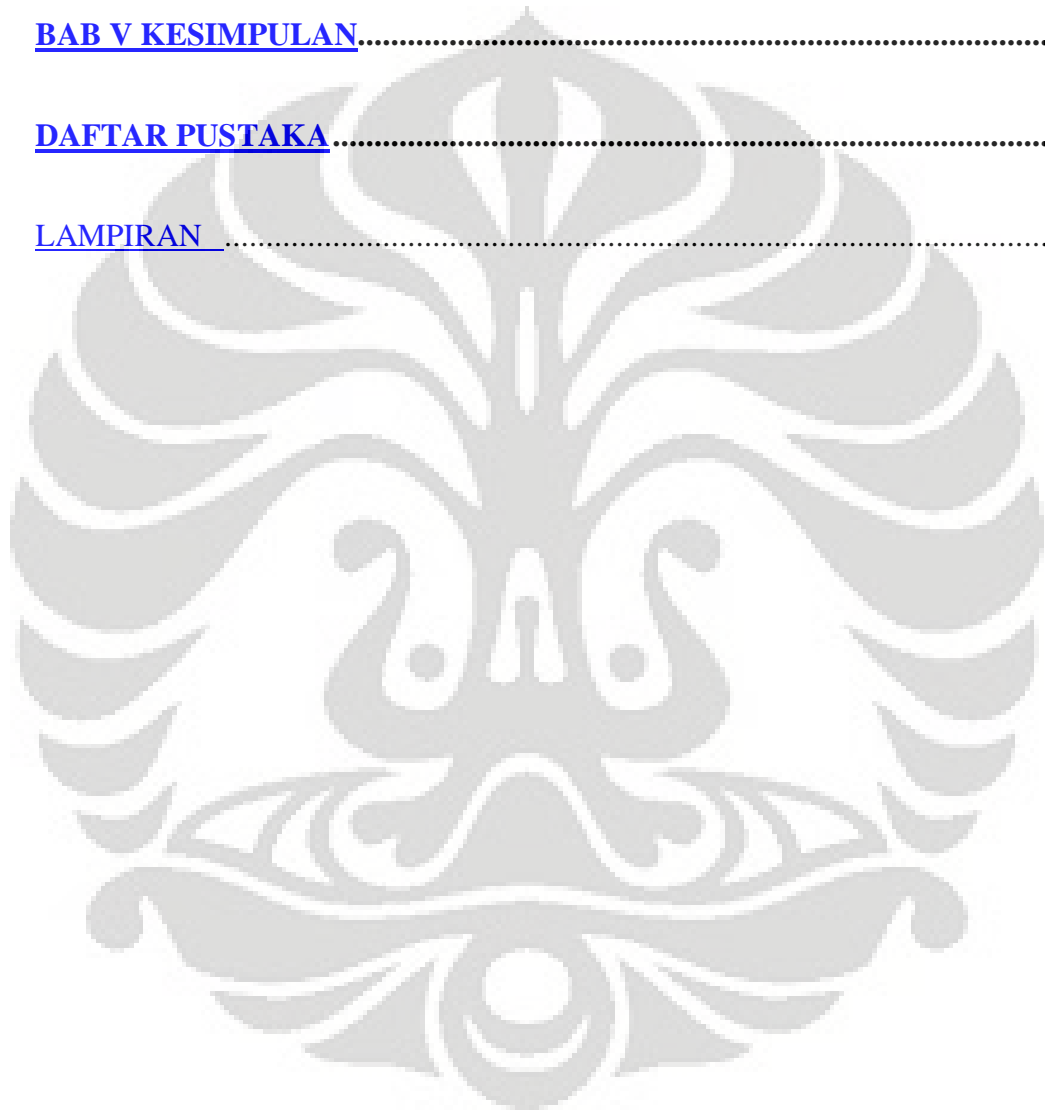
Polymer electrolyte membrane fuel cell, bipolar plate, composit, synthetic graphite, carbon black ,epoxy resin, conductivity, polyaniline

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	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
<u>BAB I PENDAHULUAN</u>	1
<u>1.1</u> <u>Latar Belakang</u>	1
<u>1.2</u> <u>Perumusan Masalah</u>	4
<u>1.3</u> <u>Tujuan Penelitian</u>	5
<u>1.4</u> <u>Ruang Lingkup dan Batasan Masalah</u>	5
<u>1.5</u> <u>Sistematika Penulisan</u>	6
<u>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</u>	7
<u>2.1</u> <u>Teknologi Fuel Cell</u>	7
<u>2.2</u> <u>Fuel Cell Berbahan Dasar Polimer (Polymer Exchange Membrane Fuel Cell)</u>	10
<u>2.2.1</u> <u>Membrane Elecrode Assembly (MEA)</u>	13
<u>2.2.2</u> <u>Pelat Bipolar (Bipolar Plates)</u>	16
<u>2.4</u> <u>Material Komposit</u>	20
<u>2.4.1</u> <u>Polimer Konduktif</u>	26
<u>2.4.2</u> <u>Komposit Polimer – Karbon Untuk Pelat Bipolar</u>	28
<u>2.4.2.1</u> <u>Grafrit Sintetis</u>	31
<u>2.4.2.2</u> <u>Carbon Black</u>	33
<u>2.4.2.3</u> <u>Epoxy Resin</u>	36
<u>2.4.2.4</u> <u>Toulene</u>	38
<u>2.4.2.5</u> <u>Metanol</u>	38

2.4.2.6	<i>Polyaniline</i>	39
<u>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</u>		42
3.1	<u>Diagram Alir Penelitian</u>	42
3.2	<u>Alat dan Bahan</u>	43
3.2.1	<u>Peralatan</u>	43
3.2.2	<u>Bahan</u>	43
3.2.2.1	<u>Epoxy Resin</u>	44
3.2.2.2	<u>Metanol</u>	44
3.2.2.3	<u>Toluene</u>	44
3.2.2.4	<u>Grafit Sintetis</u>	44
3.2.2.5	<u>Carbon Black</u>	45
3.2.2.6	<u>Polyaniline</u>	45
3.3	<u>Prosedur Penelitian</u>	45
3.3.1	<u>Preparasi Sampel</u>	45
3.3.1.1	<u>Penimbangan</u>	45
3.3.1.2	<u>Pencampuran (<i>Mixing</i>)</u>	46
3.3.1.3	<u>Pencetakan Sampel</u>	48
3.3.1.4	<u>Pengamatan Sudut Kontak</u>	49
3.3.1.5	<u>Pembuatan Spesimen Uji</u>	51
3.3.2	<u>Pengujian Karakteristik Material</u>	52
3.3.2.1	<u>Pengukuran Densitas</u>	52
3.3.2.2	<u>Pengujian Konduktivitas Listrik</u>	53
3.3.2.3	<u>Pengukuran Porositas</u>	54
3.3.2.4	<u>Pengujian Fleksural</u>	56
3.3.2.5	<u>Pengamatan SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>) dan EDS (<i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i>)</u>	57
<u>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN</u>		59
4.1	<u>Sampel Pelat Bipolar</u>	59
4.1.1	<u>Pembasahan</u>	59
4.1.2	<u>Pengamatan Visual</u>	61
4.1.3	<u>Pembuatan Sampel Uji Karakteristik</u>	63
4.2	<u>Pengujian Karakterisasi</u>	64
4.2.1	<u>Pengujian Densitas</u>	64

4.2.2	Pengujian Porositas	66
4.2.3	Pengujian Fleksural	69
4.2.4	Pengamatan SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>) dan EDS (<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>)	72
4.2.5	Pengujian Konduktivitas	77
4.3	Perbandingan Pelat Bipolar	80
 BAB V KESIMPULAN		82
 DAFTAR PUSTAKA		83
 LAMPIRAN		88



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Peningkatan Populasi Manusia dan Jumlah Kebutuhan Energi di Dunia	1
Gambar 1.2	Penggunaan Teknologi <i>Fuel Cell</i>	3
Gambar 2.1	Penyusun Fuel Cell	7
Gambar 2.2	Berbagai Jenis Fuel Cell	10
Gambar 2.3	Komponen Penyusun PEMFC	11
Gambar 2.4	Membran Polimer pada PEMFC.....	13
Gambar 2.5	Komponen Penyusun Membran Polimer pada : PEMFC (a) ; dan Materialnya (b).....	15
Gambar 2.6	Struktur Kimia Nafion.....	16
Gambar 2.7	Material yang Digunakan Sebagai Pelat Bipolar	17
Gambar 2.8	Pelat Bipolar	19
Gambar 2.9	Parameter dari Bahan Pengisi pada Komposit : Distribusi (a), Konsentrasi (b), Orientasi (c), Bentuk (d), dan Ukuran (e)	22
Gambar 2.10	Fenomena <i>Interface</i> dan <i>Interphase</i> pada Komposit	23
Gambar 2.11	Contact Angle yang terbentuk pada Komposit	24
Gambar 2.12	Jenis Komposit berdasarkan Bentuk Penguat	26
Gambar 2.13	Jenis Polimer Konduktif	27
Gambar 2.14	Grafik Pengaruh Variabel Proses terhadap Resistivitas : Tekanan (a), Temperatur (b), dan Rasio Pencampuran (c)	31
Gambar 2.15	Grafik Pengaruh Penambahan Grafit terhadap Konduktivitas	32
Gambar 2.16	<i>Carbon Black</i> pada : Elektroda (a), Polimer (b)	34
Gambar 2.17	Grafik Pengaruh Penambahan <i>Carbon Black</i> terhadap : Resistivitas (a), Kekuatan Tarik (b).....	35
Gambar 2.18	Struktur Dasar Epoxy	36
Gambar 2.19	Proses Pembuatan Epoxy Resin	37
Gambar 2.20	Struktur Toluene	38
Gambar 2.21	Struktur Metanol	39
Gambar 2.22	Jenis Polyaniline : Leucoemeraldine (a), Emeraldine (b), Pernigraniline (c)	40
Gambar 2.23	Proses Oksidasi <i>Polyaniline</i>	40
Gambar 2.29	Pengamatan TEM dari Serbuk Polyaniline	41
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	42
Gambar 3.2	Proses <i>Polymer Blending</i>	47

Gambar 3.3	Hasil Proses <i>Mixing</i>	48
Gambar 3.4	Proses Pencetakan	49
Gambar 3.5	Penimbangan Massa di dalam Air	53
Gambar 3.6	Skema Uji Konduktivitas	53
Gambar 3.7	Pengujian Porositas	55
Gambar 3.8	Skematis Pengujian Fleksural	56
Gambar 4.1	<i>Drop Test</i> yang dilakukan pada Pelat Bipolar dengan Penambahan <i>Polyaniline</i> : 50 mg (a) ,100 mg (b), 150 mg (c), dan 200 mg (d). 60	
Gambar 4.2	Sampel Pelat Bipolar yang dihasilkan dengan Penambahan: <i>Polyaniline</i> 50 mg (a), <i>Polyaniline</i> 100 mg (b), <i>Polyaniline</i> 150 mg (c), <i>Polyaniline</i> 200 mg (d).....	62
Gambar 4.3	Pembagian Sampel Uji Karakteristik : Uji Konduktivitas (a), Uji Fleksural (b), Pengamatan SEM dan EDS (c)	64
Gambar 4.4	Hasil Pengujian Densitas	65
Gambar 4.5	Hasil Pengujian Porositas	67
Gambar 4.6	Bakalan yang terbentuk pada Penambahan <i>Polyaniline</i> sebanyak: 50 mg (a), 200 mg (b).....	68
Gambar 4.7	Hasil Pengujian Fleksural.....	70
Gambar 4.8	Pengamatan SEM pada Sampel Pelat Bipolar dengan Penambahan <i>Polyaniline</i> Sebanyak : 50 mg (a), 100 mg (b), 150 mg (c), 200 mg (d).....	74
Gambar 4.9	Pengujian EDS pada Sampel dengan Penambahan <i>Polyaniline</i> Sebanyak 200 mg.....	76
Gambar 4.10	Hasil Pengujian Konduktivitas	77
Gambar 4.11	Pengaruh Penambahan Bahan Pengisi terhadap Konduktivitas Listrik	79

DAFTAR TABEL

<u>Tabel 2.1 Jenis Fuel Cell</u>	9
<u>Tabel 2.2 Komponen Penyusun PEMFC</u>	12
<u>Tabel 2.3 Karakteristik Nafion</u>	16
<u>Tabel 2.4 Karakteristik Pelat Bipolar yang Ideal</u>	19
<u>Tabel 2.5 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Beberapa Material sebagai Pelat Bipolar</u>	18
<u>Tabel 2.6 Berbagai Jenis Komposit beserta Keuntungan dan Kerugiannya</u>	25
<u>Tabel 2.7 Jenis Polimer Konduktif Elektron</u>	26
<u>Tabel 2.8 Sifat dari Beberapa Matriks Thermoplastik dan Thermoset</u>	30
<u>Tabel 2.9 Pengaruh Bentuk dan Ukuran Grafit terhadap Beberapa Sifat Fisik dan Mekanik</u>	33
Tabel 3.1 Komposisi Pelat Bipolar	46
Tabel 4.2 Nilai Porositas pada Setiap Sampel.....	67
Tabel 4.3 Nilai Kekuatan Fleksural pada Setiap Sampel	70
Tabel 4.4 Nilai Resistivitas dan Konduktivitas pada Setiap Sampel	77
Tabel 4.5 Perbandingan Nilai Resistivitas	78
Tabel 4.6 Perbandingan Sifat Komposit Pelat Bipolar	81

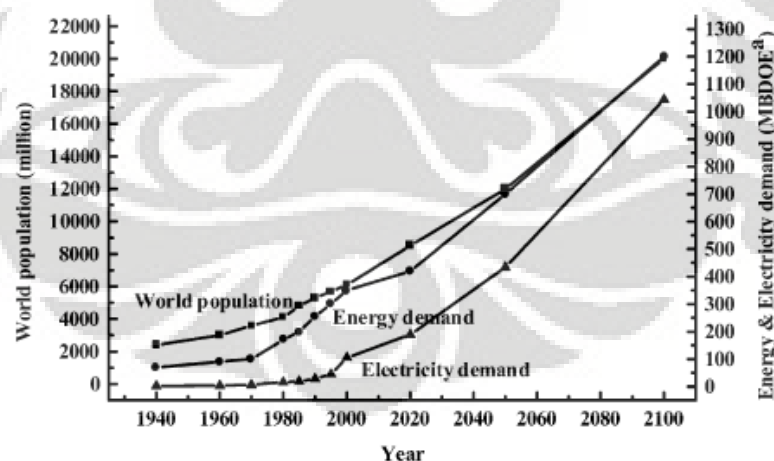
DAFTAR LAMPIRAN

<u>Lampiran 1 Peralatan Preparasi Sampel</u>	88
<u>Lampiran 2 Peralatan Pengujian Karakterisasi</u>	89
<u>Lampiran 3 Spesifikasi Epoxy</u>	91
<u>Lampiran 4 Spesifikasi Hardener</u>	92
<u>Lampiran 5 Spesifikasi Metanol dan Toluene</u>	93
<u>Lampiran 6 Spesifikasi Grafit Sintesis dan Polyaniline</u>	94
<u>Lampiran 7 Hasil Perhitungan Sudut Kontak</u>	95
<u>Lampiran 8 Hasil Pengujian Densitas</u>	96
<u>Lampiran 9 Hasil Pengujian Porositas</u>	97
<u>Lampiran 10 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik</u>	98
<u>Lampiran 11 Hasil Pengujian Fleksural</u>	99
Lampiran 12 Hasil Pengamatan SEM.....	100
Lampiran 13 Hasil Pengujian EDS	102
Lampiran 14 Tabel <i>Bashforth</i> dan <i>Adams</i>	103
Lampiran 15 Tabel Densitas Air	104

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di dalam peradaban manusia yang semakin berkembang seperti sekarang ini, tidak dapat dipungkiri bahwa kebutuhan energi sebagai penunjang kehidupan sangat dibutuhkan. Setiap manusia membutuhkan energi listrik untuk memenuhi kebutuhan hidup mereka dan bahkan setiap aktivitas yang dilakukan juga membutuhkan energi listrik baik secara langsung maupun tidak langsung. Energi listrik merupakan suatu kebutuhan yang harus tersedia dan terpenuhi setiap saat. Sebagaimana kita ketahui, penambahan pertumbuhan penduduk di dunia meningkat setiap tahunnya berdasarkan pada Gambar 1.1. Peningkatan tersebut, menyebabkan kebutuhan energi semakin meningkat pula. Namun, peningkatan jumlah energi yang tersedia berbanding terbalik dengan peningkatan jumlah penggunaannya. Walaupun setiap tahunnya dilakukan upaya untuk meningkatkan produksi listrik, tetapi jumlahnya masih belum dapat memenuhi kebutuhan dari total kebutuhan energi listrik yang diperlukan.



Gambar 1.1 Peningkatan Populasi Manusia dan Jumlah Kebutuhan Energi di Dunia [1]

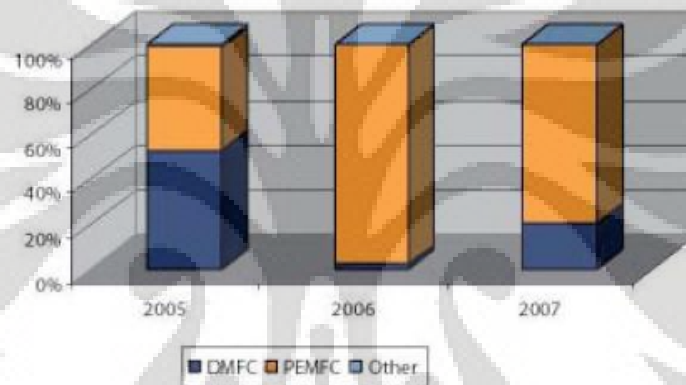
Keterbatasan ketersediaan pasokan energi listrik tersebut menimbulkan permasalahan dan harus segera ditemukan solusinya. Sampai saat ini, ketersediaan energi sangat tergantung kepada ketersediaan sumber daya alam sebagai sumber utama penghasilnya. Sebagaimana kita tahu, sumber utama seperti minyak bumi,

batu bara dan gas alam, merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui dan cadangannya semakin menipis. Sebagai salah satu contohnya adalah minyak bumi, cadangan minyak di Indonesia yang digunakan sebagai sumber bahan bakar bagi pembangkit listrik dari tahun 1990 hingga 2003 terus mengalami penurunan, dari 10,9 menjadi 8,8 juta barel [2]. Pemanfaatan sumber daya alam tersebut menghasilkan efek negatif terhadap lingkungan. Maka dari itu, diperlukan suatu energi alternatif baru yang dapat mengatasi permasalahan tersebut.

Salah satu energi alternatif yang memiliki potensi cukup besar di masa depan adalah *Fuel cell*. Diharapkan dengan memanfaatkan energi alternatif ini, pemakaian sumber daya alam seperti minyak bumi, batu bara dan gas bumi sebagai sumber utama penghasil energi listrik dapat dikurangi. Efek pencemaran lingkungan pun dapat diminimalisir sehingga kelestarian bumi dapat terjaga di masa yang akan datang.

Fuel cell adalah sebuah alat elektrokimia yang mengkonversi energi kimia sebagai bahan bakar menjadi energi listrik yang memiliki efisiensi tinggi dan ramah terhadap lingkungan. Kebanyakan pembangkit listrik menghasilkan panas ketika memproduksi listrik (siklus *carnot*), namun *fuel cell* tidak dibatasi oleh keterbatasan efisiensi *carnot* ketika menghasilkan listrik, sehingga tidak menyebabkan polusi lingkungan [3]. *Fuel cell* memanfaatkan gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) sebagai bahan bakar untuk menghasilkan listrik dan menghasilkan air sebagai hasil reaksinya yang tidak berbahaya bagi lingkungan. Struktur fisik dasarnya terdiri atas lapisan elektrolit, dimana salah satu sisinya merupakan daerah kontak anoda berpori dengan katoda berpori pada sisi lainnya. Ada enam tipe umum dari *fuel cell*, yaitu *Alkaline Fuel Cell* (AFC), *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC), *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC), *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC), *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC), dan *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC). Perbedaan jenis ini didasarkan kepada jenis material sebagai elektrolitnya [4]. Dikarenakan perbedaan jenis elektrolit yang digunakan, maka penggunaan dari masing-masing jenis *fuel cell* tersebut berbeda karena kemampuannya menghantarkan listrik pun berbeda.

Salah satu jenis *fuel cell* yang saat ini sering dikembangkan adalah *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.2. PEMFC terdiri dari polimer solid sebagai elektrolit dan elektoda (anoda dan katoda) karbon yang mengandung katalis perak dan pelat bipolar [5]. Dengan elektrolit berbentuk padat, penggunaan *fuel cell* ini sangat mudah dan lebih *mobile*. Sehingga PEMFC memiliki potensi sangat besar dan menjanjikan untuk aplikasi transportasi dan alat-alat *portable* karena polimer memiliki bobot yang ringan. PEMFC juga memiliki banyak keunggulan, antara lain efisiensinya tinggi, kerapatan arus tinggi, temperatur aplikasi relatif rendah, suplai bahan bakar yang baik, dan waktu pakai panjang [3].



Gambar 1.2 Penggunaan Teknologi *Fuel Cell* [6]

Penelitian akan difokuskan terhadap salah satu komponen di dalam PEMFC, yaitu pelat bipolar. Pelat bipolar berfungsi sebagai penghubung elektrik antara dua elektroda dengan kutub yang berbeda, mendistribusikan gas reaktan (hidrogen dan oksigen), penghantar elektron dari anoda ke katoda, penghantar panas dari dan menuju elektroda mengalirkan produk akhir dalam bentuk air dari tiap sel, penghalang perpindahan gas antar sel, dan menjaga stabilitas struktur dari PEMFC itu sendiri [7]. Berdasarkan fungsi dari komponen ini, dapat disimpulkan bahwa pelat bipolar memiliki peranan penting didalam efektif atau tidaknya PEMFC digunakan sebagai penghasil energi listrik. Semakin baik karakteristik dan sifat dari pelat bipolar, maka semakin baik pula penggunaan PEMFC sebagai *fuel cell*. Namun, yang menjadi permasalahan adalah biaya produksi dari pelat bipolar yang relatif mahal. Pelat bipolar ini sendiri mencakup sekitar 80%

volume, 70% berat, dan 60% biaya dari harga *fuel cell* dari total berat PEMFC [8]. Sehingga faktor biaya produksi perlu diperhatikan.

1.2 Perumusan Masalah

Mahalnya biaya produksi pembuatan plat bipolar menjadi penghambat terhadap perkembangan penggunaan PEMFC sebagai energi alternatif. Upaya yang dilakukan untuk mengatasi permasalahan tingginya biaya produksi adalah pemilihan material untuk pembuatan pelat bipolar yang lebih ekonomis. Hal ini dapat dilakukan dengan penggunaan material polimer yang memiliki rasio perbandingan berat lebih kecil, sehingga berat dari pelat bipolar sebesar 80% dari total berat PEMFC dapat dikurangi dan biaya produksi pun dapat direduksi. Namun, pelat bipolar yang terbuat dari polimer pada umumnya memiliki nilai konduktivitas yang sangat rendah dan belum mampu menghasilkan nilai konduktivitas standart untuk sebuah pelat bipolar yaitu $> 100 \text{ S/cm}$ [8].

Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan penggunaan material komposit sebagai pelat bipolar. Dengan penggunaan material komposit, kita bisa mendapatkan kelebihan dari beberapa material yang berbeda. Salah satunya adalah sifat konduktivitasnya. Material komposit dengan matriks polimer berupa *epoxy resin* dan penambahan grafit sebagai penguatnya dapat menaikkan nilai konduktivitas suatu pelat bipolar [4]. Penguat yang digunakan harus terdispersi secara baik pada matriks dan memiliki nilai konduktivitas dan mekanis yang baik sehingga pelat bipolar akan memiliki sifat konduktivitas dan mekanis yang baik pula. Selain grafit, unsur penguat seperti *carbon black* juga bisa meningkatkan nilai konduktivitas dan nilai fleksibilitas dari pelat bipolar. Namun, semakin banyak *carbon black* yang ditambahkan akan memiliki efek negatif. Pada jumlah penambahan *carbon black* tertentu, material tersebut justru terdapat porositas dan menjadi lemah. Dapat dikatakan bahwa nilai konduktivitas dan fleksibilitasnya menurun [5].

Berdasarkan pengaruh negatif tersebut, maka diperlukan penambahan material lain untuk menambah konduktivitas suatu pelat bipolar tanpa harus dilakukan penambahan *carbon black* berlebih. Hal ini dapat dilakukan dengan penambahan polimer konduktif.

Material komposit yang dipakai didalam penelitian ini adalah material komposit berbasis polimer dengan *epoxy resin* sebagai matriks, grafit sintetis dan *carbon black* sebagai penguat, dan *polyaniline* sebagai polimer konduktif. Material tersebut harus memiliki performa yang baik dan konduktivitas listrik yang baik pula didalam pengaplikasiannya sebagai penghasil energi listrik (*fuel cell*). Maka dari itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui komposisi optimal dari *epoxy resin*, grafit sintetis, *carbon black* dan *polyaniline* sebagai komponen-komponen penyusun material komposit agar menghasilkan sifat-sifat yang diinginkan.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang ingin dilakukan, antara lain:

- mengembangkan pembuatan komposit material untuk pelat bipolar yang ekonomis;
- menentukan komposisi campuran yang tepat antara *epoxy resin*, *polyaniline*, dan grafit sintetis untuk menghasilkan komposit polimer pelat bipolar PEMFC yang memiliki performa baik;
- mengetahui pengaruh penambahan *polyaniline* terhadap karakteristik (sifat elektrik dan mekanisnya) dari pelat bipolar PEMFC.

1.4 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Pada penelitian ini akan diformulasikan komposisi dari material polimer (*epoxy resin*) sebagai matriks yang diperkuat oleh material keramik (grafit) dengan penambahan *polyaniline* sebagai polimer konduktif dan *carbon black*. Semua material yang digunakan untuk membentuk pelat bipolar tersebut memiliki perbandingan tertentu. Perbandingan yang dipakai adalah 80% berupa grafit sintesis, *carbon black* dan *polyaniline* dan 20% berupa epoxy resin dari total berat keseluruhan dari pelat bipolar (180 gram) mengacu pada penelitian sebelumnya^[9]. Pembuatan pelat bipolar dilakukan menggunakan mesin *hot press* dengan temperatur 70⁰ C dan tekanan sebesar 300 kg/cm³.

Besarnya penambahan *carbon black* adalah persentasi penambahan *carbon black* optimum terhadap nilai konduktivitas dari penggunaan grafit sintesis^[10],

Universitas Indonesia

sedangkan *polyaniline* yang ditambahkan terdiri dari tiga variabel (50 mg, 100 mg dan 150 mg) dan sisanya adalah grafit sintetis. Perbandingan *epoxy* dan *hardener* yang digunakan adalah sebesar 1:1 (sebanyak 20% dari total berat pelat bipolar).

Setiap material yang ditambahkan diaduk (*mixing*) dan dibentuk menjadi plat bipolar menggunakan mesin *hot press*. Sampel pelat bipolar yang akan dibuat sebanyak tiga buah sesuai dengan variabel penambahan *polyaniline* yang telah ditentukan sebelumnya. Akan dilakukan beberapa pengujian pada masing-masing sampel, yaitu uji fleksural, uji konduktivitas, uji porositas, dan uji densitas. Untuk Pengamatan terhadap interaksi yang terjadi pada setiap komponen dilakukan dengan menggunakan *SEM* (*Scanning Electron Microscope*).

1.5 Sistematika Penulisan

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

Bab 1 : Pendahuluan

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

Bab 2 : 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.

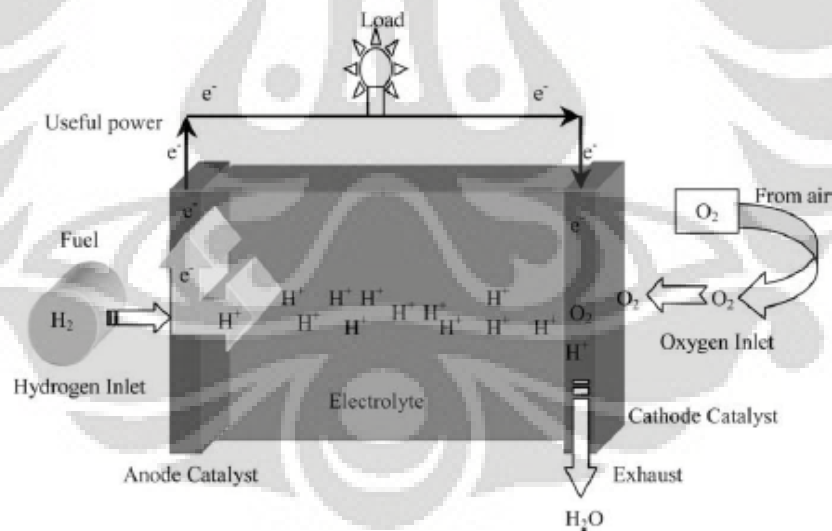
Bab 5 : Penutup

Bab ini berisikan kesimpulan akhir berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian ini

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teknologi Fuel Cell

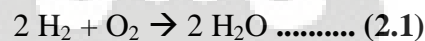
Fuel cell adalah sebuah alat elektrokimia yang mengkonversi energi kimia sebagai bahan bakar menjadi energi listrik yang memiliki efisiensi tinggi dan ramah terhadap lingkungan ^[3]. Bahan bakar yang digunakan didalam *fuel cell* tersebut adalah gas hidrogen (H_2) dan gas oksigen (O_2) yang akan dikonversi menjadi energi listrik dan hanya menghasilkan air sebagai zat buang dari hasil reaksi. Hal ini menyebabkan *fuel cell* tidak mencemari lingkungan seperti penghasil listrik konvensional yang memanfaatkan bahan bakar fosil. Selain itu, efisiensi yang dihasilkan juga lebih tinggi, yang berarti dengan jumlah bahan bakar yang sama, energi listrik yang dihasilkan lebih banyak. Teknologi ini akan terus menghasilkan energi listrik seiring dengan tersedianya bahan bakar dan tidak memerlukan *charging* serta tidak menghabiskan reaktan seperti halnya baterai. Gambar 2.1 menunjukkan struktur dari *fuel cell*.



Gambar 2.1 Penyusun *Fuel Cell* [1]

Struktur fisik dari *fuel cell* terdiri dari anoda, katoda dan larutan elektrolit yang berada diantara keduanya dan saling kontak satu sama lain. Anoda dan katoda merupakan tempat terjadinya reaksi kimia reduksi dan oksidasi dari masing-masing bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan elektron yang

akan dialirkan melalui larutan elektrolit yang dapat berupa membran polimer, garam karbonat cair, lapisan oksida keramik, larutan alkali dan asam fosfat. Elektron-elektron yang dihasilkan tersebut merupakan sumber dari energi listrik nantinya. Sebagaimana telah disebutkan diatas, bahan bakar yang digunakan di dalam proses merupakan gas oksigen sebagai zat oksidan dan hidrogen sebagai zat reduktan. Gas oksigen yang didapatkan berada di udara bebas, sedangkan gas hidrogen yang digunakan berasal dari reaksi reformer dari hidrokarbon atau dapat diperoleh dari metanol yang diuraikan menjadi gas CO dan hidrogen, kemudian gas CO dioksidasi menjadi CO₂ dan air [3]. Gas hidrogen sebagai bahan bakar akan dialirkan ke anoda (elektroda negatif), sedangkan oksigen sebagai zat oksidan akan dialirkan ke katoda (elektroda positif). Reaksi elektrokimia akan terjadi pada masing-masing elektroda untuk menghasilkan arus listrik. Gas hidrogen pada anoda akan dioksidasi menjadi proton H⁺ dan ion e⁻, dimana ion e⁻ akan menghasilkan listrik dan bersama proton H⁺ akan direaksikan bersama gas oksigen yang akan direduksi pada katoda untuk menghasilkan zat buangan, yaitu air. Setiap molekul H₂ terpecah menjadi dua atom H⁺ (proton), sedang setiap atom hidrogen melepaskan elektronnya. Berikut adalah reaksi yang terjadi didalam *fuel cell* :



Penggunaan teknologi *fuel cell* sebagai sumber penghasil listrik memiliki banyak keuntungan. Keuntungan yang dapat diperoleh adalah sebagai berikut [1]:

- Penggunaan energi fosil yang pesediaannya makin terbatas dapat dikurangi, sehingga ketergantungan akan kebutuhan enegi fosil pun dapat dikurangi.
- Dapat meningkatkan ketersediaan energi listrik.
- Biaya operasi yang lebih rendah dibandingkan dengan penghasil energi listrik konvensional.
- Menghasilkan energi listrik dengan jumlah yang tetap.
- Bahan bakar yang digunakan tersedia dalam jumlah yang banyak (gas hidrogen dan gas oksigen).

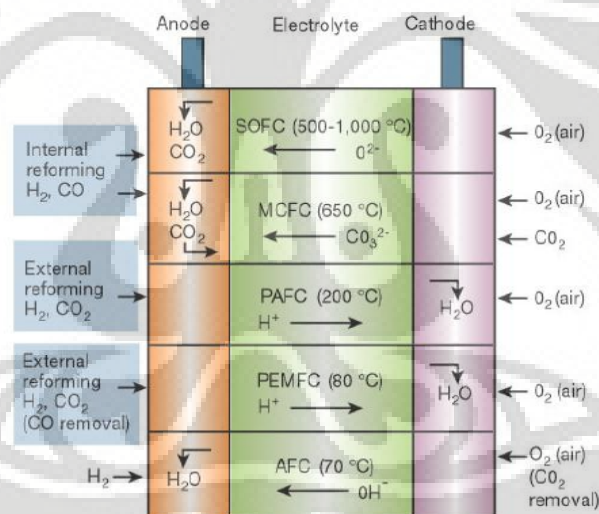
- Emisi yang dihasilkan tidak mencemari lingkungan (hanya berupa air).
- Memiliki efisiensi yang tinggi hingga 90%, sehingga penggunaan bahan bakar pun lebih efisien.

Perbedaan jenis *fuel cell* didasarkan pada perbedaan larutan elektrolit yang digunakan. Larutan elektrolit yang digunakan dapat berbentuk cairan atau bahkan padatan yang membutuhkan jenis bahan bakar yang berbeda. Perbedaan jenis dari *fuel cell* tersebut dapat dilihat dari Gambar 2.2. Setiap jenis *fuel cell* memiliki temperatur operasi tersendiri, sehingga penggunaannya berbeda. Berikut adalah jenis-jenis dari *fuel cell* :

Tabel 2.1 Jenis Fuel Cell [1]

Jenis	Elektrolit	Temperatur Operasi (°C)	Bahan Bakar
<i>Alkaline</i> (AFC)	<i>Potassium hydroxide</i> (KOH)	50 - 200	Hidrogen murni (hydrazine)
<i>Proton Exchange Membrane</i> (PEMFC)	Polimer, <i>proton exchange membrane</i>	50 - 80	Hidrogen dari hidrokarbon dan metanol
<i>Phosphoric Acid</i> (PAFC)	Asam fosfor	160 – 210	Hidrogen dari hidrokarbon dan alkohol
<i>Molten Carbonate</i> (MCFC)	<i>Molten salt</i> (nitrat, sulfat, karbonat, dll)	630 - 650	Hidrogen, karbon monoksida, propana
<i>Solid Oxide</i> (SOFC)	Zirkonia dan <i>doped perovvskite</i>	600 - 1000	Gas alam atau propana
<i>Direct Methanol</i> (DMFC)	Polimer	60 - 200	Metanol cair
<i>Sulphuric Acid</i> (SAFC)	Asam sulfur	80 - 90	Alkohol atau hidrogen

Salah satu jenis *fuel cell* yang saat ini sering dikembangkan adalah *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Komponen penyusun PEMFC terdiri dari membran solid polimer sebagai elektrolit dan elektroda (anoda dan katoda) karbon yang mengandung katalis perak, pelat bipolar, pelat penutup (*end plate*) dan pengumpul arus [5]. Setiap komponen yang tersusun didalam PEMFC memiliki fungsi masing-masing dan saling mendukung satu sama lain untuk menghasilkan energi listrik di dalam *fuel cell*. Penggunaan elektrolit berbentuk padat, menyebabkan penggunaan *fuel cell* ini sangat mudah dan lebih *mobile*. Sehingga PEMFC memiliki potensi sangat besar dan menjanjikan untuk aplikasi transportasi dan alat-alat *portable* karena polimer memiliki bobot ringan. PEMFC juga memiliki banyak keunggulan, antara lain efisiensinya tinggi, kerapatan arus tinggi, temperatur aplikasi relatif rendah, suplai bahan bakar baik, dan waktu pakai yang panjang [3].



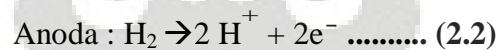
Gambar 2.2 Berbagai Jenis *Fuel Cell* [11]

2.2 *Fuel Cell* Berbahan Dasar Polimer (*Polymer Exchange Membrane Fuel Cell*)

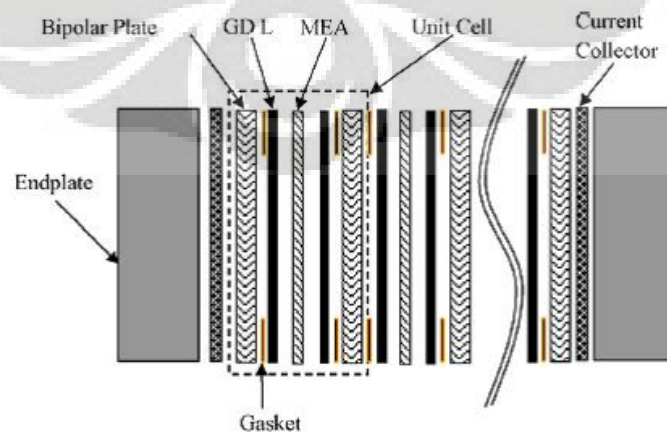
Perbedaan jenis *fuel cell* dibedakan atas jenis elektrolit yang digunakan di dalam komponen penyusunnya. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) menggunakan sebuah membran padat berupa lapisan tipis yang terbuat dari polimer sebagai larutan elektrolit yang menghantarkan elektron dan

menghubungkan anoda dan katoda. PEMFC juga biasa disebut dengan *proton exchange membrane fuel cell*. Penggunaan polimer sebagai membran padat pada komponen *fuel cell*, menyebabkan PEMFC digunakan untuk aplikasi yang relatif rendah ($60^{\circ} - 80^{\circ} \text{ C}$) dan memiliki ketahanan terhadap korosi yang lebih baik. Rendahnya suhu operasi ini menyebabkan rendahnya waktu pemanasan (*warm-up time*). Selain itu, PEMFC dapat memberikan densitas daya yang tinggi dan mempunyai kelebihan dalam hal berat dan volume dibandingkan dengan sel bahan bakar jenis lain. Dengan bobot yang ringan tersebut, PEMFC merupakan teknologi *fuel cell* yang memiliki prospek yang baik untuk aplikasi transportasi atau alat *portable* yang membutuhkan bobot yang ringan untuk meningkatkan effisiensinya. Sedangkan untuk menghasilkan energi, PEMFC hanya memerlukan hidrogen, oksigen, dan air sebagai hasil reaksinya (zat buang). Air yang dihasilkan harus dikelola dengan baik agar tidak membasahi komponen lain didalam PEMFC. Komponen penyusun dari PEMFC dapat dilihat pada Gambar 2.3. 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.

Reaksi di anoda dan katoda :



Reaksi keseluruhan *fuel cell* :



Gambar 2.3 Komponen Penyusun PEMFC [12]

Sel bahan bakar tunggal memiliki keterbatasan dalam tegangan yang dihasilkan, Tegangan yang dihasilkan relatif kecil, biasanya kurang dari 1 Volt, sehingga penggunaannya sangat terbatas pada aplikasi tertentu. Maka dari itu, untuk mengatasi permasalahan tersebut, beberapa unit sel harus dihubungkan dalam suatu susunan berupa tumpukan dari sel bahan bakar. Besarnya tegangan yang dihasilkan bergantung pada jumlah unit sel dalam suatu tumpukan. Jadi, semakin banyak sel tunggal yang dihubungkan menjadi suatu rangkaian, maka tegangan yang dihasilkan akan semakin banyak.

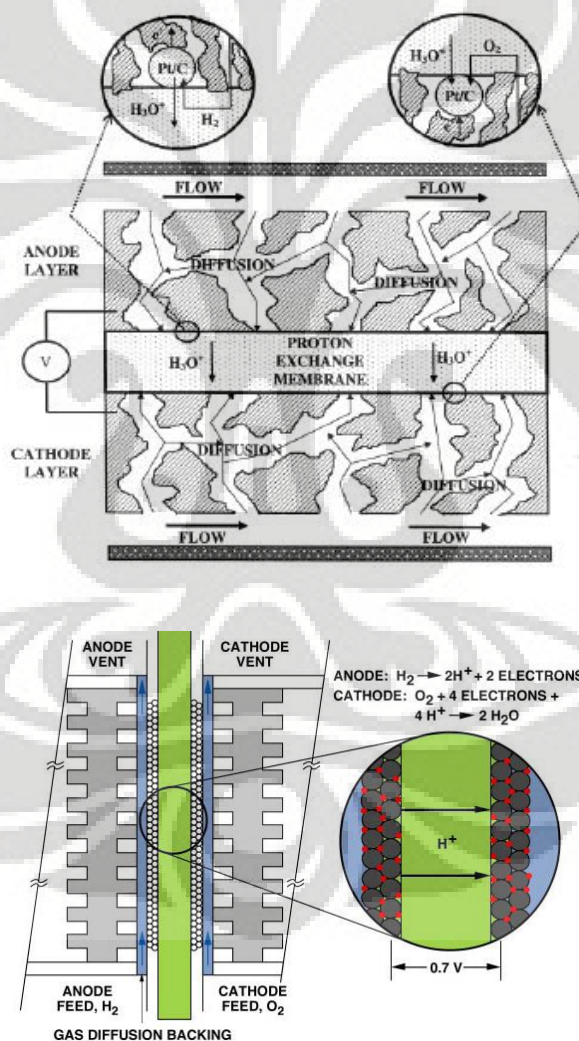
Komponen penyusun PEMFC terdiri dari membran solid polimer sebagai elektrolit dan elektoda (anoda dan katoda) karbon yang mengandung katalis perak, pelat bipolar, pelat penutup (*end plate*) dan pengumpul arus. Masing-masing komponen penyusun tersebut memiliki fungsi tersendiri untuk menjadikan PEMFC sebagai suatu kesatuan sebagai penghasil energi listrik yang baik dan efisien. Berikut adalah karakter dan fungsi dari masing-masing komponen penyusun suatu PEMFC :

Tabel 2.2 Komponen Penyusun PEMFC [8]

Komponen	Fungsi
<i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Sebagai separator antara anoda dan katoda, sehingga reaksi oksidasi dan reduksi dapat terjadi – Mentransfer proton dari anoda ke katoda – Mendistribusikan gas reaktan pada lapisan difusi gas kedalam lapisan katalis
Pelat Bipolar	<ul style="list-style-type: none"> – Memindahkan air dari setiap sel – Memindahkan elektron dari anoda ke katoda – Mendistribusikan gas reaktan ke membran
<i>Endplate</i>	Memungkinkan penyusunan terintegrasi didalam tumpukan PEMFC
Pengumpul Arus	Mengumpulkan dan memindahkan arus dari tumpukan PEMFC ke sirkuit eksternal

2.2.1 Membrane Electrode Assembly (MEA)

MEA yang digunakan pada PEMFC terdiri dari beberapa komponen, yaitu membran, lapisan katalis dan lapisan difusi gas. Bagian-bagian ini dapat dilihat pada Gambar 2.4. Lapisan gas dan lapisan difusi gas terikat pada bagian membran melalui suatu pengikat. Pengikat tersebut berfungsi untuk memperbaiki struktur partikel dari lapisan katalis. Jenis pengikat yang biasa digunakan adalah asam *polytetrafluorosulfonic* [3]. Pengikat ini juga berfungsi untuk mencegah terjadinya penumpukan air dengan strukturnya yang berlubang dan mudah gas berdifusi kedalam lapisan katalis.



Gambar 2.4 Membran Polimer pada PEMFC [3]

Membran polimer merupakan salah satu komponen di dalam PEMFC yang memisahkan elektroda dan merupakan suatu padatan yang menghantarkan kation

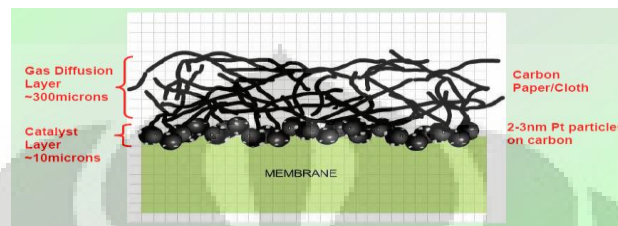
dan proton ke katoda. Dapat dikatakan bahwa membran tersebut menyediakan jalur konduktif bagi proton yang bergerak. Selain itu dapat berfungsi sebagai pemisah antara gas reaktan yang digunakan pada saat reaksi untuk menghasilkan energi listrik didalam *fuel cell* (gas hidrogen dan gas oksigen). Proton akan bergerak di dalam struktur polimer yang digunakan sebagai membran padat dan perpindahannya dipengaruhi oleh ikatan dari polimer dan kandungan air didalamnya (hidrofilik). Sedangkan elektron hasil reaksi di katoda akan berpindah bukan melalui membran padat polimer. Elektron dan proton akan bertemu di katoda dimana akan dihasilkan air sebagai hasil reaksinya dengan adanya gas oksigen yang masuk kedalam katoda. Sedangkan dengan penggunaan hidrogen yang tingkat kemurniannya tinggi, dapat memperpanjang waktu hidup membran dan mencegah pembentukan karbonmonoksida (CO) yang beracun.

Penggunaan material sebagai komponen penyusun membran harus memiliki beberapa sifat-sifat tertentu [13], yaitu diantaranya adalah :

- Memiliki kestabilan terhadap reaksi kimia yang baik
- Memiliki kemampumesinan yang baik (memungkinkan untuk dilakukan pembentukan partikel hingga berukuran 50 nm)
- Bersifat asam
- Memiliki kemampuan menyerap air yang baik (sifat hidrofilik)
- Merupakan konduktor proton (H^+) yang baik ketika terhidrasi

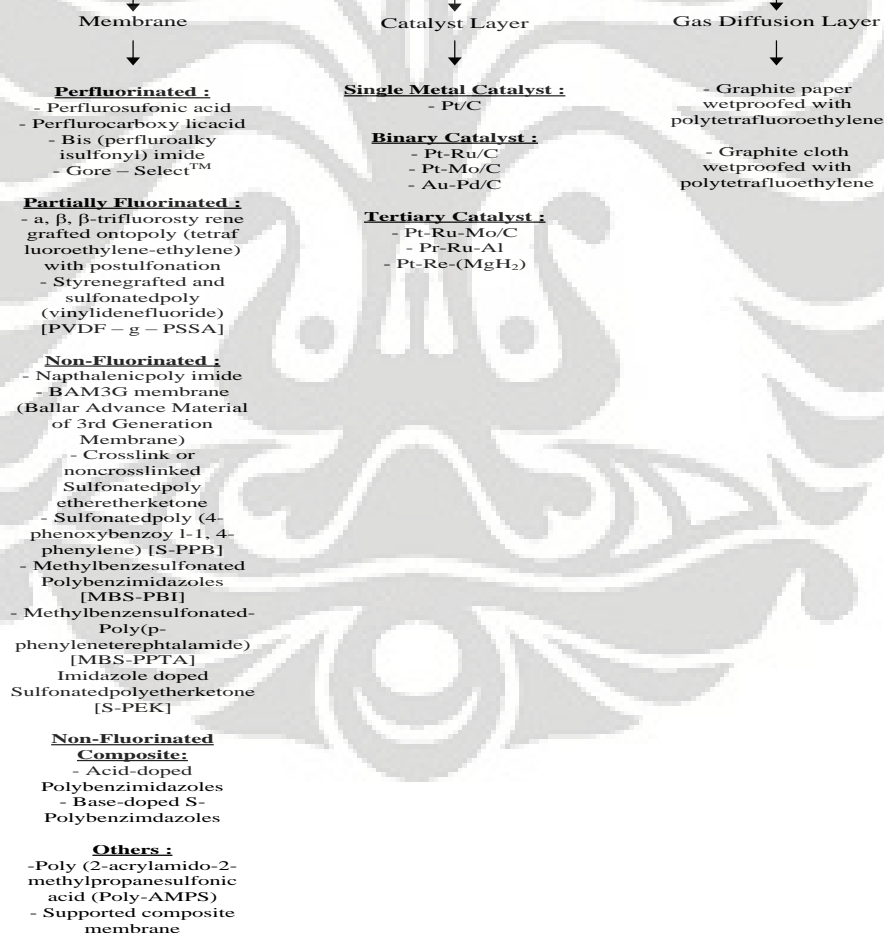
Katalis pada lapisan katalis adalah platinum yang dapat menyediakan jalur proton yang baik dan meningkatkan kemampularutan proton sebaik kemampularutan oksigen. Partikel platinum berasal dari lapisan katalis akan berada sangat dekat pada membran. Lapisan katalis tersebut memicu terjadinya reaksi oksidasi dan reduksi pada anoda dan katoda. Permasalahan yang ditemui adalah mahalnya biaya produksi platina dan pengikat yang digunakan, sehingga dikembangkan metode untuk meningkatkan penggunaan platinum terdeposit dan penurunan pembebanan pada platinum dari 4 mg/cm^2 menjadi $0,4 \text{ mg/cm}^2$ untuk mengurangi biaya produksi. Salah satu metode yang dikembangkan adalah metode *sputtering*. Lapisan difusi gas pada PEMFC menjamin gas-gas reaktan berdifusi secara efektif ke lapisan katalis. Lapisan difusi gas adalah konduktor

listrik yang memindahkan elektron dari dan menuju lapisan katalis. Lapisan ini dibentuk oleh karbon berporos dengan ketebalan 100 - 300 μm . Komponen ini dapat berfungsi sebagai tempat pengelolaan air yang dihasilkan ketika *fuel cell* menghasilkan energi listrik. Komponen dan material penyusun dari MEA dapat dilihat pada Gambar 2.5.



(a)

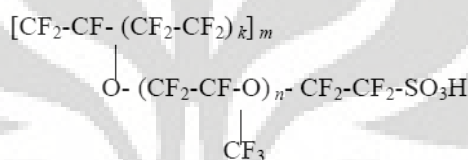
Membrane Electrode Assembly



(b)

Gambar 2.5 Komponen Penyusun Membran Polimer pada :
PEMFC (a) ; dan Materialnya (b) [14]

Material yang dikembangkan sebagai membran solid polimer adalah *Nafion* (nama merk dagang), membran polimer nanokomposit zeolit, membran *sulfonated polyphosphazene-based*, dll. *Nafion* merupakan material yang paling sering digunakan sebagai membran. Ikatan karbon dikelilingi fluorin dan berada pada membran (dikenal juga dengan *fully fluorinated teflon*), membentuk cabang-cabang ikatan yang meningkatkan sifat hidrofilik dari material sehingga kemampuan membran menghantarkan proton meningkat. Membran yang terbuat dari *Nafion* memiliki umur pakai panjang (>50.000 jam). Struktur kimia dan karakteristik dari *Nafion* dapat dilihat pada Gambar 2.6 dan Tabel 2.3.



Gambar 2.6 Struktur Kimia Nafion [15]

Tabel 2.3 Karakteristik Nafion [15]

Sifat	Nilai
<i>Water Uptake</i> (% air)	35
Tensile Modulus (Mpa)	249
Tensile Strength (Mpa)	25
Densitas (g/cm ³)	2
Konduktivitas (S/cm)	0,1

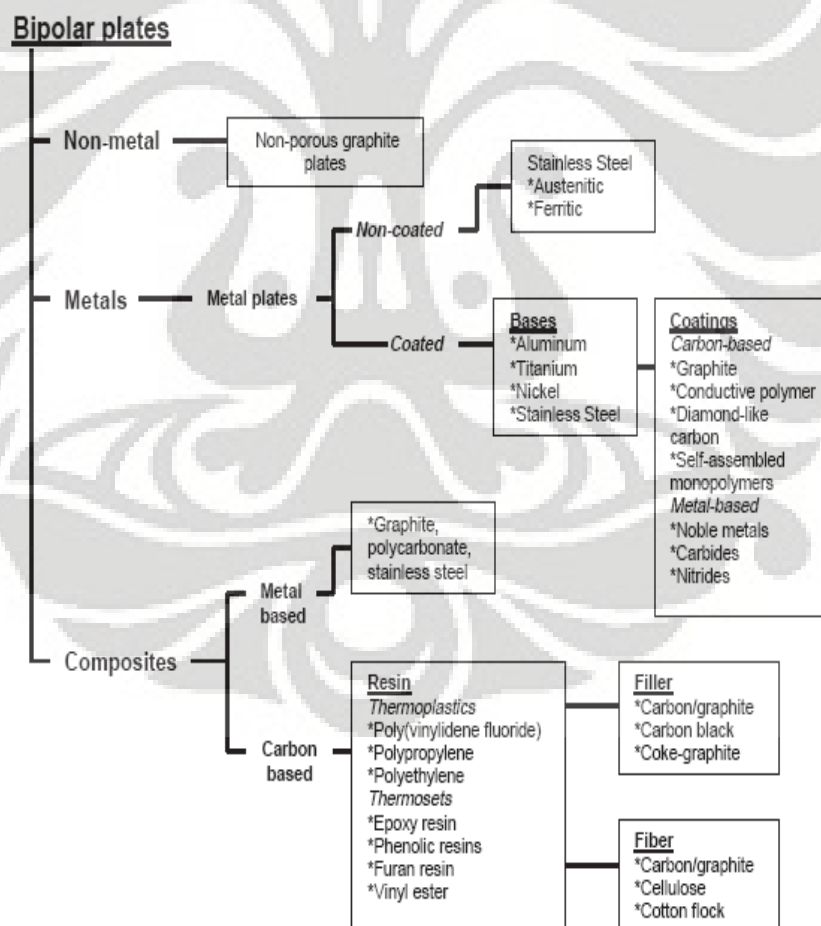
2.2.2 Pelat Bipolar (*Bipolar Plates*)

Pelat bipolar didalam PEMFC juga memiliki peranan yang tidak kalah penting dengan komponen penyusun lainnya. Komponen ini digunakan sebagai penghubung elektrik antara dua elektroda yang berbeda (anoda dan katoda) dan juga menjaga stabilitas struktur dari PMFC itu sendiri. Selain itu, efisien penghasil listrik dari *fuel cell* dipengaruhi dari konduktivitas listrik dan porositas

pelat bipolar itu sendiri. Semakin tinggi konduktivitas listriknya, berarti semakin baik *fuel cell* menghasilkan arus listrik.

Sedangkan dengan porositas yang kecil, gas reaktan tidak dapat keluar melalui poros. Pelat Bipolar harus dibuat setipis dan seringan mungkin, ekonomis, dan mudah dibentuk serta di-*machining*. Juga harus mempunyai kestabilan thermal dan sifat mekanis yang baik, karena fungsi utamanya untuk menghubungkan sel-sel secara elektrik dan menyalurkan gas pada Fuel Cell [16]. Pelat ini seringkali dilengkapi dengan saluran pendingin untuk menjaga temperatur operasi.

Pelat bipolar dapat terbuat dari beberapa jenis material yang berbeda. Gambar 2.7 merupakan material-material yang sering digunakan pada pelat bipolar.

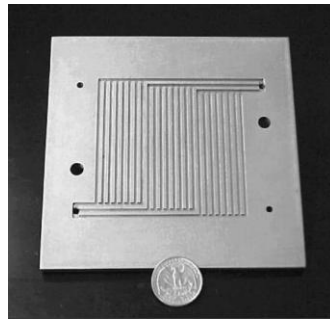


Gambar 2.7 Material yang Digunakan Sebagai Pelat Bipolar [17]

Masing-masing material yang digunakan sebagai pelat bipolar didasarkan atas aplikasi apa yang akan digunakan. Setiap material memiliki keuntungan dan kerugian masing-masing. Penggunaan material yang tepat sebagai pelat bipolar perlu diperhatikan agar penggunaan *fuel cell* sebagai energi penghasil listrik alternatif dapat lebih ekonomis dan efisien. Keuntungan dan kerugian dari masing-masing material pelat bipolar dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Beberapa Material sebagai Pelat Bipolar [18]

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



Gambar 2.8 Pelat Bipolar [14]

Pelat bipolar dapat diaplikasikan pada PEMFC bila memiliki kriteria-kriteria tertentu didasarkan pada karakteristiknya yang meliputi sifat fisik dan mekanik. Karakteristik pelat bipolar yang memenuhi syarat untuk aplikasi PEMFC terdapat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Karakteristik Pelat Bipolar yang Ideal [8,44]

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

Pada permukaan pelat bipolar terdapat saluran-saluran yang dibuat sebagai jalur untuk gas reaktan (*gas flow channels*), dimana jalur-jalur tersebut dapat

mempengaruhi karakteristik akhir dari *fuel cell* yang digunakan [19]. Berdasarkan penjelasan mengenai pelat bipolar sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa pelat bipolar didalam PEMFC memiliki fungsi sebagai berikut [20,21] :

- Mengumpulkan dan mentransport elektron dari anoda dan katoda
- Menghubungkan masing-masing individual *fuel cell* membentuk suatu kesatuan
- Menyediakan aliran transport gas diseluruh area elektroda
- Memisahkan gas oksidan dan bahan bakar
- Memberikan gas hidrogen ke anoda dan gas oksigen ke katoda ketika proses pembuangan air hasil reaksi
- Menyediakan kekuatan mekanik dan kekakuan pada membran dan eletroda pada saat pembebanan ketika proses fabrikasi
- Menyediakan konduktivitas panas untuk membantu mengurangi panas dari elekttroda ke bagian pendingin

2.3 Material Komposit

Material komposit adalah gabungan makroskopis dari dua atau lebih material yang berbeda, dimana diantaranya terbentuk suatu ikatan [25]. Hal ini yang membedakan komposit dengan paduan, dimana paduan dilakukan penambahan pada skala mikroskopis. Kombnasi antara beberapa material didalam komposit yang baik, memberikan sifat-sifat yang lebih baik diantara material penyusunnya. Maka dari itu, komposit diproduksi untuk mengoptimalkan sifat-sifat dari suatu material, seperti sifat mekanik (terutama kekuatan), sifat kimia atau fisik, optimalisasi sifat thermal (ekspansi thermal, konduksi thermal, pelunakan dan titik leleh) sebaik sifat elektriknya (konduktivitas listrik) dan sifat optiknya.

Material komposit dapat terbentuk alami di alam, seperti tulang, yang memiliki kombinasi antara sifat ringan dan kekuatan yang baik. Hal ini dapat terjadi akibat kombinasi antara kristal dari apatit (salah satu paduan kalsium sebagai komponen penyusun utama tulang) sebagai matriks dengan penguat fiber berupa protein kolagen. Komposit digunakan tidak hanya pada aplikasi struktural,

melainkan untuk aplikasi elektronik, thermal, dan dengan kondisi lingkungan lainnya.

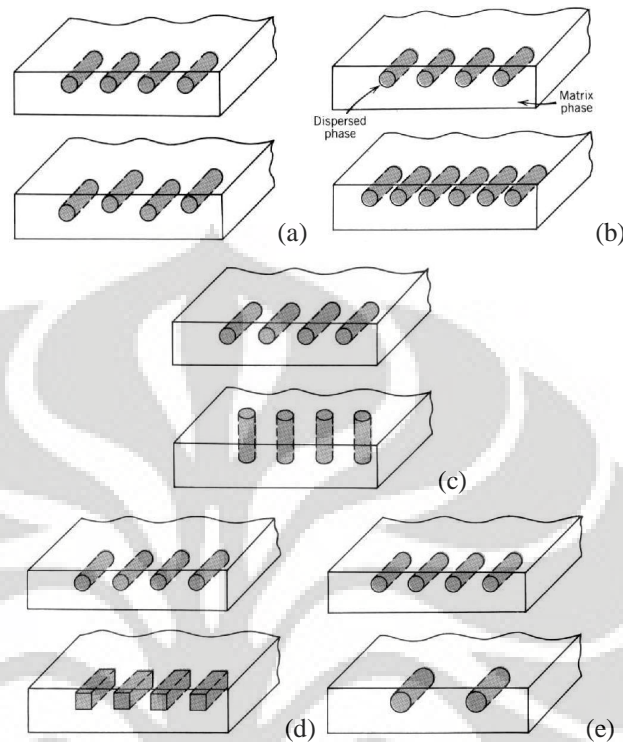
Suatu komposit terdiri dari dua komponen penyusun, yaitu matriks dan penguat (*reinforcements*). Penguat digunakan dalam suatu komposit untuk meningkatkan sifat dari material komposit yang dihasilkan dan memiliki kemampuan untuk ditempatkan pada arah pembebanan untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Matriks dan penguat harus memiliki ikatan yang baik untuk menciptakan sifat yang baik pula. Pada matriks harus terbentuk fase terdispersi untuk meningkatkan kekuatan dan sifat-sifat lainnya. Fungsi dari matriks yang digunakan adalah sebagai berikut [25] :

- Mengikat komponen didalam material komposit dan menentukan stabilitas terhadap temperatur operasi pada komposit
- Melindungi penguat dari keausan dan kontak dengan lingkungan
- Sebagai media transfer tegangan untuk membantu mendistribusikan tegangan
- Menyediakan ketangguhan dan kekuatan geser terhadap material komposit yang baik
- Mengatur orientasi dari penguat dan jarak pada struktur komposit

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

- Setiap komponen penyusun dari material komposit, yaitu matriks dan penguat berpengaruh secara langsung terhadap sifat akhir komposit yang dihasilkan. Ukuran, bentuk, orientasi, konsentrasi dan distribusi dari bahan penguat juga berpengaruh. Sebagai salah satu contohnya, bahan penguat berbentuk silinder atau tidak bersudut memiliki sifat mekanis yang lebih baik dibandingkan dengan penguat yang memiliki sudut pada sisinya. Hal ini dikarenakan, pada bagian sudut tegangan konsentrasinya lebih besar, sehingga sifat mekaniknya pun lebih buruk. Selain itu, kekuatan dari komposit juga dipengaruhi dari parameter

bahan pengisinya, seperti distribusi, konsentrasi, orientasi, bentuk dan ukuran seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Parameter dari Bahan Pengisi pada Komposit : Distribusi (a), Konsentrasi (b), Orientasi (c), Bentuk (d), dan Ukuran (e) [27]

Selain itu, komposisi penguat dan matriks komposit mempengaruhi karakteristik komposit. Semakin banyak komposisi material di dalam komposit, maka akan semakin besar material tersebut mendominasi sifat komposit. Pengaruh komposisi terhadap sifat komposit ini diturunkan dengan menggunakan *rule of mixture* memprediksi sifat akhir komposit [28].

$$E_{cl} = E_f V_f + E_m V_m \dots\dots\dots (2.5)$$

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

Dimana :

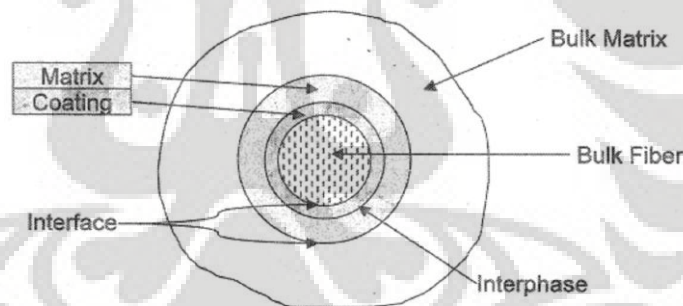
E = Modulus elastisitas (komposit (cl), penguat (f), matrix (m))

V = fraksi volume (komposit (cl), penguat (f), matrix (m))

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

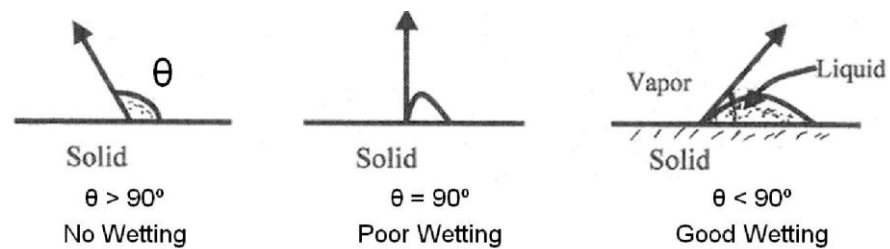
Universitas Indonesia

- Dalam material komposit, penguat dan matrix menghasilkan kombinasi sifat mekanik yang berbeda dengan sifat dasar dari masing-masing matriks maupun penguat karena adanya *interface* antara kedua komponen tersebut. *Interface* merupakan permukaan yang terbentuk diantara matriks dan penguat didalamnya yang berfungsi sebagai media transfer beban dari matriks dan penguat. Ikatan antara penguat dan matriks ini memiliki peran yang besar dalam penentuan sifat komposit. Semakin baik ikatan yang terbentuk (ditandai dengan semakin luasnya daerah permukaan kontak), maka semakin baik pula sifat akhir dari komposit yang terbentuk. Permukaan yang terbentuk tersebut akan mempengaruhi sifat-sifat dari komposit nantinya. Selain itu, diantara matriks dan penguat akan terbentuk fasa ketiga (*interphase*) yang memiliki sifat gabungan dari kedua fasa pembentuknya. Fase ketiga dapat terbentuk apabila ikatan *interface* terbentuk dengan baik, sehingga setiap komponen mampu berdifusi seperti terlihat pada Gambar 2.10.



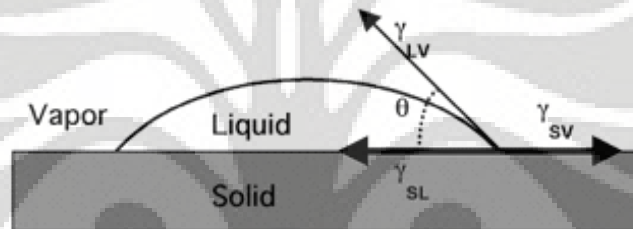
Gambar 2.10 Fenomena *Interface* dan *Interphase* pada Komposit [27]

- *Wettability*, adalah kemampuan suatu matriks untuk membasahi seluruh permukaan *reinforced* agar terjadinya suatu ikatan yang baik. Kemampubasahan dapat dilihat melalui sudut kontak (*contact angle*) dari pembasahan tersebut. Apabila sudut kontak di bawah 90° [25], maka kemampubasahan dari ikatan antarmuka tersebut baik, sedangkan pembasahan tidak akan terjadi apabila sudut kontak lebih dari 90° (memerlukan suatu *wetting agent*). Pembentukan sudut kontak dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Contact Angle yang terbentuk pada Komposit [27]

Pembasahan dipengaruhi oleh besar energi permukaan yang terbentuk. Agar dapat terjadi pembasahan yang baik, energi permukaan yang terjadi pada penguat harus lebih besar dari energi permukaan pada matriks. Energi permukaan ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Young – Dupré [29] :



$$W_A = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LV} \cos\theta + \gamma_{SL} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.7) ke dalam persamaan (2.8), maka didapat persamaan :

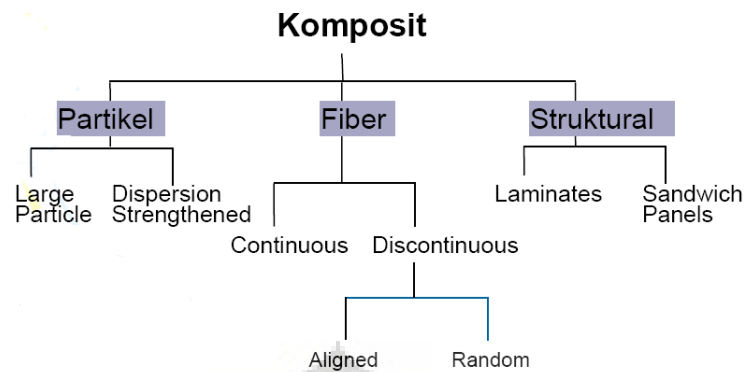
$$W_A = \gamma_{LV} (1 + \cos \theta) \dots\dots\dots (2.9)$$

Klasifikasi komposit dibedakan dalam jenis matrik dan bentuk bahan reinforcement. Berdasarkan jenis matriks yang digunakan, komposit dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu : *Metal Matriks Composit* (MMC), *Ceramic Matriks Composit* (CMC), *Polymer Matriks Composit* (PMC). Keuntungan dan kerugian dari masing-masing komposit dapat dilihat pada Tabel 2.6. Setiap jenis komposit yang telah disebutkan sebelumnya, memiliki keuntungan dan kerugian ketika digunakan pada suatu aplikasi tertentu. Maka dari itu, diperlukan proses pemilihan material komposit yang tepat.

Tabel 2.6 Berbagai Jenis Komposit beserta Keuntungan dan Kerugiannya [26]

Jenis Komposit	Keuntungan	Kerugian
<i>Metal Matriks Composit (MMC)</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Temperatur penggunaan tinggi – Kekuatan, dan kekakuan baik – Ketangguhan baik – Konduktivitas listrik baik – Konduktivitas panas baik – Dapat difabrikasi dengan metode konvensional 	<ul style="list-style-type: none"> – Bobot yang berat – Ketahanan korosi buruk – Biaya produksi mahal
<i>Ceramic Matriks Composit (CMC)</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Temperatur penggunaan sangat tinggi ($> 2000^{\circ}\text{C}$) – Densitas rendah – Elastis modulus besar 	<ul style="list-style-type: none"> – Kegetasan tinggi – Ketahanan terhadap <i>mechanical</i> buruk – Ketahanan terhadap <i>thermal shock</i> buruk
<i>Polymer Matriks Composit (PMC)</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Bobot ringan – Fabrikasi mudah – Ketangguhan baik – Bisa diproses dengan teknik pembuatan polimer konvensional 	<ul style="list-style-type: none"> – Temperatur penggunaan rendah – Sensitif terhadap lingkungan yang banyak mengandung air

Selain itu, komposit pula bisa diklasifikasikan berdasarkan bentuk dari penguat yang digunakan. Setiap jenis penguat yang digunakan akan mempengaruhi sifat akhir material komposit yang dihasilkan. Klasifikasi komposit tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.12.



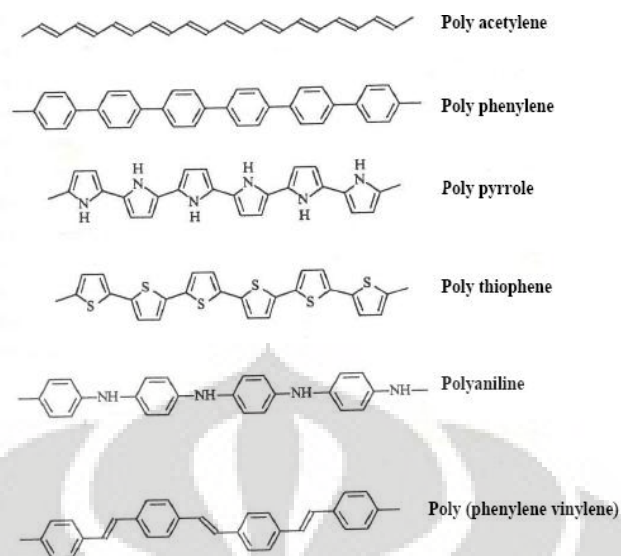
Gambar 2.12 Jenis Komposit berdasarkan Bentuk Penguat [27]

2.3.1 Polimer Konduktif

Polimer konduktif merupakan polimer organik yang dapat menyalurkan listrik atau dengan kata lain polimer yang memiliki konduktivitas listrik 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. Dalam penelitian ini menggunakan polimer konduktif elektron dengan tujuan agar dapat mentransfer elektron sehingga pelat bipolar yang dibuat dapat menghantarkan energi listrik dengan baik. Jenis dari polimer konduktif dapat dilihat pada Tabel 2.7 [22] dan strukturnya dapat dilihat pada Gambar 2.13.

Tabel 2.7 Jenis Polimer Konduktif Elektron [23]

Polimer	Konduktivitas ($\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$)	Stabilitas	Kemungkinan Pembuatan
<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



Gambar 2.13 Jenis Polimer Konduktif [23]

Polimer konduktif dapat menciptakan banyak keuntungan bila *diblend* dengan polimer lainnya. Dengan penambahan polimer konduktif, akan terbentuk lapisan film, yang dapat diaplikasikan sebagai sensor gas kimia dan peralatan mikroelektrik. Friksi yang terbentuk antara polimer konduktif dengan berbagai rantai alkil atau rantai siklik lainnya dapat meningkatkan kemampuprosesan Kopolimerisasi dari polimer konduktif dapat memberikan sifat optik yang baik dengan merendahkan jarak antar ikatan rantai. Polimer konduktif merupakan salah satu semikonduktor yang dapat digunakan sebagai alternatif untuk meningkatkan sifat konduktivitas listrik selain material semi konduktor anorganik, seperti silikon, bismuth arsenat, dll. Baterai yang dotambahkan polimer konduktif menunjukkan efisiensi yang baik dibandingkan deengan baterai biasa yang menggunakan asam timbal sulfur. Kuntungan lain dari penggunaan polimer konduktif adalah bobotnya yang ringan. Namun penggunaan polimer konduktif juga memiliki beberapa kerugian. Polimer konduktif merupakan campuran yang bersifat tidak stabil, bahkan pada temperatur yang tidak terlalu tinggi ($> 150^0$ C) dan sangat 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 menjasi lebih mahal dan tidak ekonomis.

Dengan adanya polimer konduktif didalam suatu komponen dasar, dapat merubah sifat dasar yang tidak konduktif menjadi konduktif. Nilai konduktif listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh bentuk, ukuran dan sifat dasar dari polimer konduktif yang digunakan. Selain itu, dapat dipengaruhi juga oleh pengaruh penambahan volume friksi bahan pengisi didalam suatu komponen (salah satunya material komposit) [8].

2.3.2 Komposit Polimer – Karbon Untuk Pelat Bipolar

Mereduksi berat dari pelat bipolar merupakan salah satu alternatif solusi yang bisa dilakukan untuk meningkatkan efisiensi PEMFC yang digunakan sebagai aplikasi *fuel cell* untuk menghasilkan energi listrik. Hal ini dikarenakan pelat bipolar itu sendiri mencakup sekitar 80% volume, 70% berat, dan 60% biaya dari harga *fuel cell* dari total berat PEMFC [8]. Maka dari itu, dibutuhkan suatu material yang lebih ringan dan dapat digunakan sebagai pelat bipolar. Salah satu material yang dikembangkan adalah komposit dengan polimer sebagai matriks dan grafit sebagai penguat. Komposit polimer – karbon memiliki biaya produksi yang murah dan memiliki perbandingan berat yang lebih ringan dibandingkan dengan baja, aluminium dan grafit. Penggunaan material komposit polimer-karbon sebagai pelat bipolar, harus memenuhi kriteria sebagai berikut [30] :

- Konduktivitas listrik yang tinggi (target DOE adalah 100 S/cm)
- Permeabilitas hidrogen harus sama atau dibawah dari jarak permabilitas membran
- Sifat mekanik yang baik pada saat kondisi temperatur operasi
- Stabilitas thermal baik
- Densitas rendah
- Stabilitas kimia pada saat gas reaktan mengalir yang mungkin berada dalam keadaan asam
- Ketahanan terhadap korosi baik
- Permeabilitas terhadap gas reaktan rendah (permeabilitas hidrogen $< 2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$)
- Fabrikasi mudah

Pemilihan material yang tepat, baik polimer sebagai matriks atau karbon sebagai penguat memiliki peranan penting karena sifat-sifat yang diinginkan sebagai pelat bipolar dapat dicapai. Matriks polimer yang bisa digunakan adalah polimer *thermoset* atau *thermoplastic* dan penguat yang bisa digunakan adalah grafit. Selain itu, didalam material komposit juga bisa ditambahkan bahan pengisi konduktif. Pada penelitian ini, akan digunakan *epoxy resin* sebagai matriks dan grafit sebagai penguat. Grafit yang digunakan merupakan grafit sintetis. Selain itu, ditambahkan bahan pengisi konduktif yaitu *carbon black* dan polimer konduktif *polyaniline*.

Komponen-komponen penyusun di dalam material komposit pelat bipolar memiliki fungsi dan peranan masing-masing terhadap sifat yang terbentuk pada pelat bipolar tersebut. Penggunaan material polimer *thermoset* sebagai matriks memberikan prospek yang cukup menjanjikan sebagai pelat bipolar di dalam PEMFC. Hal ini dikarenakan material tersebut memiliki stabilitas terhadap panas dan kimia yang dikombinasikan dengan kekuatan mekanis yang baik, serta stabilitas dimensi yang juga baik [31].

Namun yang menjadi keterbatasan dari penggunaan polimer *thermoset* adalah masih adanya kesulitan dalam proses fabrikasi untuk keperluan massal. Berbeda halnya dengan penggunaan polimer *thermoplastic* yang mudah diproduksi untuk keperluan massal.

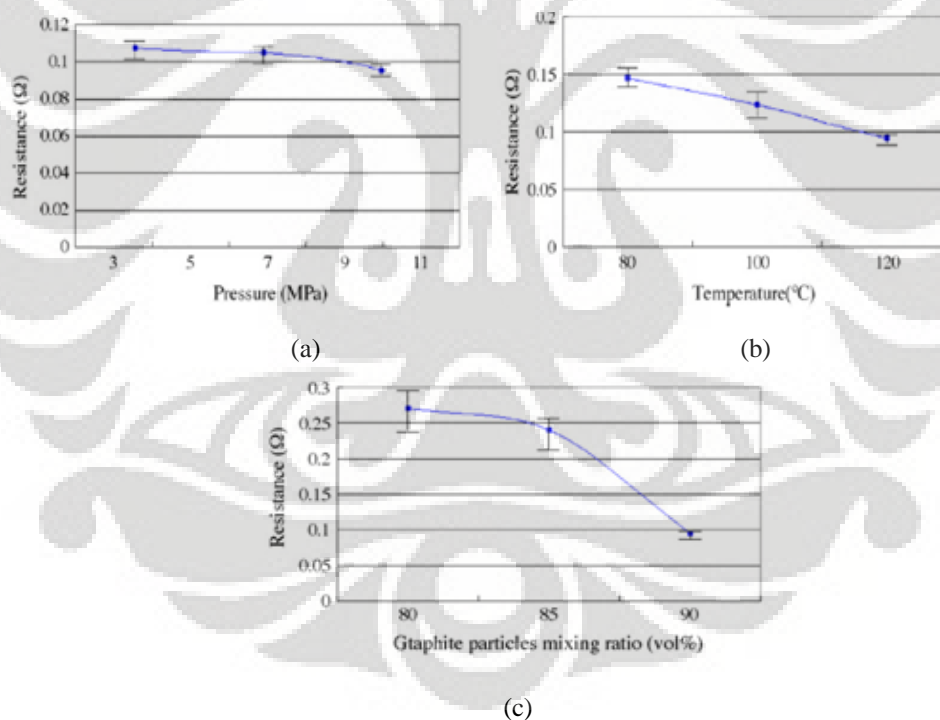
Penggunaan grafit sebagai penguat dan bahan pengisi konduktif bertujuan agar pelat bipolar yang dihasilkan memiliki sifat mekanis dan konduktivitas listrik yang baik pula. Hal ini dikarenakan, pelat bipolar dapat diaplikasikan di dalam *fuel cell* apabila memiliki sifat konduktivitas listrik dan mekanis yang baik. Konduktivitas listrik yang baik, berarti kemampuan pelat bipolar menghantarkan listrik baik, sedangkan dengan sifat mekanis yang baik, pelat bipolar akan mampu menahan pembebanan ketika *fuel cell* diaplikasikan.

Perbandingan dari polimer *thermoset* dan *thermoplastic* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Sifat dari Beberapa Matriks *Thermoplastic* dan *Thermoset* [26]

Sifat	<i>Epoxy</i>	<i>Thermosetting Polyamides</i>	PEEK	<i>Poly-anideimide</i>	<i>Poly-sulphone</i>	PPS
Densitas (gr cm ⁻³)	1,15 – 1,4	1,43 – 1,46	1,30	1,38	1,25	1,32
Modulus Elastis (GPa)	2,8 – 4,2	3,2				
Modulus Flexural (MPa)	15 – 35	35	40	50	28	40
Kekuatan Tarik (MPa)	35 – 130	55 – 120	92	95	75	70
Kekuatan Tekan (Mpa)	140	187				
CTE (10 ⁻⁵ °C)	4,5 – 11	5 – 9		6,3	9,4 – 10	9,9
Konduktivitas Panas (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,17 – 0,2	0,36				
Penyerapan Air (24 jam, %)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2	0,2
Tg (°C)	130 – 250	370				
Temperatur Aplikasi (°C)	25 – 85	260 - 300	330		175 – 190	260

Konduktivitas listrik yang baik merupakan faktor paling penting yang harus dimiliki oleh suatu pelat bipolar. Nilai dari konduktivitas dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti komponen penyusun yang digunakan pada material komposit, proses pencampuran dan variabel pada saat proses pencetakan pelat [32]. Proses pembuatan pelat bipolar dapat dilakukan dengan proses pencetakan melalui *compression molding* atau *injection molding*. Pemilihan parameter proses, yaitu tekanan dan temperatur juga memiliki peranan penting terhadap sifat yang dihasilkan, terutama sifat pelat bipolar dalam mengalirkan arus listrik. Diperlukan adanya pemilihan besar temperatur dan tekanan proses yang optimal untuk menghasilkan sifat konduktivitas listrik yang baik. Pada Gambar 2.14, dapat dilihat grafik pengaruh besat temperatur, tekanan proses dan perbandingan pencampuran grafit terhadap nilai resistivitas dari suatu pelat bipolar yang terbuat dari komposit *epoxy resin* dengan partikel grafit konduktif.



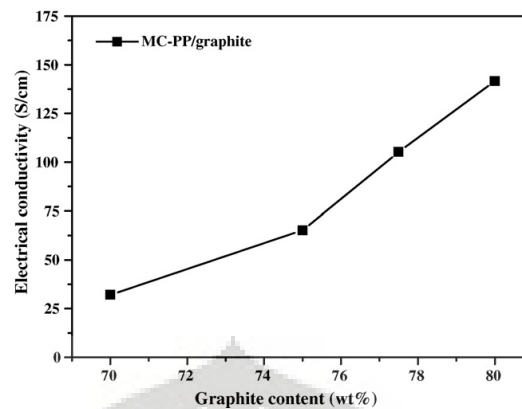
Gambar 2.14 Grafik Pengaruh Variabel Proses terhadap Resistivitas : Tekanan (a), Temperatur (b), dan Rasio Pencampuran (c) [32]

2.3.2.1 Grafit Sintetis

Grafit sintetis adalah salah satu bentuk modifikasi dari karbon yang menyerupai struktur dari intan dan merupakan produk yang dibuat dari material karbon amorf melalui proses perlakuan temperatur tinggi. Temperatur tinggi tersebut menyebabkan residu karbon pada grafik sintetis akan hilang. Material dasar dari grafit sintetis yang paling banyak digunakan adalah *petroleum coke*. Perbedaan *grade* pada grafik sintetis ditentukan dari orintasi kristal, jumlah *void*, ukuran dari *void*, derajat grafitisasi, ukuran dan distribusi dari partikel penyusunnya. Struktur kristal grafit adalah hexagonal yang tersusun atas atom karbon yang terbentuk dari kisi planar dengan ikatan kovalen dan antar lapisannya memiliki ikatan Van der Waals. Perbedaan jenis ikatan ini menciptakan derajat anisotropik pada grafit. Proses pembuatan grafit sintetis dilakukan dengan proses grafitikasi pada temperatur antara 2500 dan 3000⁰ C pada lingkungan atmosfer yang inert. Sedangkan grafit alami terbentuk akibat temperatur dan tekanan yang tinggi didalam perut bumi. Bila dibandingkan dengan grafit alam, grafit sintetis memiliki sifat mekanis yang lebih baik, kandungan *ash* yang lebih rendah dan lebih *uniform* [33].

Grafit sintetis digunakan sebagai bahan pengisi karena memiliki konduktifitas listrik dan panas yang baik, kekakuan dan sifat mekanis yang baik, serta memiliki sifat pelumasan yang baik tanpa harus adanya penambahan pelumasan dari luar akibat adanya perbedaan jenis ikatan didalam kisi planar dan antar lapisannya [27]. Karena strukturnya yang berlapis, grafit memberi sifat kekakuan dan dimensi yang stabil terhadap polimer.

Pada pelat bipolar berbasis polimer dengan penambahan grafit, dapat meningkatkan nilai konduktivitas. Grafit mampu menghantarkan arus listrik karena jumlah delokalisasi elektron yang sangat banyak di antara lapisan-lapisan karbon. Elektron valensi ini bebas untuk bergerak, jadi dapat menghantarkan arus listrik. Namun, listrik hanya dapat dihantarkan di dalam bidang *carbon layers* [34]. Pengaruh penambahan grafit terhadap nilai konduktivitas pada pelat bipolar dengan matriks polimer PP (*Poypropilene*) terlihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Grafik Pengaruh Penambahan Grafit terhadap Konduktivitas [35]

Sifat mekanis berupa kekuatan fleksural dan juga konduktivitas terhadap panas dan listrik pada pelat bipolar juga dipengaruhi oleh bentuk ukuran partikel dari grafit yang digunakan [36]. Sifat elektrik dari material komposit melibatkan kontak antara serbuk elektrik psddead material yang menghasilkan pembentukan aliran listrik. Dengan adanya penurunan ukuran partikel dan perluasan distribusi dari permukaan material, maka sifat konduktivitas listrik dan panasnya pun akan menurun. Sedangkan arah orientasi dari partikel grafit juga mempengaruhi sifat mekanis dan sifat konduktivitasnya. Arah orientasi partikel yang tegak lurus terhadap arah penekanan pada saat pencetakan, akan memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan dengan arah orientasi yang sejajar dengan arah penekanan. Selain itu, bila dibandingkan dengan grafit yang berbentuk *flake*, penyebaran tegangan pada grafit yang berbentuk partikel lebih merata, dan regangan yang terjadi juga lebih kecil. Sehingga kekuatan fleksuralnya lebih baik bila dibandingkan dengan grafit berbentuk *flake*. Tabel 2.9 merupakan pengaruh dari ukuran, bentuk, dan arah orientasi partikel grafit terhadap nilai konduktivitas listrik, konduktivitas panas, dan kekuatan fleksural pada pelat bipolar.

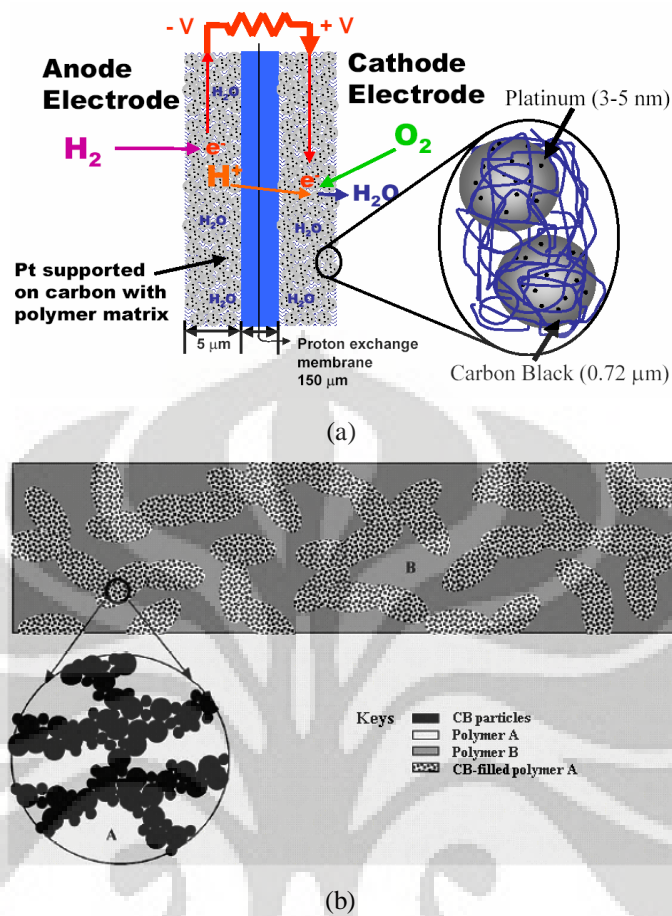
Tabel 2.9 Pengaruh Bentuk dan Ukuran Grafit terhadap Beberapa Sifat Fisik dan Mekanik [36]

Sample	Particle size	Direction	Bulk electrical conductivity (S/cm)	Thermometric conductivity [W/(m ² 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
Flake-like graphite	250-325 mesh	⊥	326.9	61.4	35.0
		//	76.0	20.3	
	-325 mesh	⊥	566.5	113.0	39.8
		//	45.8	13.0	
		⊥	420.3	105.5	

2.3.2.2 Carbon Black

Carbon black merupakan padatan karbon amorf yang dibentuk dengan proses deposisi dari parikel padat dalam fasa gas dan merupakan hasil pembakaran tidak sempurna dari minyak bumi yang memiliki perbandingan luar permukaan dengan volume yang tinggi [37]. *Carbon black* dapat bersifat karsinogenik terhadap tubuh manusia, dimana ia dapat mengganggu jaringan pernafasan apabila debu terkumpul dalam konsentrasi tinggi. Terdapat lima jenis *carbon black* yang sering digunakan, yaitu *furnace black*, *thermal black*, *lamp black*, *channel black* dan *acetylene black*. Perbedaan jenis ini disebabkan oleh perbedaan proses produksi *carbon black* yang digunakan. Hampir 90% produksi *cabon black* dihasilkan melalui *furnace*, dimana minyak dikomposisi menjadi partikel *carbon black*.

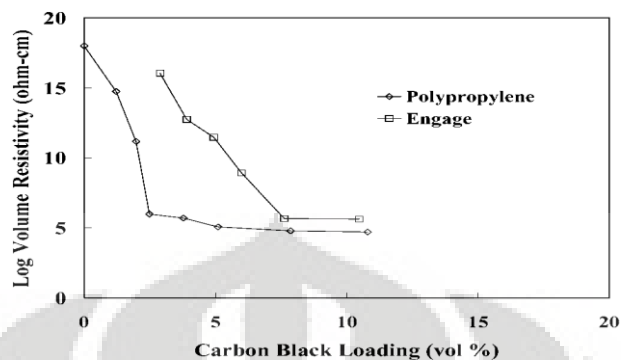
Penggunaan *carbon black* secara umum adalah sebagai bahan pengisi yang bertujuan untuk meningkatkan stabilitas dimensi, menaikkan konduktivitas, penstabil terhadap radiasi sinar ultraviolet, sebagai zat antioksidan untuk meningkatkan umur pakai dari suatu polimer, dan sebagai pigmen pewarna. Struktur karbon mirip dengan struktur grafit yang acak. Ikatan antar atom didalam strukturnya dibentuk oleh ikatan van der walls. Dimana, setiap atom karbon dan radikal bebas bereaksi membentuk suatu lapisan dan tersusun menjadi struktur kristal heksagonal. Ikatan yang terbentuk pada *carbon black* dapat dilihat pada Gambar 2.16.



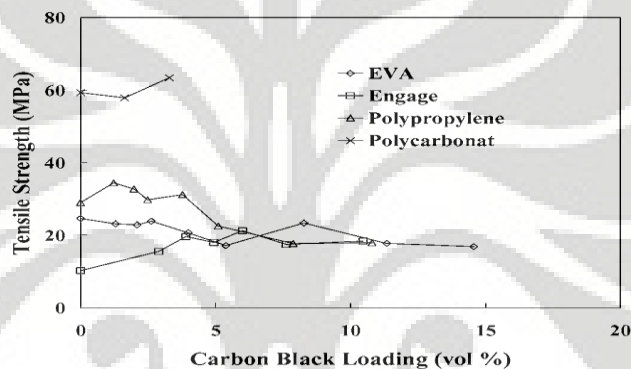
Gambar 2.16 Carbon Black pada : Elektroda (a), Polimer (b) [15.18]

Penambahan *carbon black* pada polimer dapat menciptakan sebuah material komposit yang memiliki kekuatan dan memiliki konduktivitas listrik yang baik. Nilai konduktivitas yang baik dapat dicapai ketika jalur konduktif terbentuk pada saat konsentrasi kritis dari bahan pengisi konduktif yang ditambahkan (dalam hal ini *carbon black*). Daerah ini dikenal dengan daerah *percolation threshold*. Daerah ini ditentukan oleh interaksi antara polimer dengan *carbon black*, dan viskositas beserta kristalinitas dari polimer. *Percolation threshold* ini ditentukan oleh keseimbangan interaksi diantara bahan pengisi dan bahan pengisi, dan interaksi antara bahan pengisi dan polimer. Apabila interaksi antara bahan pengisi dan bahan pengisi lebih kuat, bahan pengisi yang ditambahkan akan tetap teragregasi dan sulit untuk terdispersi didalam polimer. Apabila interaksi antara bahan pengisi dan polimer lebih kuat, maka bahan pengisi akan terdispersi dan terpisah dari bahan pengikat dan membentuk jalur konduktif hingga

penambahan konsentrasi bahan pengisi yang ditambahkan, sehingga konduktivitas meningkat dengan resistivitas menurun, yang terlihat pada Gambar 2.17.



(a)



(b)

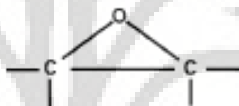
Gambar 2.17 Grafik Pengaruh Penambahan *Carbon Black* terhadap : Resistivitas (a), Kekuatan Tarik (b) [38]

Carbon black dengan luas permukaan yang tinggi dapat mengumpulkan arus listrik pada konsentrasi yang lebih rendah dan membentuk jaringan karbon konduktif. Namun, struktur *carbon black* yang berporos dapat mengurangi sifat mekanis dari komposit, sehingga pembebanan yang dapat diterima material komposit menjadi terbatas.

2.3.2.3 Epoxy Resin

Epoxy resin merupakan senyawa molekular organik berupa cairan dengan bobot rendah yang mengandung sejumlah grup epoksi, yang secara sederhana disusun oleh dua atom karbon dan satu atom oksigen yang termasuk kedalam jenis *thermoset*. Struktur dasar dari *epoxy resin* terlihat pada Gambar 2.18. Secara umum, polimer jenis *thermoset* terdiri dari dua penyusun, yaitu susunan resin dan *curing agent*. Epoxy dapat direaksikan dengan hardener agar menghasilkan reaksi

curing dan menjadi *hard* polimer, yang mempunyai fungsi utama untuk membasahi seluruh permukaan grafit (*reinforce*) agar terjadi ikatan *interface* yang baik. Reaksi *curing* ini dapat meningkatkan performa dari *epoxy* itu sendiri, yaitu dapat meningkatkan titik luluh, kekakuan, dan ketahanan terhadap pelarut. *Curing agent* yang digunakan pada golongan *epoxy* dapat berupa reaktan atau katalis yang memicu terjadinya ikatan jaring silang. Tipe pertama dari *curing agent* dapat berupa golongan basa (primer atau sekunder golongan amin) atau golongan asam (*polyphenols*, *polymeric thiols*). Berdasarkan sifat asam atau basanya, proses *curing* dapat terjadi pada temperatur ruang atau temperatur tinggi. *Curing agent* berupa katalis (seperti tersier amin dan BF_3 kompleks) dapat mempercepat reaksi *curing* pada temperatur yang lebih rendah.

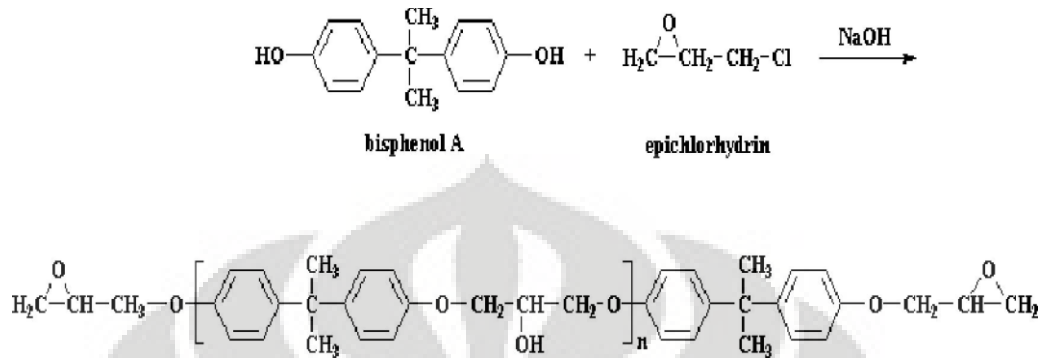


Gambar 2.18 Struktur Dasar *Epoxy* [26]

Penggunaan polimer tidak hanya berfungsi sebagai pengikat pada pembuatan pelat bipolar, tapi ia juga menjadi salah satu faktor utama yang mempengaruhi performa dari pelat bipolar tersebut, seperti konduktifitas listrik, kekuatan dan sebagainya. Pemilihan *epoxy resin* pada material komposit didasarkan pada kondisi aplikasi yang diinginkan. Hal ini dikarenakan penggunaan golongan epoksi menyebabkan terdapat perbedaan yang signifikan antara sifat thermal dan sifat mekanisnya. Dengan temperatur operasi yang tinggi, sifat mekanis cenderung untuk getas, sedangkan temperatur operasi yang rendah dapat meningkatkan ketangguhan.

Epoxy resin adalah jenis polimer yang dapat meningkatkan konduktivitas listrik. Polimer dengan kelompok polar yang terdapat pada konfigurasi molekuler dapat dengan tepat digunakan sebagai pengikat. Penambahan *epoxy resin* pada kelompok polar, seperti OH^- dapat meningkatkan konduktifitas listrik pada pelat bipolar. Selain itu, penambahan *epoxy resin* memberikan daya tarik menarik yang sangat baik pada permukaan grafit, sehingga sifat mekanis dari pelat bipolar dengan penguat grafit dapat meningkat.

Epoxy resin yang paling umum digunakan adalah hasil reaksi antara epichlorhydrin dan bisphenol A. Reaksi yang terjadi didalam pembuatan sebuah *epoxy resin* dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Proses Pembuatan *Epoxy Resin* [39]

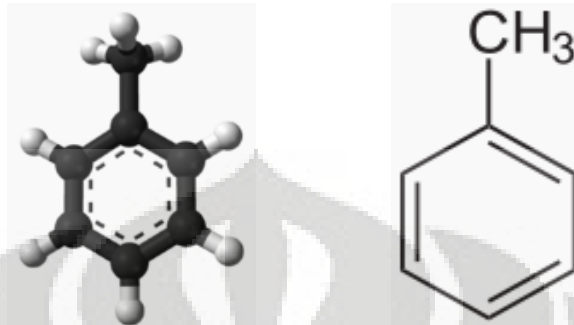
Berbagai keunggulan dan kekurangan polimer jenis resin epoxy ini dapat dilihat dibawah ini [26] :

- Mampu mengikat dengan gaya adhesi antara karbon dengan resin secara baik.
- Kemungkinan terjadinya penyusutan selama polimerisasi sangat kecil.
- Ketahanan terhadap reaksi kimia sangat baik.
- Kekuatan tinggi dan fleksibilitas yang rendah.
- Ketahanan terhadap creep dan fatigue bagus.
- Sifat elektrikalnya baik
- Berbahaya karena mengandung racun kimia
- Daya penyerapan terhadap air sangat tinggi
- Sulit untuk menggabungkan antara kekuatan dan ketahanan terhadap suhu tinggi
- Polimerisasinya lambat

2.3.2.4 Toulene

Toluene juga dikenal dengan nama *methylbenzene* atau *toluol*, yang merupakan suatu cairan pelarut dan termasuk golongan hidrokarbon aromatik. *Toluene* kebanyakan digunakan pada aplikasi industri sebagai pelarut. Didalam

material komposit, *toluene* digunakan sebagai pelarut *polyaniline* dan *epoxy resin* sehingga *polyaniline* dan *epoxy resin* saling berikatan. Sehingga akan terjadi peningkatan konduktivitas dari *epoxy resin*.



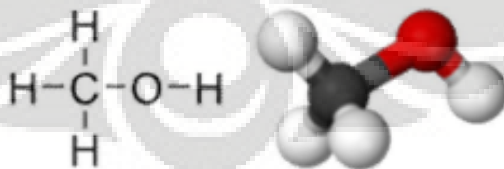
Gambar 2.20 Struktur *Toluene* [37]

2.3.2.5 Metanol

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



Metanol digunakan sebagai pelarut dan pengencer untuk *epoxy resin* (yang awalnya sangat kental), agar dapat bercampur dengan grafit sehingga pembasahan permukaan grafit bisa lebih baik dan menjangkau area yang lebih luas.

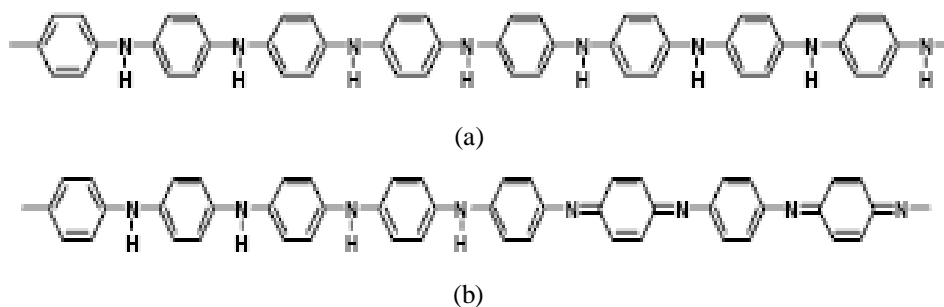


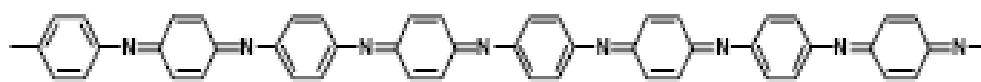
Gambar 2.21 Struktur Metanol [37]

2.3.2.6 Polyaniline

Polyaniline adalah jenis polimer berbasis *phenylene* yang memiliki sflleksibilitas kimia dari grup –NH– pada rantai polimer yang berikatan pada *phenylene ring*. Polimer ini sudah diketahui sejak tahun 1862 yang lebih dikenal dengan nama *aniline black*. *Polynailine* memiliki bebrapa kelebihan diantara jenis polimer konduktif lainnya [40], seperti : jenis monomer yang mudah didapat dan harganya tidak mahal, mudah untuk disentetis, kestabilan terhadap lingkungan yang baik, proses konversi dari monomer menjadi polimer terjadi dengan cepat, sifat mekanik dari proses polimerisasi menghasilkan kekuatan luluh yang tinggi, relatif menunjukkan konduktivitas listrik yang tinggi, merupakan jenis polimer konduktif dimana nilai konduktivitas listriknya dapat diatur dengan mengontrol oksidasi dan protonisasi pada saat proses pembuatannya.

Polyaniline sebagai salah satu jenis polimer konduktif, dapat mengkonduktifkan polimer dalam keadaan oksidasinya. Reaksi tersebut dapat terjadi secara elektrokimia atau kimiawi. Reaksi yang terjadi biasanya dipicu dalam keadaan media asam dengan zat kimia sebagai *oxidizing agent* seperti *ammoniumpersulfate*. Perbedaan bentuk oksidasi ini, yang membedakan jenis dari *polyaniline*. Perubahan bentuk dari keadaan reduksi hingga keadaan oksidasi sepenuhnya menentukan jenis dari *polyaniline*. Keadaan dimana *polyaniline* mengalami reduksi sepenuhnya dinamakan dengan *leucoemeraldine*, dan keadaan dimana reaksi oksidasi yang terjadi sepenuhnya dikenal dengan *pernigraniline*. Tidak seperti jenis polimer konduktif lainnya, *polyaniline* bersifat konduktif ketika berada dalam kondisi tidak sepenuhnya oksidasi, yang biasa disebut dengan *emeraldine*. Dimana pada keadaan ini, terdapat ion proton dari asam ketika proses polimerisasi, tanpa ada elektron yang masuk atau keluar dari material ketika dikonduktifkan. Struktur dari *polyaniline* dapat dilihat pada Gambar 2.22.

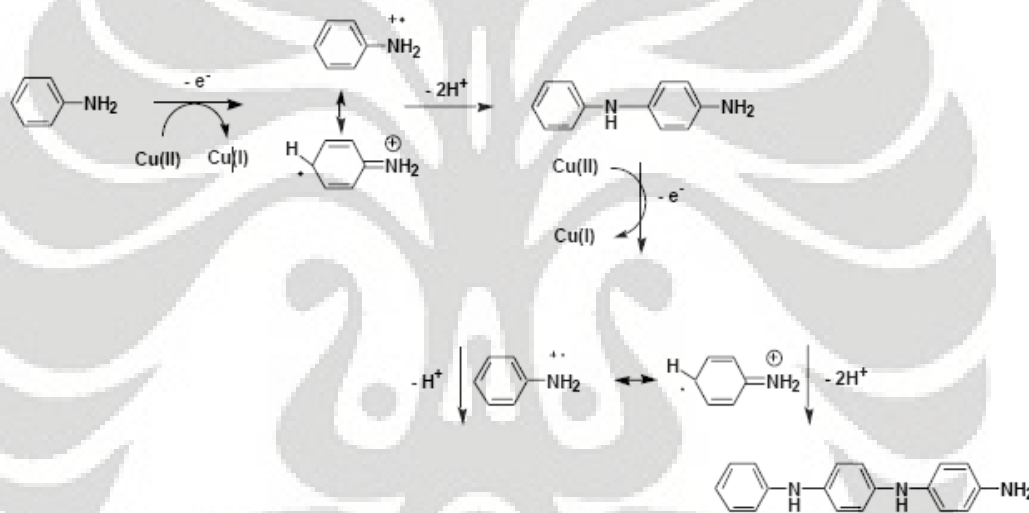




(c)

Gambar 2.22 Jenis Polyaniline : *Leucoemeraldine* (a), *Emeraldine* (b), *Pernigraniline* (c) [42]

Perbedaan bentuk oksidasi dari *polyaniline* juga bisa dilakukan dengan memberikan doping berupa zat oksidan, seperti iodin. Namun metode ini, menghasilkan bentuk oksidasi *polyaniline* yang memiliki konduktivitas listrik yang lebih rendah bila dibandingkan dengan metode pemberian doping proton dari suatu zat asam. Proses oksidasi dari pembentukna *polyaniline* dapat dilihat pada Gambar 2.23.



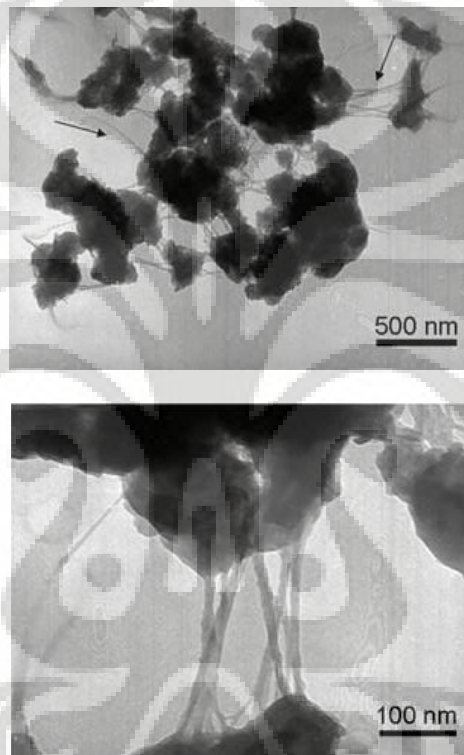
Gambar 2.23 Proses Oksidasi *Polyaniline* [42]

Konduktivitas dari polyanilin dipengaruhi oleh kandungan air. Apabila sampel polyanilin berada dalam keadaan kering, maka konduktivitasnya akan jauh (lima kali) lebih rendah daripada sampel yang mengandung air.

Pada material komposit pelat bipolar yang menggunakan *epoxy resin* sebagai matriks polimer, dengan adanya penambahan PANI yang telah didoping, dapat meningkatkan konduktivitas listrik dari *epoxy* secara signifikan. Perbedaan nilai konduktivitas listrik dari *epoxy resin* tanpa adanya penambahan PANI dapat meningkat sebanyak 10 kali lipat ketika diberikan penambahan PANI [41]. Perubahan konduktivitas secara signifikan ini akan terhalang oleh keadaan asam

dengan pH yang tinggi ($\text{pH} > 9,5$). Pada keadaan asam tersebut, sifat dari polimer akan menjadi insulasi listrik yang tinggi, sehingga menyebabkan nilai konduktivitas listriknya akan menurun.

Bila dilakukan pengamatan dengan menggunakan mikroskop elektron, *polyaniline* berbentuk serbuk menyerupai bentuk gumpalan, dimana setiap serbuk dihubungkan oleh serat penghubung. Gambar 2.29 merupakan hasil pengamatan dari *polyaniline* yang berbentuk serbuk.

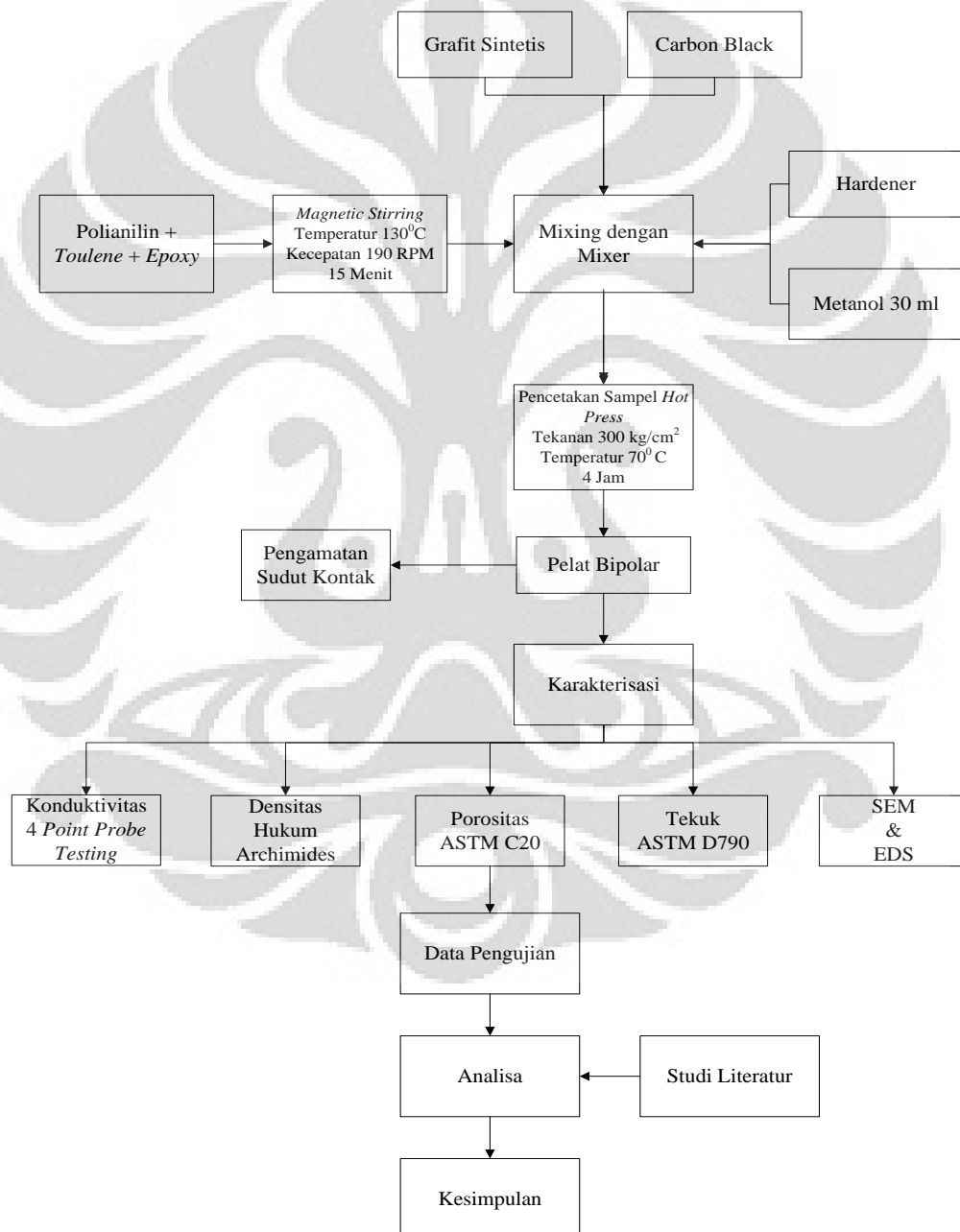


Gambar 2.29 Pengamatan TEM dari Serbuk *Polyaniline* [42]

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini adalah diagram alir penelitian secara umum yang akan dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan polimer konduktif polianilin terhadap karakteristik pelat bipolar komposit yang berbasis grafit sintetis :



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 :

– Peralatan Preparasi Sampel

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

- Sarung Tangan
- Gergaji
- *Beaker Glass*
- *Mixer*
- Spatula
- Pipet volum
- Gelas ukur
- Termometer
- *Hot Plate*
- Timbangan Digital
- Cetakan Pelat ukuran 15 cm x 15 cm
- Kertas Amplas 100#, 240#, 320#, dan 1200#
- Jangka Sorong
- *Hydraulic Hot Pressure Machine*

– Peralatan Pengujian Karakterisasi

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

- *Conductivity Four Point Probe Test Machine*
- *Oven*
- *Universal Testing Machine*
- *Dryer*
- *Scanning Electron Microscope*
- *Ultrasonic Cleaner*

3.2.2 Bahan

Pada penelitian ini, digunakan material komposit untuk membuat pelat bipolar. Material komposit menggunakan polimer sebagai matriks dan karbon sebagai penguat. Polimer yang digunakan sebagai matriks adalah *epoxy resin*, sedangkan karbon yang digunakan sebagai penguat adalah grafit sintetis dan *carbon black*. Selain itu digunakan polimer konduktif yaitu polianilin untuk meningkatkan konduktivitas dari pelat bipolar tersebut. Sebagai pengencer *epoxy resin* digunakan metanol dan *toluene* untuk polianilin. Unsur-unsur tersebut juga berfungsi sebagai pembasah material komposit untuk membentuk *interface* yang baik. Komposisi dari masing-masing bahan penyusun sampel tergantung pada variabel yang digunakan dengan beral total per sampel sebesar 180 gram.

3.2.2.1 Epoxy Resin

Polimer termoset yang digunakan sebagai matriks *binder* adalah epoxy resin dengan merek dagang *Eposchon (Bhispenol A-epichlorohydrin)*. Polimer *epoxy* yang digunakan memerlukan sebuah *coupling agent* sebagai stimulant terjadinya proses polimerisasi dengan baik pada suhu ruang. Oleh karena itu digunakan *hardener* dengan merek dagang *Eposchon (polyaminoamide)*. Perbandingan penambahan antara *epoxy* dan *hardener* yang ditambahkan adalah sebanyak 1 : 1.

3.2.2.2 Metanol

Dalam penelitian ini menggunakan methanol teknis dengan merek dagang Brastaco. Penggunaan methanol berfungsi sebagai pengencer polimer *epoxy* pada saat pencampuran bahan-bahan pelat bipolar.

3.2.2.3 Toluene

Untuk proses polimer *blend* didalam peneliian, dibutuhkan suatu pelarut dari polimer konduktif, yaitu *toluene* untuk melarutkan *polyaniline* sebagai polimer konduktif agar dapat terdispersi dengan baik kedalam matriks polimer *epoxy resin* yang digunakan.

3.2.2.4 Grafit Sintetis

Dalam penelitian ini menggunakan grafit aktif dengan merek dagang Merck yang memiliki ukuran partikel <50 mikron. Grafit ini memiliki nilai konduktivitas listrik yang sangat baik dibanding *carbon black* yang digunakan pada penelitian ini sehingga grafit sintetis ini merupakan jumlah yang paling dominan. Jumlah grafit sintetis yang ditambahkan akan semakin berkurang sejalan dengan bertambahnya jumlah polimer konduktif yang digunakan.

3.2.2.5 Carbon Black

Pada penelitian ini carbon black yang dipakai dihasilkan dari karbon arang buatan tangan sendiri dengan struktur amorf yang berfungsi sebagai katalis grafit konduktif aktif. *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.

3.2.2.6 Polyaniline

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.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Preparasi Sampel

3.3.1.1 Penimbangan

Komponen-komponen penyusun material komposit yang akan digunakan didalam penelitian ditimbang dengan menggunakan timbangan digital dengan kepresisian yang cukup baik. Setiap bahan yang digunakan ditimbang sesuai dengan komposisi yang telah ditentukan sebelumnya dengan variabel berupa penambahan

polimer konduktif *polyaniline* untuk menghasilkan suatu komposit pelat bipolar. Perbandingan yang digunakan adalah 20% matriks dan 80% penguat grafit dan polimer konduktif sebagai perbandingan terbaik dari matriks polimer dan penguat grafik [46]. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik dari pelata bipolar yang terbaik. Berikut adalah komposisi bahan yang digunakan didalam penelitian :

Tabel 3.1 Komposisi Pelat Bipolar

Grafit + <i>Filler Carbon Black</i> + Polimer Konduktif (80%)			Polimer (Matriks PMC) (20%)	
144 gram			36 gram	
Grafit Sintetis	<i>Carbon Black</i> (5%)	<i>Polyaniline</i> (Variabel)	<i>Resin</i>	<i>Hardener</i>
136,75 gram	7,2 gram	50 mg	18 gram	18 gram
136,7 gram		100 mg		
136,65 gram		150 mg		
136 gram		200 mg		

3.3.1.2 Pencampuran (*Mixing*)

Proses selanjutnya yang dilakukan setelah dilakukan penimbangan adalah proses pencampuran (*mixing*) dari bahan-bahan yang telah ditimbang sebelumnya. Tahap ini merupakan tahap yang paling penting karena menentukan karakteristik akhir dari pelat bipolar yang dihasilkan. Diharapkan dengan proses pencampuran yang baik, komponen-komponen penyusun material komposit dapat terdistribusi secara merata pada setiap bagian dari pelat bipolar yang dihasilkan. Masing-masing komponen dicampur dengan menggunakan *mixer* hingga terbentuk suatu adonan yang homogen.

Polyaniline sebagai polimer konduktif perlu dilakukan proses *blending* dengan *epoxy resin* terlebih dahulu. Hal ini dilakukan agar struktur dari *polyaniline* terdispersi kedalam struktur *epoxy resin* sebagai matriks komposit pelat bipolar. Proses *blending* dilakukan pada *magnetic hot stirring* dengan temperatur 130⁰ C antara *epoxy* dan *polyaniline* yang telah dilarutkan dengan menggunakan *toluene* [43]. Dengan adanya

proses *blending* yang baik, diharapkan *polyaniline* sebagai polimer konduktif dapat mengkonduktifkan *epoxy* sebagai material polimer. Setelah itu, akan dicampur dengan komponen lain yaitu, metanol, grafit sintetis, *carbon black* dan *hardener* menggunakan *mixer*. Adonan yang baik ditandai dengan butir-butir halus dan menggumpal. Adonan juga tidak boleh terlalu kering ataupun terlalu basah karena dapat menyebabkan kegagalan atau keretakan di dalam pelat bipolar yang akan dibuat.

Prosedur proses pencampuran yang dilakukan didalam penelitian adalah :

- Proses *Blending*
 - Siapkan bahan-bahan yang dibutuhkan untuk membuat pelat bipolar dan telah ditimbang sesuai dengan komposisi yang telah ditentukan sebelumnya
 - Nyalakan mesin *hot plate magnetic stirring* dengan menekan tombol *switch power* dan atur temperatur mesin pada temperatur 130⁰ C dengan kecepatan *stirring* sebesar 195 RPM
 - Siapkan *toluene* 35 ml kedalam gelas ukur dan pindahkan kedalam *beaker glass* dan masukkan serbuk *polyaniline* ke dalam *beaker glass* yang berisi *toluene*
 - Siapkan metanol sebanyak 35 ml ke dalam gelas ukur dan tuangkan metanol kedalam gelas ukur yang telah berisi *epoxy* dan aduk hingga larut sepenuhnya
 - Campurkan kedua komponen tersebut ke dalam *beaker glass*
 - Masukkan magnet kedalam *beaker glass* dan taruh diatas mesin *hot plate magnetic stirring*
 - Biarkan proses berlangsung selama 15 menit



Gambar 3.2 Proses *Polymer Blending*

- Proses Pencampuran (*Mixing*)
 - Setting mesin *hot plate magnetic stirring* pada temperatur 100° C tanpa ada putaran (*stirring*)
 - Masukkan larutan polimer konduktif dan *epoxy* yang telah *diblend* kedalam beaker glass yang berisi grafit sintetis dan *carbon black*
 - *Mixing* dengan menggunakan *mixer* selama 5 menit
 - Siapkan metanol sebanyak 35 ml ke dalam gelas ukur
 - Masukkan metanol ke dalam *beaker glass* dan lakukan kembali proses *mixing* selama 5 menit
 - Masukkan *hardener* ke dalam *beaker glass* dan *mixing* selama 5 menit
 - Setelah semua komponen tercampur dengan baik, lakukan proses *mixing* diatas mesin *hot plate magnetic stirring* selama 15 menit atau hingga adonan yang dihasilkan tidak terlalu kering atau basah ketika disentuh



Gambar 3.3 Hasil Proses *Mixing*

3.3.1.3 Pencetakan Sampel

Sampel pelat bipolar yang akan dibuat didalam penelitian dicetak dengan menggunakan cetakan yang terbuat dari baja tahan karat dengan ukuran 15 x 15 cm. Adonan yang telah dicampur pada proses sebelumnya, dimasukkan kedalam cetakan hingga seluruh bagian cetakan terisi dengan adonan. Adonan tersebut harus terdistribusi secara merata pada setiap permukaan cetakan agar terbentuk sampel yang merata dan mencegah adanya bagian tertentu yang tidak terisi. Sampel dicetak dengan menggunakan mesin *hot press* dengan kondisi temperatur dan tekanan yang dapat

diatur. Cetakan akan ditekan dengan pembebanan hidrolik agar adonan yang dimasukkan kedalam sampel menjadi padat dan akan menyatu ketika dilakukan proses pemanasan. Tekanan yang diberikan adalah sebesar 300 Kg/cm^3 dengan temperatur sebesar $70 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 4 jam dan didiamkan selama 12 jam. Waktu proses dan waktu diam ini merupakan faktor penting terhadap baik tidaknya pelat bipolar yang dihasilkan. Apabila waktu proses tidak sesuai, pelat bipolar akan mengalami perubahan dimensi berupa ketebalan yang tidak merata dan pelengkungan yang nantinya akan menyulitkan didalam preparasi sampel untuk pengujian karakteristik yang akan dilakukan.



Gambar 3.4 Proses Pencetakan

Prosedur proses pencampuran yang dilakukan didalam penelitian adalah :

- Bersihkan cetakan baja tahan karat yang akan digunakan dari kotoran yang menempel dan lumuri dengan oli secara merata pada setiap bagian cetakan
- Masukkan adonan hasil pencampuran ke dalam cetakan hingga merata
- Tutup cetakan dan masukkan ke dalam mesin *hot press*
- Atur tekanan mesin di indikator tekanan hingga 300 Kg/cm^3 dan temperatur sebesar $70 \text{ }^\circ\text{C}$
- Diamkan mesin bekerja selama 4 jam
- Matikan mesin dan *release* tekanan yang diberikan sebelumnya
- Diamkan sampel di dalam cetakan pada temperatur kamar selama 12 jam dan setelah itu buka sampel dari cetakan

3.3.1.4 Pengamatan Sudut Kontak

Pengamatan sudut kontak dilakukan untuk mengetahui pembasahan yang terjadi. Semakin kecil sudut kontak yang terbentuk (kurang dari 90°), maka semakin baik

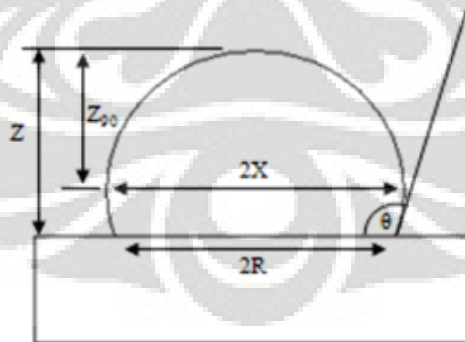
pembasahannya. Pembasahan disini adalah kemampuan matriks *epoxy resin* untuk membasahi seluruh permukaan dari grafit yang digunakan sebagai komponen penyusun material komposit untuk pelat bipolar yang digunakan didalam penelitian. Sudut kontak yang terbentuk tersebut, dapat dijadikan ssebagai suatu parameter baik atau tidaknya *interface* yang terjadi antara matriks dan penguat. Semakin kecil sudut kontak yang terbentuk, maka semakin baik *interface* yang terbentuk, dan semakin baik pula sifat dari pelat bipolar yang dihasilkan.

Prosedur pengamatan sudut kontak yang dilakukan didalam penelitian adalah :

- Siapkan *epoxy* dan *hardener* dengan perbandingan 1 : 1 sesuai dengan jumlah yang ditambahkan untuk membuat pelat bipolar
- Masukkan kedalam *beaker glass* dan aduk
- Siapkan pelat bipolar dengan masing-masing penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg, 100 mg, 150 mg dan 200 mg.
- Teteskan *epoxy* dan *hardener* yang telah diaduk ke atas pelat bipolar
- Amati sudut kontak yang terbentuk antara *epoxy resin* dan pelat bipolar

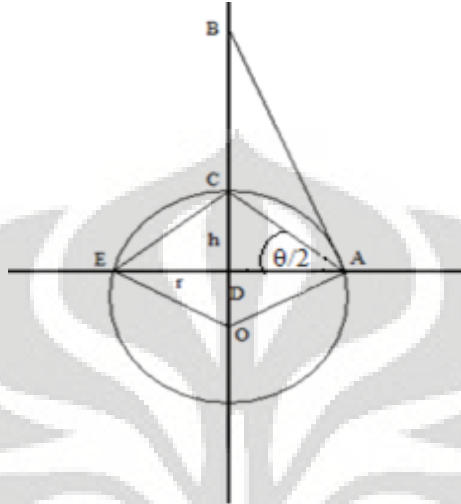
Besarnya sudut kontak yang dihasilkan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [47] sebagai berikut :

- $\theta > 90^0$ (tidak ada pembasahan)



Nilai θ dapat dilihat dengan menggunakan tabel Bashforth dan Adams (terdapat pada lampiran), dengan menghitung perbandingan R/b dan Z/b untuk menentukan nilai b (radius kurva). Sudut yang dihasilkan melebihi 90^0 .

- $\theta < 90^\circ$ (terdapat pembasahan)



→ Pada ΔOAE :

$OE = OA$ (memiliki radius yang sama)

$OD \perp AE$

$DE = DA$

→ Pada ΔCEA :

$DE = DA$

$EA \perp CD$

$CE = CA$

$\angle CED = \angle CAD$

→ Menurut sifat dari garis tangensial $\angle CED = \angle CAD$

$\angle CAB = \angle CAD$

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

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

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

3.3.1.5 Pembuatan Spesimen Uji

Pembuatan spesimen uji disesuaikan dengan standar ASTM yang dipakai pada pengujian masing-masing karakterisasi yang akan dilakukan. Sampel pelat bipolar hasil

pencetakan akan dipotong sesuai dengan dimensi benda uji yang akan dilakukan. Untuk uji konduktivitas, uji densitas dan uji porositas menggunakan sampel dan ukuran yang sama, yaitu sebesar 2 x 2 cm, sedangkan untuk pengujian fleksural menggunakan sampel yang berbeda, yaitu sebesar 12 x 1,5 x 0,3 cm.

3.3.2 Pengujian Karakteristik Material

3.3.2.1 Pengukuran Densitas

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui massa jenis atau densitas dari pelat bipolar yang dihasilkan. Densitas memiliki peranan yang penting untuk pelat bipolar karena semakin besar densitas, maka semakin berat bobot pelat bipolar tersebut. Hal ini menyebabkan kurangnya efisiensi yang dihasilkan akibat bobot yang berlebih. Pengujian akan dilakukan berdasarkan ASTM D 792 (*Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*). Proses pengukuran akan dilakukan dengan prinsip perbandingan massa sampel di udara dengan massa sampel di dalam air. Semakin besar perbandingannya, maka semakin besar pula densitas dari sampel pelat bipolar yang dihitung.

Prosedur pengukuran densitas yang dilakukan didalam penelitian adalah :

- Timbang massa sampel di udara dengan timbangan digital (A)
- Siapkan *beaker glass* berisi air dan sebuah gantungan penimbang
- Timbang massa sampel didalam air pada gantungan penimbang dengan timbangan digital (B)

Dari kedua hasil penimbangan tersebut, maka kerapatan massa sampel bisa diperoleh dengan menggunakan persamaan:

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

dimana, $\rho = \text{bulk density (gr/cm}^3\text{)}$

A = massa sampel kering (gr)

B = massa sampel tergantung dalam air (gr)

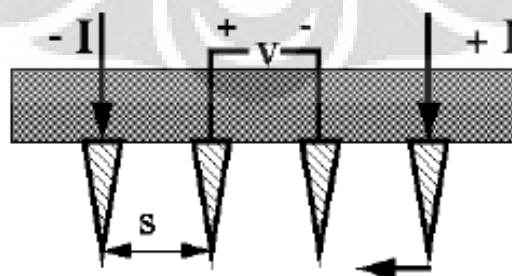
$\rho \text{ air} = \text{rapat massa air (0,9775 gr/cm}^3\text{)}$



Gambar 3.5 Penimbangan Massa di dalam Air

3.3.2.2 Pengujian Konduktivitas Listrik

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui konduktivitas listrik dari pelat bipolar ketika diaplikasikan sebagai salah satu komponen pada PEMFC. Konduktivitas merupakan suatu parameter yang dapat digunakan untuk mengetahui seberapa baik suatu material untuk mengalirkan arus listrik. Semakin besar nilai konduktivitas listriknya, maka semakin baik pula material tersebut mengalirkan arus listrik. Untuk mengetahui seberapa besar konduktivitas dari sampel, digunakan alat *four point probe test*. Alat ini terdiri dari 4 buah *probe* dengan jarak tertentu yang terbuat dari logam tungsten, dimana *probe* 1 dan 4 sebagai titik pengukur arus yang dibaca di amperemeter, sedangkan *probe* 2 dan 3 sebagai pengukur tegangan yang akan dibaca di voltmeter. Masing-masing titik dipasang suatu pegas untuk meminimalisir kerusakan yang terjadi pada sampel pada saat proses pengujian. Berikut adalah skema dari alat uji konduktivitas yang digunakan .:



Gambar 3.6 Skema Uji Konduktivitas

Dengan menggunakan alat ini, akan diketahui nilai resistivitas dari sampel. Sampel yang digunakan bisa merupakan lembaran tipis atau tebal. Yang harus diperhatikan ketika pengujian adalah sampel yang diuji harus memiliki permukaan yang rata, sehingga perlu dilakukan proses pengamplasan sebelum dilakukan proses pengujian konduktivitas.

Prosedur pengujiannya sebagai berikut :

- Siapkan sampel dengan permukaan rata yang akan diuji
- Nyalakan voltmeter dan ubah tipe mesin menjadi DC
- Masukkan sampel kedalam alat *four point probe test* (sampel diletakkan tepat ditengah dimana 4 buah *probe* berada)
- Pilih mode *slice* sesuai dengan bentuk sampel yang akan diuji
- Masukkan data ketebalan dari sampel yang akan diuji
- Tutup sampel dengan penutup alat
- Nilai resistivitas (R) akan terlihat pada indikator alat

Nilai konduktivitas dari sampel dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{1}{R} \dots \dots \dots (3.3)$$

dimana, σ = nilai konduktivitas (S/cm)

R = resistivitas (Ω cm)

3.3.2.3 Pengukuran Porositas

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

Prinsipnya adalah perbandingan massa antara sampel yang telah dikeringkan pada oven, massa di dalam air dan massa di udara setelah direndam air dengan suhu 100⁰ C.

Prosedur pengujiannya sebagai berikut :

- Keringkan sampel di dalam oven dengan temperatur 100⁰ C selama 1 jam dan timbang massa sampel setelah dioven dengan timbangan digital dan catat sebagai D
- Siapkan air didalam *beaker glass* dan panaskan hingga suhu 100⁰ C pada *hot plate magnetic stirring*
- Rendam sampel didalam *beaker glass* yang berisi air selama 2 jam
- Diamkan sampel didalam air pada temperatur kamar selama 12 jam
- Timbang massa sampel setelah didiamkan didalam air dengan timbangan digital dan catat sebagai S
- Keringkan sampel dengan kain katun
- Timbang sampel yang telah dikeringkan dengan timbangan digital dan catat sebagai S_w

Nilai porositasnya dihitung dengan aturan sebagai berikut:

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

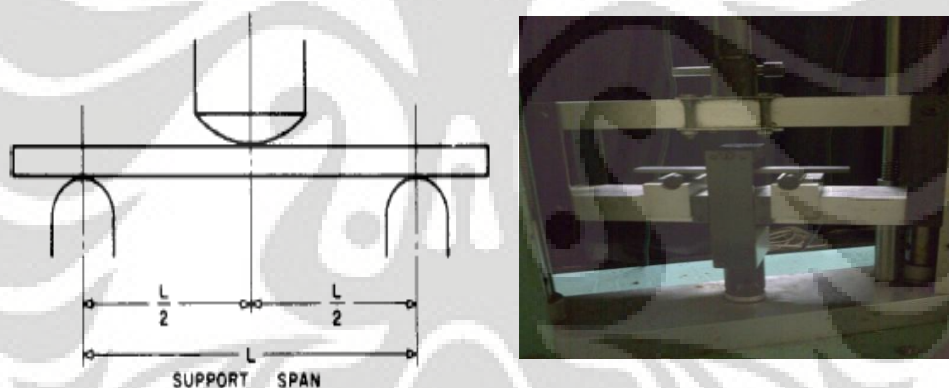
dimana, $S_w = \text{Saturated Weight (gram)}$
 $D = \text{Dry Weight (gram)}$
 $S = \text{Suspended Weight (gram)}$



Gambar 3.7 Pengujian Porositas

3.3.2.4 Pengujian Fleksural

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan pelat bipolar terhadap pembebanan tekuk. Hal ini dikarenakan, pada pengaplikasiannya di dalam *fuel cell*, pelat bipolar mengalami pembenanan dari komponen-komponen penyusun lainnya. Maka dari itu, diperlukan ketahanan terhadap beban fleksural yang baik untuk menciptakan pelat bipolar dengan sifat mekanik yang baik pula. Pengujian tekuk dilakukan dengan alat uji *bending* yang mengacu pada standar ASTM D790: “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”. Pengujian dilakukan dengan melakukan pembebanan pada 3 titik dengan perincian panjang 60 mm, lebar 13 mm dan tebal 3 mm. Dua titik tumpuan terletak pada pinggir spesimen uji dan satu titik tumpuan dibebankan pada bagian tengah. Berikut adalah skema pengujian tekuk :



Gambar 3.8 Skematis Pengujian Fleksural

Adapun prosedur pengujian fleksural adalah :

- Preparasi spesimen pengujian. Hal ini termasuk pemotongan spesimen pengujian dan pengkondisian spesimen.
- Ukur lebar dan ketebalan spesimen.
- Letakkan spesimen pada grip pengujian.
- Atur jenis pembabanan dan kecepatan
- Memulai pembebanan hingga spesimen mengalami perpatahan.
- Pada indikator akan terlihat besarnya pembebanan yang diberikan hingga spesimen mengalami perpatahan

Nilai porositasnya dihitung dengan aturan sebagai berikut:

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

dimana, σ_f = tegangan / kekuatan lentur (MPa)

P = beban maksimal (N)

L = panjang specimen (mm)

b = lebar specimen (mm)

d = tebal specimen (mm)

3.3.2.5 Pengamatan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*)

Pengamatan morfologi pada permukaan sampel dilakukan dengan menggunakan SEM. Pancaran berkas elektron yang ditembakkan pada sampel akan berinteraksi dengan atom-atom atau elektron dari sampel dan menghasilkan objek gambar. SEM menggunakan sinar-X yang memiliki panjang gelombang 4×10^{-3} nm, atau sekitar 100.000 kali lebih pendek dari panjang gelombang cahaya tampak. Itu sebabnya SEM dapat digunakan untuk menganalisa objek-objek yang sangat kecil yang tidak dapat dipisahkan oleh mikroskop bias. Detektor yang digunakan pada SEM adalah *secondary electron*. Tujuan pengamatan adalah untuk mengetahui dispersi bahan pengisi pada matriks dan daya pembasahan matriks terhadap serat karbon dengan perbesaran 2000 x. Bagian sampel yang diamati adalah pada permukaan sampel dan perpatahan uji tekuk.

Erbeda halnya dengan EDS, EDS merupakan suatu metode yang digunakan untuk menentukan radiasi spektrum energi sinar- X yang umumnya digunakan dalam analisis kimia. Analisis menggunakan EDS dilakukan berdasarkan identifikasi dan pencacahan sinar-x karakteristik yang terjadi dari peristiwa efek fotolistrik karena elektron dalam atom target (sampel) terkena sinar berenergi tinggi (radiasi gamma, sinar-x). Analisis EDS dapat digunakan untuk analisis kualitatif dan kuantitatif. Analisis kualitatif memberikan informasi jenis unsur yang terkandung dalam bahan, sedangkan analisis kuantitatif memberikan informasi jumlah unsur yang terdapat dalam bahan

tersebut. Didalam pengujian EDS, dibutuhkan nitrogen cair sebagai pendingin sampel yang diamati ketika ditembakkan sinar X.

Prosedur pengujian SEM dan EDS adalah :

- Potong sampel dengan ukuran tertentu (sesuai dengan *chamber* pada SEM) dan bersihkan sampel
- Proses pembersihan sampel dilakukan dengan pemberian *ultrasonic* pada sampel didalam larutan alkohol selama 5 menit
- Keringkan seluruh permukaan sampel dengan menggunakan mesin pengering
- Sampel diletakkan ke dalam *chamber* yang kemudian akan divakum.
- Setelah divakum, elektron ditembakkan pada sampel.
- Selanjutnya dilakukan pengambilan gambar terhadap bagian-bagian yang diinginkan dengan perbesaran yang diinginkan
- Untuk pengamatan EDS, nitrogen cair dialirkan kedalam sampel
- Unsur yang terkandung pada sampel akan ditampilkan dalam bentuk grafit dengan persentasi jumlah masing-masing dari unsur tersebut

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Sampel Pelat Bipolar

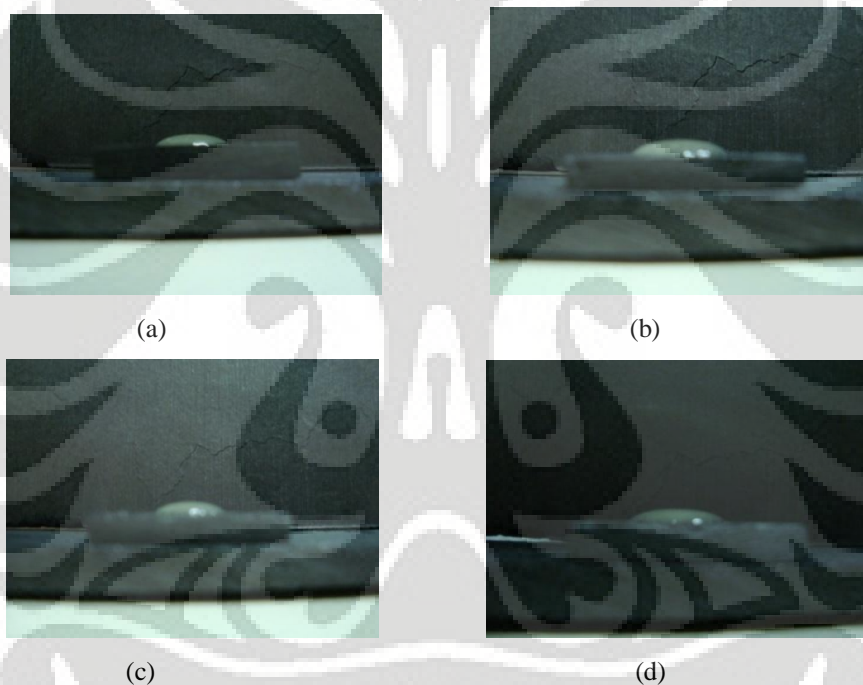
4.1.1 Pembasahan

Salah satu faktor yang mempengaruhi baik tidaknya karakteristik akhir yang dihasilkan oleh suatu komposit adalah pembasahan antara satu komponen dengan komponen lain yang ditambahkan sebagai penyusun dari komposit tersebut. Pembasahan ini memegang peranan penting terhadap *interface* yang akan terbentuk didalam material komposit. Semakin baik *interface* yang terbentuk pada masing-masing komponen penyusun material komposit, maka semakin baik pula sifat karakteristik dari material komposit tersebut.

Pada penelitian ini, digunakan material komposit dengan matriks berupa *epoxy resin*, penguat berupa grafit, dan bahan pengisi berupa *carbon black* dan polimer konduktif *polyaniline*. Polimer *epoxy resin* sebagai matriks harus dapat membasahi permukaan partikel grafit dan bahan pengisi konduktif yang digunakan agar *interface* yang terbentuk diantara komponen-komponen tersebut terbentuk dengan baik. Teknik pembasahan ini dilakukan dengan pemberian tetesan dari cairan *epoxy resin* diatas permukaan pelat bipolar yang dibentuk oleh komponen-komponen penyusun yang telah disebutkan sebelumnya, dimana ketika hal ini dilakukan akan terbentuk suatu sudut kontak diantara cairan polimer dan pelat bipolar. Pada saat cairan *epoxy resin* yang memiliki energi permukaan sendiri ditempatkan pada padatan (pelat bipolar) yang juga memiliki energi permukaan sendiri, maka cairan polimer tersebut akan membentuk suatu *droplet* (apabila sudut kontak yang terbentuk kurang dari 90^0) atau menyebar pada permukaan pelat bipolar (apabila sudut kontak yang terbentuk 0^0) [25]. Dengan menggunakan persamaan Young – Dupré [29], maka dapat diketahui nilai *work of adhesion* (W_A) antara matriks dan penguat yang terjadi.

Persamaan Young – Dupré merupakan persamaan termodinamika yang menandakan nilai maksimal dari *work of adhesion*, dimana kemungkinan energi-energi

lain selain energi permukaan pada masing-masing komponen yang mungkin terserap pada saat pemrosesan ikut terlibat [25]. Nilai *work of adhesion* berpengaruh terhadap kekuatan *interface* yang terbentuk diantara penguat dan matriks yang digunakan di dalam material komposit. Apabila sudut kontak yang terbentuk diantara matriks *epoxy resin* dan penguat grafit dengan bahan pengisi konduktif kurang dari 90^0 [25], maka pembasahan dari *epoxy resin* dapat dikatakan baik, karena nilai dari *work of adhesion* besar, yang berarti *interface* yang terbentuk juga akan semakin kuat. Berikut adalah pembasahan yang terjadi pada setiap material komposit pelat bipolar yang digunakan didalam penelitian :



Gambar 4.1 Drop Test yang dilakukan pada Pelat Bipolar dengan Penambahan *Polyaniline* : 50 mg (a), 100 mg (b), 150 mg (c), dan 200 mg (d)

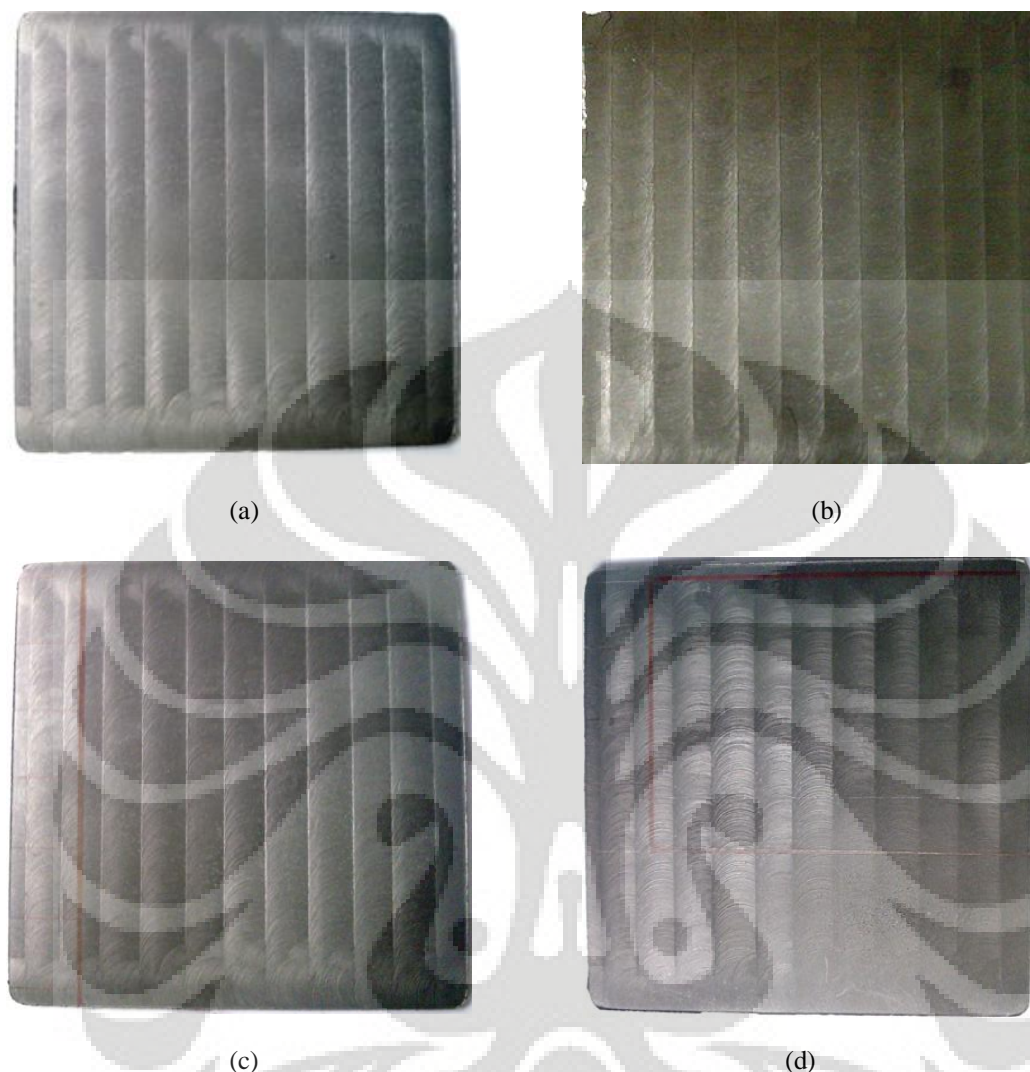
Berdasarkan hasil dari percobaan, terlihat bahwa pembasahan pada setiap sampel pelat bipolar dengan variabel penambahan polimer konduktif *polyniline* membentuk suatu *droplet* dengan sudut kontak tertentu. Secara umum, sudut kontak yang terbentuk pada masing-masing sampel cukup kecil (penambahan *polyaniline* 50 mg sebesar $19,65^0$, penambahan *polyaniline* 100 mg sebesar $20,56^0$, penambahan *polyaniline* 150 mg sebesar $16,70^0$, dan penambahan *polyaniline* 200 mg sebesar $15,94^0$). *Epoxy resin* sebagai matriks dari komposit dapat membasahi permukaan dari

penguat grafit yang ditambah dengan bahan pengisi konduktif. Hal ini menyebabkan *interface* yang terbentuk baik dan ikatan diantara komponen penyusunnya kuat, sehingga karakteristik akhir yang dihasilkan pelat bipolar juga baik

4.1.2 Pengamatan Visual

Proses pembuatan sampel yang dilakukan didalam penelitian ini, diawali dengan penimbangan komponen-komponen yang digunakan sebagai penyusun dari material komposit untuk pelat bipolar pada PEMFC, proses pencampuran dan proses pencetakan dengan menggunakan mesin *hot press*. Masing-masing proses yang dilakukan berpengaruh secara langsung terhadap karakteristik akhir dari pelat bipolar yang dihasilkan. Proses penimbangan yang dilakukan harus sesuai atau terdapat perbedaan dengan toleransi yang kecil terhadap komposisi penyusun pelat bipolar yang telah dibuat sebelumnya. Apabila proses penimbangan yang dilakukan pada masing-masing komponen tepat, maka pengaruh persentase dari setiap komponen tersebut dapat diketahui pengaruhnya terhadap karakteristik akhir yang terbentuk pada pelat bipolar. Proses selanjutnya yang perlu diperhatikan adalah proses pencampuran dari masing-masing komponen. Proses ini menentukan interaksi yang akan terbentuk pada *epoxy resin* sebagai matriks dan grafit sebagai penguatnya, dengan proses pencampuran yang baik, maka interaksi diantara masing-masing komponen juga akan baik.

Selain itu, proses pencetakan yang merupakan proses terakhir dari pembuatan sampel juga harus diperhatikan. Hal yang harus diperhatikan adalah proses peletakan bakalan pada sampel yang harus terdistribusi secara merata pada seluruh bagian cetakan, variabel proses pencetakan berupa temperatur, tekanan, dan waktu pemrosesan pada mesin *hot press*, serta lamanya waktu diam dari cetakan setelah dilakukan proses *hot press*. Diharapkan semua variabel proses pencetakan berada dalam keadaan optimum, sehingga pelat bipolar yang dihasilkan juga memiliki karakteristik akhir yang baik nantinya. Berikut adalah sampel pelat bipolar yang dihasilkan dengan variabel penambahan *polyaniline* sebesar 50 mg, 100 mg, 150 mg dan 200 mg :



Gambar 4.2 Sampel Pelat Bipolar yang dihasilkan dengan Penambahan: *Polyaniline* 50 mg (a), *Polyaniline* 100 mg (b), *Polyaniline* 150 mg (c), *Polyaniline* 200 mg (d)

Berdasarkan sampel pelat bipolar yang dihasilkan, secara umum pelat bipolar terbentuk dengan baik, dimana masing-masing variabel penelitian berupa penambahan polimer konduktif *polyaniline* menghasilkan sampel pelat bipolar yang padat dan mengisi seluruh permukaan dari cetakan yang dipakai, sehingga bentuk akhir dari setiap pelat bipolar berbentuk sama dengan cetakan yang dipakai. Ketebalan yang dihasilkan dari masing-masing pelat bipolar yang dihasilkan juga tidak jauh berbeda dengan ketebalan cetakan yang digunakan. Warna hitam yang dihasilkan dari setiap bipolar merupakan pengaruh dari penambahan grafit, *carbon black*, dan *polyaniline*. Dimana grafit dan *carbon black* tersebut, sebagian besar komponen penyusunnya terdiri dari

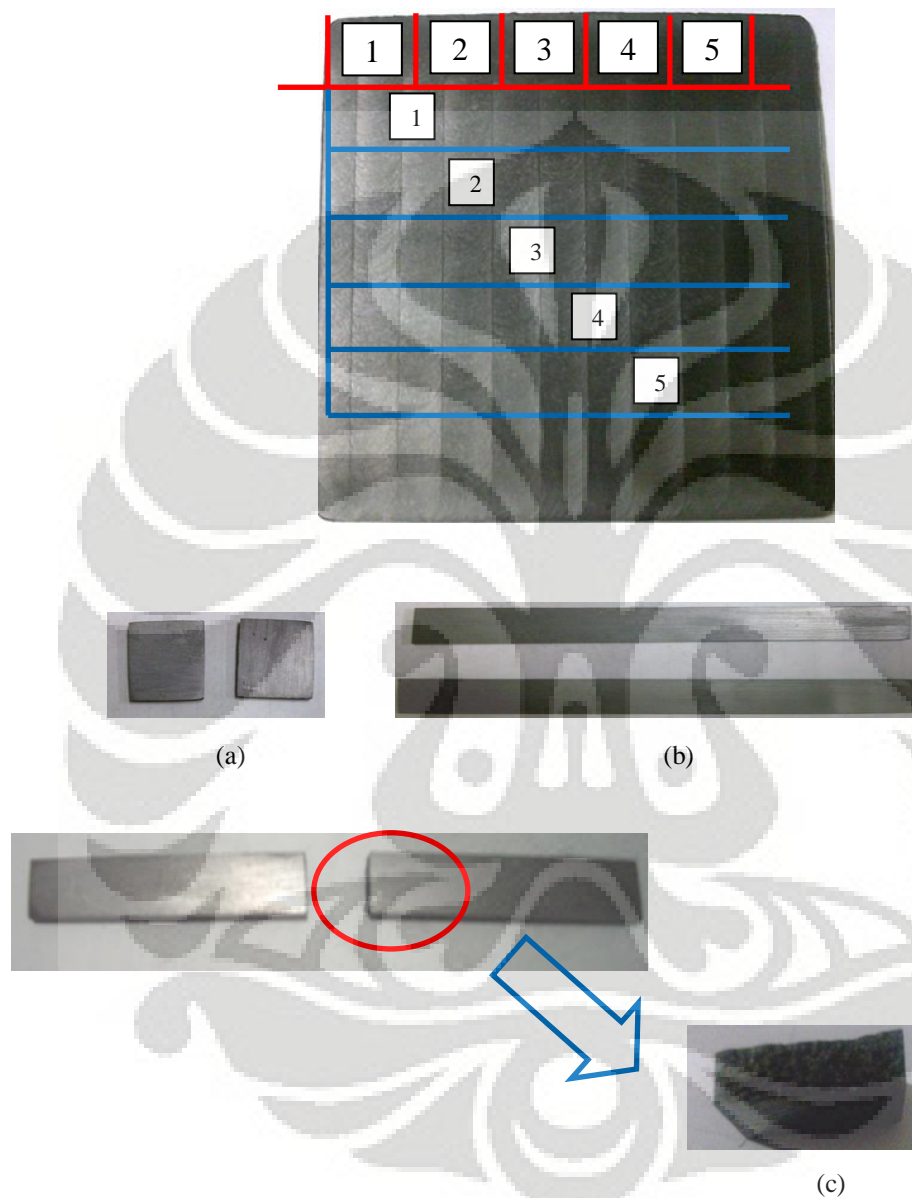
unsur karbon yang berwarna hitam, sedangkan *epoxy resin* sebagai matriks polimer tidak berwarna (bening dan transparan). Warna hitam dari grafit mendominasi seluruh pelat bipolar akibat jumlahnya yang lebih banyak dibandingkan dengan penambahan polimer yang tidak berwarna. Selain itu, pada permukaan pelat bipolar terbentuk suatu jejak yang ditimbulkan oleh permukaan dari cetakan yang digunakan. Jejak yang terdapat pada permukaan pelat bipolar yang tidak rata tersebut harus dihilangkan dan dihaluskan ketika dilakukan pengujian karakteristik.

4.1.3 Pembuatan Sampel Uji Karakteristik

Sampel pelat bipolar yang telah dihasilkan dibagi menjadi dua bagian, dimana satu bagian digunakan untuk uji konduktivitas, densitas dan porositas, sedangkan bagian lainnya digunakan untuk uji fleksural dan pengamatan pada SEM. Setiap sampel yang akan digunakan untuk uji karakteristik, diampelas terlebih dahulu hingga permukannya rata. Hal ini bertujuan agar pada pengujian konduktivitas, empat titik pada mesin *4 point probe test* berada pada permukaan yang rata, sehingga nilai resistivitas dari pelat bipolar yang diuji dapat diketahui. Selain itu, untuk pengujian fleksural permukaan yang rata bertujuan untuk mencegah adanya konsentrasi tegangan yang dapat mempengaruhi nilai kekuatan fleksural yang didapat. Patahan yang didapat dari pengujian fleksural tersebut, digunakan untuk pengamatan pada SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dan uji EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*). Diharapkan dengan pengambilan sampel pada bagian tersebut, dapat diketahui interaksi diantara komponen-komponen penyusun material komposit untuk pelat bipolar dan pengaruh dari uji fleksural yang dilakukan sebelumnya.

Sampel berukuran 2 x 2 mm digunakan untuk uji konduktivitas, uji densitas dan uji porositas, sedangkan sampel berukuran 12 x 1,3 digunakan untuk uji fleksural. Ukuran sampel yang digunakan sesuai dengan standard pengujian ASTM yang digunakan, yaitu ASTM C20 untuk pengujian porositas dan ASTM D790 untuk pengujian fleksural. Pada sampel berukuran 2 x 2 mm dilakukan uji konduktivitas terlebih dahulu, dan dilanjutkan dengan uji densitas dan porositas. Hal ini dikarenakan ketika dilakukan uji densitas dan uji porositas, terdapat air yang akan masuk kedalam

sampel pelat bipolar dan dapat mempengaruhi nilai konduktivitas dari pelat bipolar tersebut. Berikut adalah pembagian sampel yang digunakan untuk uji karakteristik pada pelat bipolar :



Gambar 4.3 Pembagian Sampel Uji Karakteristik : Uji Konduktivitas (a), Uji Fleksural (b), Pengamatan SEM dan EDS (c)

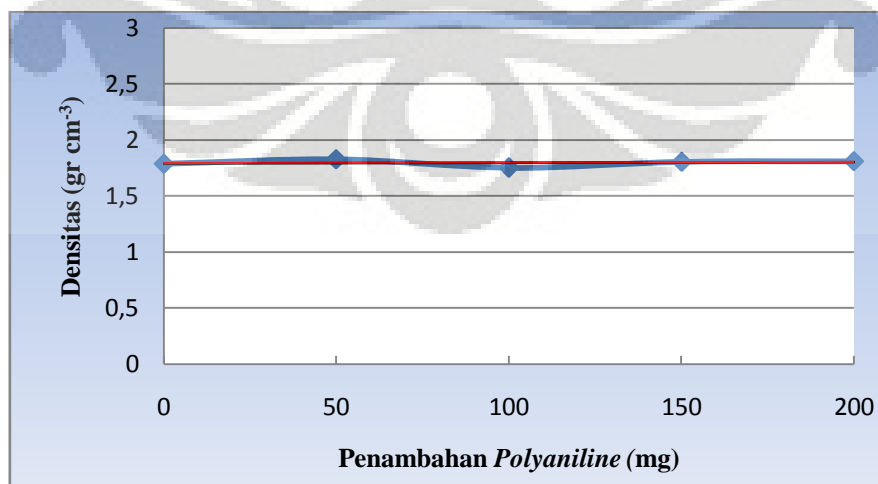
4.2 Pengujian Karakterisasi

4.2.1 Pengujian Densitas

Densitas merupakan salah satu faktor penting di dalam pelat bipolar. Bobot akhir dari pelat bipolar yang dihasilkan dipengaruhi dari densitas yang dihasilkan. Semakin besar nilai densitas, berarti semakin berat bobot dari pelat bipolar yang dihasilkan. Didalam *fuel cell*, pelat bipolar mencakup sekitar 70% dari berat total *fuel cell* [8]. Semakin ringan pelat bipolar yang dihasilkan, maka bobot dari *fuel cell* akan semakin ringan dan efisiensi penggunaan *fuel cell* pun makin baik. Berdasarkan hasil penelitian, berikut adalah data densitas yang didapatkan pada setiap pelat bipolar :

Tabel 4.1 Nilai Densitas pada Setiap Sampel

Sampel	Penambahan <i>Polyaniline</i>	Densitas (gr/cm^3)
1	0 mg*	1,79
2	50 mg	1,83
3	100 mg	1,75
4	150 mg	1,80
5	200 mg	1,81



Gambar 4.4 Hasil Pengujian Densitas

Berdasarkan grafik diatas, terlihat bahwa dengan penambahan polimer konduktif *polyaniline* didalam pelat bipolar, menghasilkan densitas yang lebih besar. Hal ini dapat dilihat pada data densitas tanpa penambahan *polyaniline* yang memiliki densitas lebih kecil. Semakin banyak *polyaniline* yang ditambahkan, maka densitas dari pelat bipolar cenderung menurun, dikarenakan jumlah grafit yang ditambahkan semakin sedikit, dimana berat jenis dari grafit lebih besar dibandingkan dengan polimer. Besarnya densitas dari setiap sampel berada diantara $1,752 \text{ gr/cm}^3$ - $1,809 \text{ gr/cm}^3$. Besarnya densitas yang didapatkan masih berada dibawah densitas dari grafit sebesar $2,22 \text{ gr/cm}^3$.

Nilai densitas yang didapatkan berhubungan dengan spesifik volume pada polimer (dalam hal ini *epoxy resin*). Spesifik volume tersebut dipengaruhi oleh variabel tekanan dan temperatur. Ketika *epoxy resin* didinginkan secara perlahan, maka nilai spesifik volumenya akan rendah. Penurunan temperatur tersebut menyebabkan adanya pergerakan termal molekul polimer. Pergerakan ini memungkinkan untuk molekul – molekul *epoxy resin* tersusun secara berdekatan. Hal ini dapat mengurangi spesifik volume dari *epoxy resin* tersebut, sehingga densitasnya juga akan menurun. Selain itu, tekanan juga berpengaruh terhadap spesifik volume dari polimer. Semakin besar tekanan yang diterima oleh polimer, maka semakin rapat atau dekat jarak antar molekul polimer, sehingga spesifik volume dari polimer akan menurun, yang berarti densitasnya akan semakin meningkat.

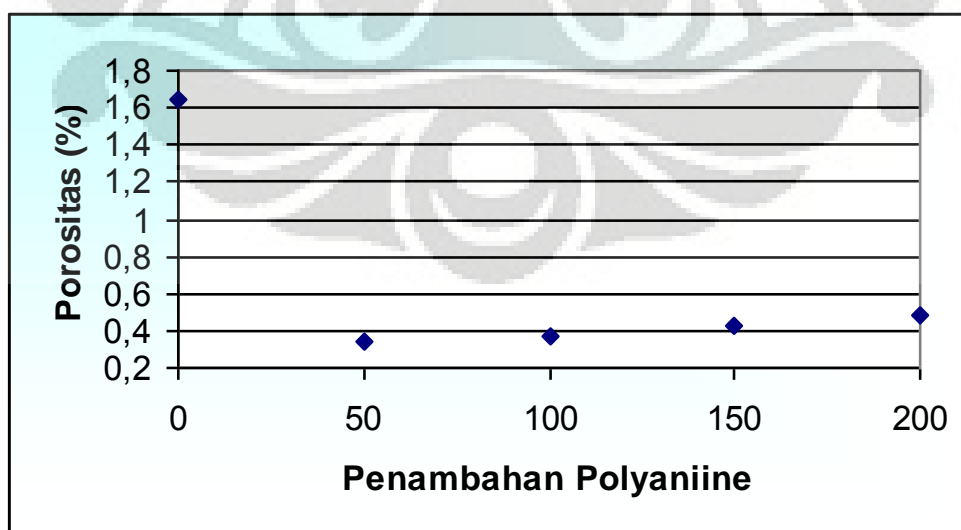
Secara keseluruhan, perubahan nilai densitas pada seluruh sampel tidak menunjukkan perubahan nilai yang signifikan. Densitas pada masing-masing sampel berubah dengan kenaikan dan penurunan yang sangat kecil. Hal ini diakibatkan oleh temperatur proses pada saat proses pencetakan pelat bipolar (70^0 C) lebih kecil dibandingkan dengan T_g dari polimer *epoxy resin* ($130 - 250^0 \text{ C}$) [26], sehingga pergerakan termal dari molekul polimer sangat lambat dan tidak terdapat perubahan spesifik volume atau densitas yang signifikan. Densitas yang dihasilkan pada masing-masing pelat bipolar sudah memenuhi persyaratan sebagai pelat bipolar dengan densitas kurang dari 5 gr/cm^3 .

4.2.2 Pengujian Porositas

Keberadaan porositas didalam pelat bipolar sangat tidak diinginkan. Porositas merupakan suatu daerah kosong yang terbentuk diantara komponen-komponen penyusun didalam material komposit untuk pelat bipolar. Gas-gas reaktan yang digunakan sebagai bahan bakar pada *fuel cell* dapat keluar melalui poros yang terbentuk pada pelat bipolar dan menurunkan efisiensi dari penggunaan *fuel cell*. Diharapkan nilai porositas yang dihasilkan pada pelat bipolar sekecil mungkin. Berikut adalah nilai porositas yang didapatkan pada masing-masing pelat bipolar yang dihasilkan :

Tabel 4.2 Nilai Porositas pada Setiap Sampel

Sampel	Penambahan <i>Polyaniline</i>	Porositas (%)
1	0 mg*	1,64
2	50 mg	0,34
3	100 mg	0,37
4	150 mg	0,42
5	200 mg	0,48

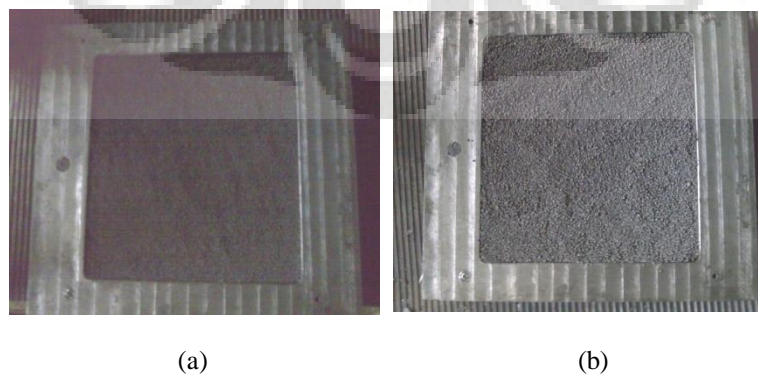


Gambar 4.5 Hasil Pengujian Porositas

Penambahan *polyaniine* sebanyak 50 mg menurunkan porositas dari pelat bipolar. Pada grafit terlihat bahwa dengan tidak adanya penambahan *polyaniline*, porositas yang terbentuk sebesar 1,644 % dan ketika dilakukan penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg, porositas menurun menjadi 0,344 %. Kemudian seiring bertambahnya *polyaniline* yang ditambahkan, maka porositas yang dihasilkan semakin besar.

Porositas yang terbentuk mungkin disebabkan oleh tidak merata dan terkumpulnya metanol pada salah satu bagian bakalan ketika dilakukan pencetakan. Pada saat proses pencetakan dengan mesin *hot press*, metanol tersebut akan menguap dan bagian bakalan yang tadinya diisi oleh metanol, akan menjadi ruang kosong. Semakin banyak jumlah metanol yang terdapat pada bagian tertentu dari bakalan, maka waktu yang diperlukan untuk metanol tersebut menguap lebih lama, sehingga *epoxy resin* yang berfungsi sebagai pengikat pada pelat bipolar tidak dapat mengikat ruang kosong tersebut. Ruang kosong inilah yang menyebabkan terjadinya poros pada pelat bipolar. Semakin banyak ruang kosong yang terdapat, maka jumlah porositas yang terbentuk pada pelat bipolar akan semakin banyak pula.

Keberadaan porositas pada pelat bipolar yang dihasilkan dapat dilihat dari jenis bakalan yang terbentuk ketika proses pencampuran. Hal ini dapat dilakukan dengan membandingkan bakalan yang terbentuk pada pelat bipolar dengan keberadaan porositas yang lebih sedikit dengan pelat bipolar dengan keberadaan porositas yang lebih banyak. Pelat bipolar yang paling banyak terdapat porositas pada permukaannya adalah pelat bipolar dengan komposisi penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg dan yang paling sedikit adalah dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg.



Gambar 4.6 Bakalan yang terbentuk pada Penambahan *Polyaniline* sebanyak : 50 mg (a), 200 mg (b)

Pada Gambar 4.6 terlihat bahwa pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg membentuk bakalan dengan besar butir yang relatif lebih besar dengan distribusi yang tidak merata. Bakalan dengan butir yang besar ini juga dipengaruhi oleh faktor kecepatan perputaran mesin pada saat proses *mixing*. Pada saat proses pencampuran, dengan kecepatan putaran yang tidak sesuai, kemungkinan menumpuknya metanol pada suatu bagian bakalan pelat bipolar semakin besar. Hal ini membuktikan bahwa pada bagian tertentu dari bakalan pelat bipolar tersebut, terdapat metanol yang menumpuk pada salah satu bagian bakalannya, yang nantinya ketika proses pencetakan akan membentuk porositas pada sampel pelat bipolar.

Penambahan *polyaniline* didalam material komposit dengan matriks polimer berupa *epoxy resin* dapat mengisi ruang kosong tersebut, sehingga ruang kosong yang terbentuk semakin sedikit, dapat dikatakan bahwa persentasi porositasnya akan semakin menurun. Namun pada setiap penambahan *polyaniline* hingga 200 mg, porositas cenderung naik. Hal ini dikarenakan disitribusi dari *polyaniline* yang tidak merata pada setiap bagian sampel pelat bipolar yang dihasilkan, sehingga *polyaniline* yang ditambahkan tidak dapat mengisi ruang kosong dan nilai porositas semakin naik. Penambahan *polyaniline* dengan jumlah yang relatif sedikit pun bisa menjadi faktor utama penyebab naiknya nilai porositas dari pelat bipolar tersebut.

Secara keseluruhan, porositas yang terbentuk pada semua pelat bipolar memiliki persentasi yang kecil (kurang dari 0,5 %). Dengan persentasi porositas yang kecil tersebut, pelat bipolar yang dihasilkan dapat digunakan pada PEMFC.

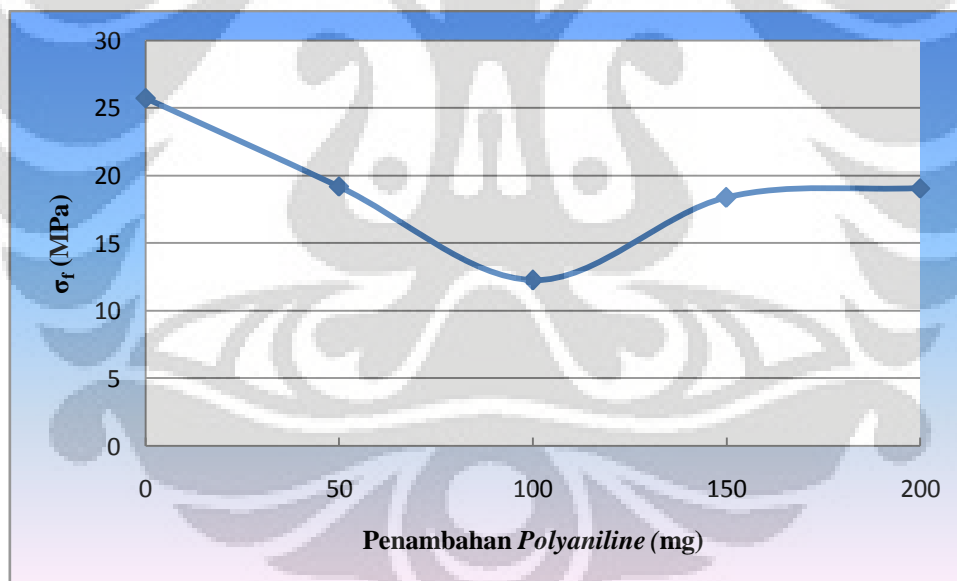
4.2.3 Pengujian Fleksural

Pelat bipolar yang baik harus memiliki kekuatan fleksural yang baik, dikarenakan pada saat pengaplikasiannya sebagai *fuel cell* pada komponen tertentu, pelat bipolar akan mengalami tegangan fleksural dari setiap *stack fuel cell* atau penyusun lain didalam *fuel cell*, dengan kekuatan fleksural yang tinggi, pelat bipolar tidak mengalami keretakan atau kegagalan ketika mengalami suatu pembebanan

fleksural. Berikut adalah data hasil uji fleksural yang dilakukan pada setiap sampel pelat bipolar :

Tabel 4.3 Nilai Kekuatan Fleksural pada Setiap Sampel

Sampel	Penambahan <i>Polyaniline</i>	σ_f (MPa)
1	0 mg*	25,73
2	50 mg	19,19
3	100 mg	12,27
4	150 mg	18,37
5	200 mg	19,07



Gambar 4.7 Hasil Pengujian Fleksural

Berdasarkan grafik, secara umum terlihat bahwa kekuatan fleksural dari pelat bipolar mengalami penurunan ketika diberi penambahan *polyaniline*. Pada sampel pelat bipolar tanpa adanya penambahan *polyaniline*, kekuatan fleksuralnya sebesar 25,726 MPa, dengan adanya penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg, kekuatan fleksural dari pelat bipolar mengalami penurunan hingga mencapai 19,189 MPa. Walaupun

berdasarkan foto SEM yang didapatkan, ikatan yang terbentuk diantara *epoxy resin* dan grafit cukup baik, ditandai dengan permukaan *epoxy resin* yang dapat membasahi permukaan grafit. Penurunan yang terjadi kemungkinan disebabkan oleh masih sedikitnya jumlah *polyaniline* yang ditambahkan (sebanyak 50 mg).

Penurunan yang signifikan terjadi pada sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 100 mg, nilai kekuatan fleksuralnya turun drastis menjadi 12,267 MPa. Hal ini dikarenakan sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 100 mg, memiliki permukaan yang melengkung. Walaupun bentuk dari pelat bipolar yang dihasilkan sesuai dengan dimensi dari cetakan yang digunakan, namun pada kedua permukaannya tidak rata. Pada bagian tengah dari pelat bipolar tersebut memiliki ketinggian yang lebih rendah dibandingkan dengan kedua ujungnya, sehingga pelat bipolar yang dihasilkan melengkung pada bagian tengah. Hal ini dikarenakan ketika sampel pelat bipolar yang dihasilkan dilepas dari cetakan, *epoxy resin* yang terdapat pada bagian tengah dari pelat bipolar tersebut masih mengeras. Fenomena ini berkaitan dengan perubahan volume pada material termoset (dalam hal ini *epoxy resin*) ketika mengalami proses *curing*. Ketika *epoxy resin* mengalami proses *curing*, molekul monomer *epoxy* membentuk *cross link* yang berkembang dan membentuk suatu jaringan padat, dimana hal ini menyebabkan perubahan volume terjadi [41]. Hal ini juga disebut dengan proses *cure shrinkage*. Hal ini terjadi karena sampel pelat bipolar yang diuji memiliki geometri yang tidak merata pada seluruh bagian permukannya, dengan adanya perbedaan ketinggian pada bagian tengah dari sampel (melengkung), pembebanan yang dibutuhkan untuk terjadi perpatahan menjadi lebih sedikit.

Pada sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 150 mg, terjadi kenaikan kekuatan fleksural. Hal ini dikarenakan telah terbentuknya ikatan yang baik antara *epoxy resin* dengan grafit dan *carbon black*. *Epoxy resin* dapat membasahi seluruh permukaan dari grafit dan *carbon black*. Hal ini juga terjadi pada sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg, yaitu peningkatan kekuatan fleksural yang nilainya mendekati kekuatan fleksural pada sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg. Dapat dikatakan bahwa penambahan

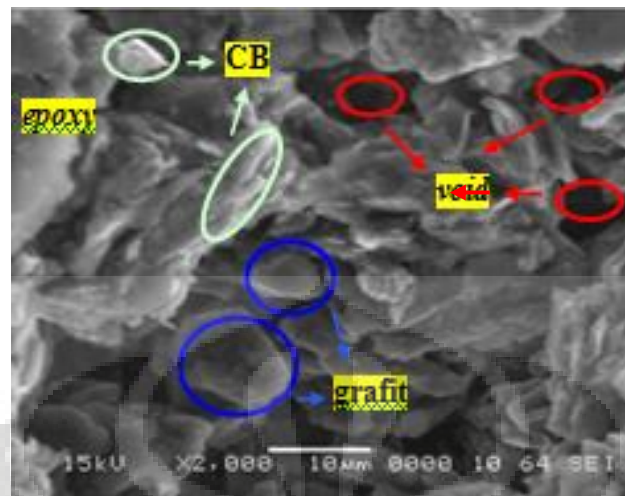
polyaniline sebanyak 200 mg pada pelat bipolar baru mulai terlihat pengaruhnya terhadap kekuatan fleksuralnya.

Suatu pelat bipolar harus memiliki kekuatan fleksural minimum sebesar 25 MPa untuk dapat digunakan sebagai pelat bipolar didalam PEMFC [44]. Setiap sampel pelat bipolar yang dihasilkan, belum mencapai batas minimum kekuatan fleksural tersebut. Namun berdasarkan grafik yang diperoleh, terlihat dengan semakin banyaknya jumlah *polyaniline* yang ditambahkan ke dalam material komposit untuk pelat bipolar, kekuatan fleksural semakin naik dan dengan jumlah penambahan *polyaniline* yang lebih banyak, pelat bipolar yang dihasilkan akan dapat memenuhi standard minimum kekuatan fleksural sebesar 25 MPa.

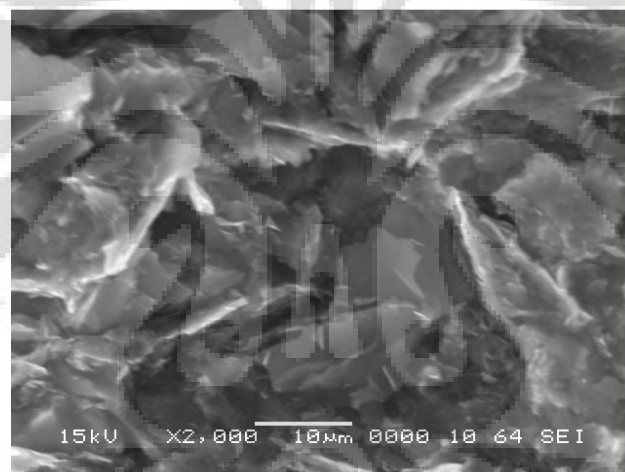
4.2.4 Pengamatan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dan EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*)

Patahan dari sampel uji fleksural yang dihasilkan akan digunakan untuk diamati dengan SEM. Pengamatan sampel pelat bipolar menggunakan SEM bertujuan untuk mengetahui interaksi antara komponen-komponen penyusun didalam material komposit untuk pelat bipolar dan morfologi dari permukaan patahan. Pengamatan SEM yang dilakukan adalah dengan perbesaran 2000 x.

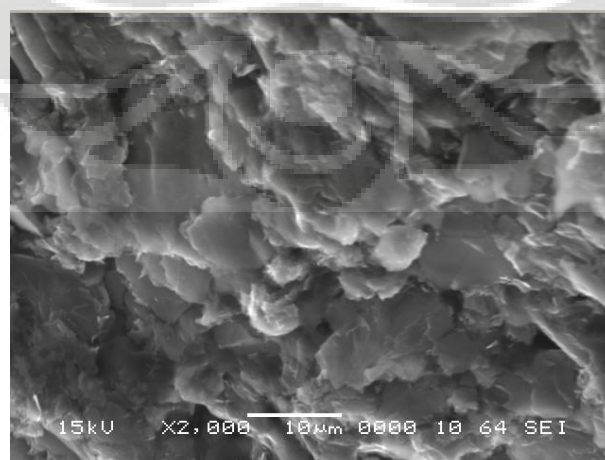
Pada sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg dilakukan pengujian EDS untuk mengetahui unsur-unsur penyusun yang terdapat didalam pelat bipolar. Apabila unsur-unsur penyusunnya sudah diketahui, maka keberadaan dari *polyaniline* yang ditambahkan dapat diketahui dan bagaimana struktur dari *polynailine* tersebut. Perbesaran yang digunakan untuk pengujian EDS juga dilakukan dengan perbesaran yang sama pada pengamatan SEM sebelumnya, yaitu sebesar 2000 x. Berikut ini adalah hasil pengamatan SEM yang didapatkan pada masing-masing sampel pelat bipolar yang dihasilkan didalam penelitian :



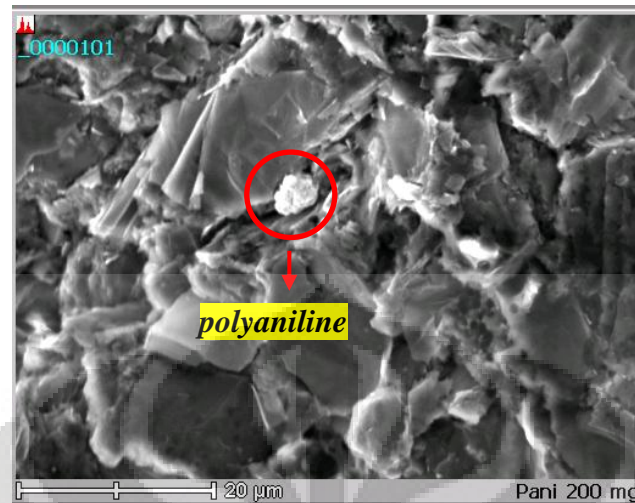
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.8 Pengamatan SEM pada Sampel Pelat Bipolar dengan Penambahan *Polyaniline* Sebanyak : 50 mg (a), 100 mg (b), 150 mg (c), 200 mg (d)

Secara umum, pembasahan dari matriks polimer *epoxy resin* cukup baik dalam membasahi seluruh permukaan dari grafit dan *carbon black*. Hal ini dapat dilihat pada masing-masing sampel pelat bipolar yang diamati dengan SEM, permukaan grafit ditutupi oleh permukaan *epoxy resin*. Namun pada sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 100 mg terlihat bahwa *epoxy resin* tidak menutupi seluruh permukaan grafit, sehingga ikatan yang terbentuk diantara keduanya tidak sekuat ikatan yang terbentuk pada sampel pelat bipolar lainnya, dimana *epoxy resin* dapat membasahi seluruh permukaan grafit dengan cukup baik. Hal ini mempengaruhi karakteristik akhir dari pelat bipolar tersebut, yaitu kekuatan fleksuralnya. Dimana, sampel pelat bipolar dengan ikatan antara masing-masing komponennya tidak kuat, energi yang dibutuhkan untuk memutuskan ikatan tersebut lebih mudah, sehingga kekuatan fleksuralnya pun lebih rendah.

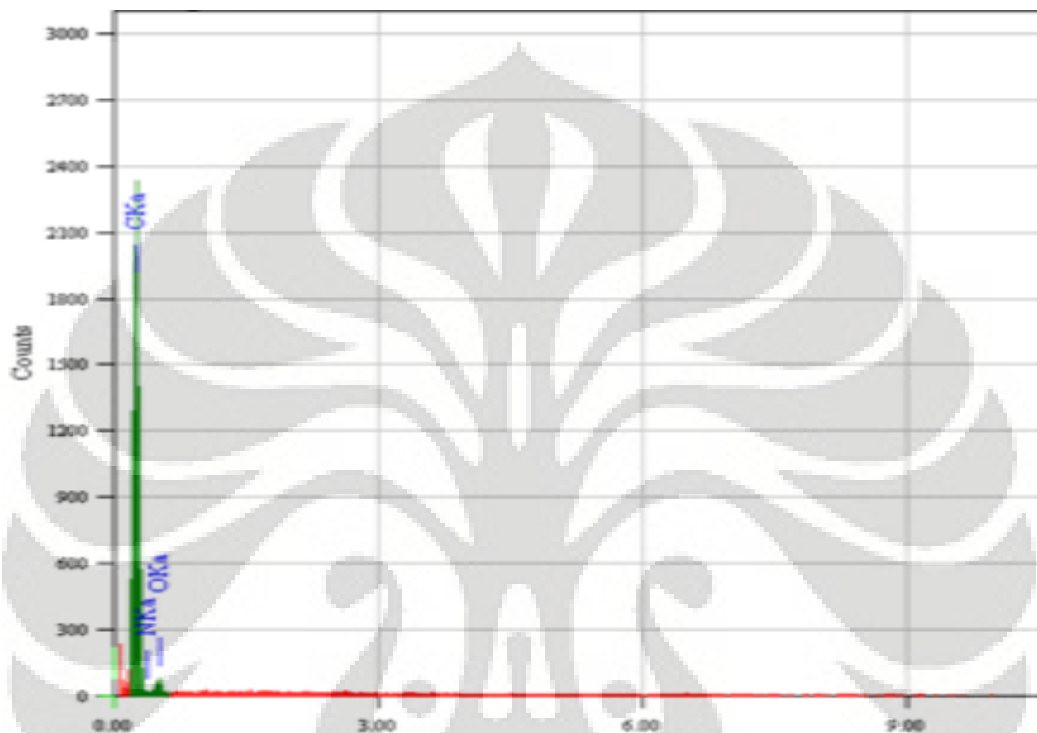
Pada saat diberi suatu pembebanan tertentu, masing-masing komponen akan tertarik. Semakin besar pembebanan yang diberikan, maka semakin besar kemungkinan komponen-komponen tersebut terpisah. Permukaan grafit yang tadinya ditutupi dengan baik oleh permukaan *epoxy resin*, akan terpisah dan membentuk suatu ruang kosong atau *void*. *Void* ini dapat dijadikan suatu parameter untuk menentukan sampel pelat bipolar yang memiliki kekuatan fleksural yang paling baik. Apabila *void* yang terbentuk

semakin banyak, berarti pembebanan yang terjadi pada sampel pelat bipolar pun semakin besar. Hal ini dikarenakan semakin banyak komponen yang terpisah. Bila kita lihat pada sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg dengan pembasahan *epoxy resin* yang cukup baik, terlihat bahwa banyak sekali *void* yang terbentuk. Hal ini menandakan bahwa pembebanan yang diterima oleh sampel pelat bipolar cukup besar, sehingga dapat memisahkan grafit dan *epoxy resin*. Jumlah *void* yang semakin banyak, berarti semakin banyak grafit yang terpisah dari *epoxy resin*. Bila dibandingkan dengan sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg, jumlah *void* yang terbentuk lebih sedikit. Hal ini menandakan bahwa pembebanan yang diterima oleh sampel ini lebih sedikit dibandingkan sampel pelat bipolar sebelumnya, untuk memastikan besarnya pembebanan yang diterima oleh sampel sebelum mengalami perpatahan, dapat dilihat dari kekuatan fleksuralnya. Sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg memiliki kekuatan fleksural sebesar 19,189 MPa, sedangkan dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg memiliki kekuatan fleksural sebesar 19,074 MPa.

Sampel pelat bipolar yang paling rendah kekuatan fleksuralnya adalah sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 100 mg. Terlihat bahwa ikatan yang terbentuk tidak cukup baik dan *void* yang terbentuk pun sedikit. Selain itu, geometri awal dari sampel yang berbentuk agak melengkung ke arah tertentu, menyebabkan nilai fleksuralnya menjadi kecil.

Berdasarkan pengujian EDS yang dilakukan, terlihat bahwa sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg terdapat unsur C, O dan N. Dimana unsur C mendominasi, diikuti dengan unsur O dan unsur N. Unsur C disini merupakan unsur yang terdapat pada grafit dan *carbon black*, dimana unsur utama penyusun dari kedua komponen tersebut adalah karbon. Persentasi penambahan grafit dan *carbon black* pada material komposit untuk pelat bipolar adalah sebanyak 80%, sehingga jumlah unsur karbon didalam pelat bipolar mendominasi. Sedangkan unsur kedua terbanyak didalam pelat bipolar adalah O, dimana unsur O yang didapatkan merupakan unsur penyusun dari matriks polimer berupa *epoxy resin*. Keberadaan polimer konduktif *polyaniline*, ditandai dengan adanya unsur N didalam sampel pelat

bipolar yang diamati. *Polyaniline* merupakan struktur polimer yang disusun dengan unsur O dan unsur N. Persentasi unsur N yang kecil (sekitar 1,05 %) diakrenakan persentase penambahan *polyaniline* yang ditambahkan kedalam material komposit untuk pelat bipolar juga kecil (hanya 200 mg).



Gambar 4.9 Pengujian EDS pada Sampel dengan Penambahan *Polyaniline* Sebanyak 200 mg

Berdasarkan foto sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg, struktur *polyaniline* terlihat berada diantara matriks *epoxy resin*, grafit dan *carbon black*. *Polyaniline* terbentuk dengan struktur tersendiri yang berbeda dengan komponen lainnya. Bentuk dari *polyaniline* yang didapatkan, menyerupai bentuk serbuk *polyaniline* yang didapatkan pada literatur dengan pengamatan menggunakan TEM ^[42]. Dapat disimpulkan struktur yang terbentuk tersebut adalah *polyaniline*.

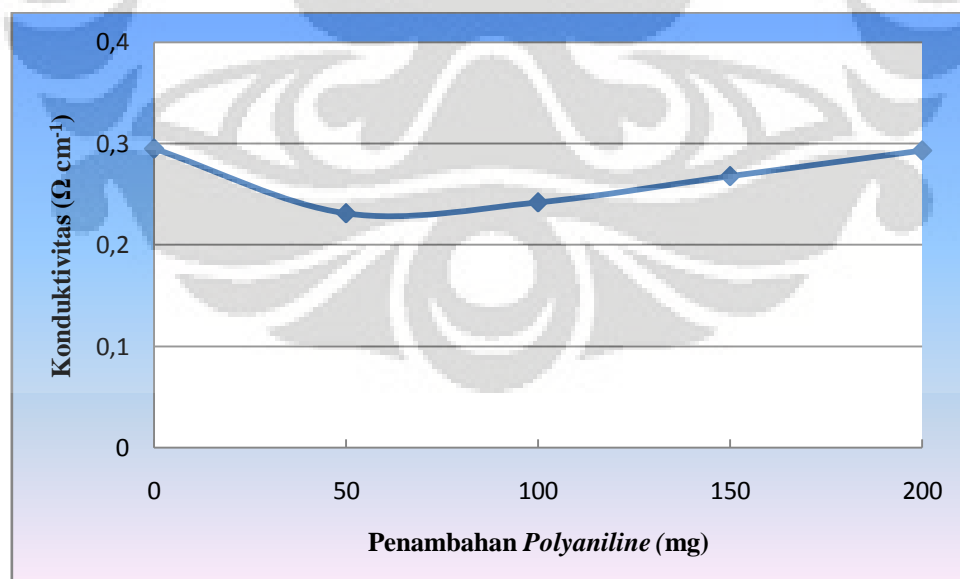
Kesimpulan yang didapatkan pada penjelasan sebelumnya, menjelaskan bahwa penambahan *polyaniline* dengan jumlah yang sedikit berpengaruh terhadap pelat bipolar yang dihasilkan. Hal ini ditandai dengan keberadaan *polyaniline* didalam pelat bipolar ketika diamati dengan menggunakan SEM.

4.2.5 Pengujian Konduktivitas

Konduktivitas merupakan faktor yang paling penting di dalam pelat bipolar. Sebuah pelat bipolar, harus memiliki nilai konduktivitas listrik yang tinggi, yang artinya kemampuan didalam menghantarkan elektron semakin baik. Berdasarkan pengujian konduktivitas yang dilakukan dengan menggunakan alat *4 point test probe*, berikut adalah data yang didapat pada setiap sampel pelat bipolar:

Tabel 4.4 Nilai Resistivitas dan Konduktivitas pada Setiap Sampel

Sampel	Penambahan <i>Polyaniline</i>	Resistivitas (Ω cm)	Konduktivitas (S/cm)
1	0 mg*	4,73	0,295
2	50 mg	4,44	0,23
3	100 mg	4,15	0,24
4	150 mg	3,74	0,26
5	200 mg	3,55	0,293



Gambar 4.10 Hasil Pengujian Konduktivitas

Berdasarkan data nilai konduktivitas yang diperoleh, terdapat penurunan nilai konduktivitas ketika dilakukan penambahan *polyaniline*. Nilai konduktivitasnya turun dari 0,295 S/cm menjadi 0,231 S/cm. Walaupun data konduktivitas dari pengujian konduktivitas pada pelat bipolar lebih besar, namun memiliki deviasi yang sangat besar dengan perbedaan nilai resistivitas lebih dari 2x lipatnya. Berbeda dengan sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg yang deviasinya rendah dan nilainya hampir sama. Apabila setiap data resistivitas digunakan, nilai konduktivitasnya menjadi 0,211 S/cm dan nilai konduktivitas dari pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg lebih tinggi, yaitu sebesar 0,236 S/cm.

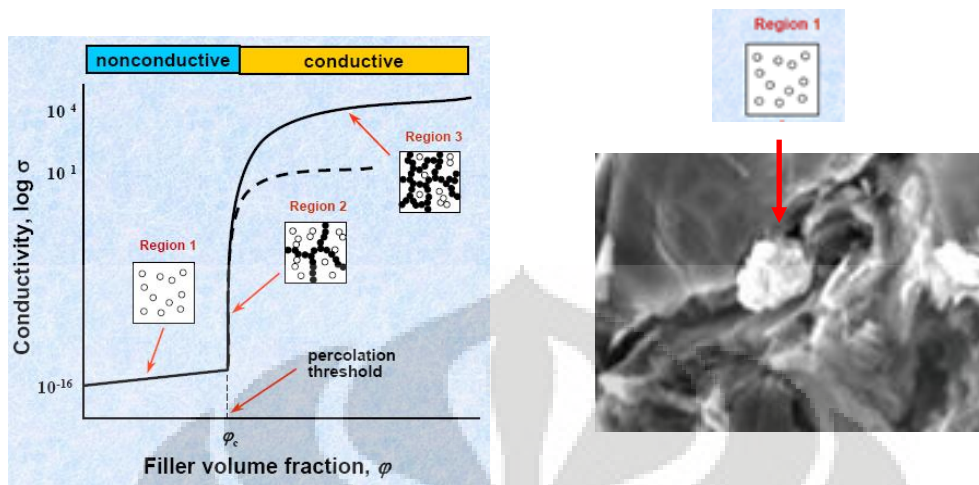
Tabel 4.5 Perbandingan Nilai Resistivitas

Sampel	Resistivitas ($\Omega \text{ cm}^{-1}$)	
	Tanpa Penambahan <i>Polyaniline</i>	Penambahan <i>Polyaniline</i> Sebanyak 50 mg
1	3,2	5,4
2	5,9	5,59
3	3,08	4,28
4	7,59	3,64
5	3,86	5,96

Semakin banyak penambahan polimer konduktif *polyaniline* pada pelat bipolar, nilai konduktivitasnya akan semakin meningkat. Pelat bipolar tanpa penambahan *polyaniline* memiliki nilai konduktivitas sebesar 0,211 S/cm meningkat menjadi 0,231 S/cm pada penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg, dan terus meningkat pada setiap penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg hingga mencapai konduktivitas dengan nilai sebesar 0,293 S/cm. *Polyaniline* berfungsi sebagai perantara bagi *epoxy resin* dengan grafit dan *carbon black* ketika elektron mengalir pada komponen-komponen tersebut.

Penambahan polimer konduktif *polyaniline* didalam material komposit relatif dalam jumlah yang sangat sedikit (50 mg, 100 mg, 150 mg dan 200 mg), dimana dengan penambahan *polyaniline* dengan jumlah sedikit, peningkatan besarnya konduktivitas tidak terlalu signifikan dan relatif kecil. Fenomena ini disebut dengan *percolation threshold*. Setelah melewati daerah *percolation threshold*, nilai konduktivitas dari komposit pelat bipolar akan naik lebih cepat bila dibandingkan dengan daerah sebelumnya pada penambahan volume *polyaniline*. Untuk melewati daerah ini, polimer konduktif yang digunakan harus memiliki energi permukaan yang tidak berbeda jauh dengan komponen penyusun lainnya didalam komposit, sehingga polimer konduktif dapat terdispersi secara sempurna kedalam matriks dari komposit. Perbedaan energi permukaan yang kecil tersebut, menunjukkan seberapa baik pembasahan antara masing-masing komponen. Semakin kecil perbedaan energi permukaannya, maka semakin baik pembasahannya, yang berarti nilai konduktivitas akan meningkat setelah melewati batas *percolation threshold*. Setelah melewati daerah *percolation threshold*, elektron dapat bergerak sepanjang jaringan acak dari polimer konduktif. Perbedaan yang signifikan antara konduktivitas dan konsentrasi dari polimer konduktif yang ditambahkan bisa dicapai ketika partikel konduktif berada pada fase terdispersi yang akan terbentuk agregasi atau koagulasi dari partikel polimer konduktif untuk membentuk jaringan konduktif yang menyediakan elektron bergerak didalam komposit.

Penambahan polimer konduktif *polyaniline* belum melewati batas *percolation threshold*. Apabila penambahan *polyaniline* melebihi batas *percolation threshold* tersebut, kenaikan nilai konduktivitas akan naik dengan peningkatan yang signifikan, yang artinya dengan penambahan *polyaniline* relatif sedikit, nilai konduktivitas listrik yang dihasilkan akan lebih besar, sesuai dengan Gambar 4.11 (a).



Gambar 4.11 Pengaruh Penambahan Bahan Pengisi terhadap Konduktivitas Listrik [24]

Berdasarkan foto SEM pada sampel pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg yang terlihat pada Gambar 4.11 (b), terlihat bahwa struktur *polyaniline* yang terbentuk terdapat dengan struktur tersendiri diantara *epoxy resin* dan grafit. Hal ini dapat meningkatkan nilai konduktivitas listrik dengan penambahan nilai yang kecil. Penambahan polimer konduktif bertujuan agar polimer konduktif yang ditambahkan (dalam hal ini *polyaniline*) dapat terdispersi dengan baik didalam struktur matriks polimer yang digunakan didalam material komposit, yaitu *epoxy resin*. Pendispersian *polyaniline* didalam matriks polimer *epoxy resin* menyebabkan *epoxy resin* yang tadinya bersifat insulator (tidak dapat menghantarkan arus listrik) dapat berubah menjadi konduktor (menghantarkan arus listrik dengan baik) [8].

Nilai konduktivitas dari suatu pelat bipolar juga dapat ditingkatkan dengan mengoptimalkan proses pencetakan pelat bipolar yang dilakukan sebelumnya. Variabel proses seperti temperatur dan tekanan pada mesin *hot press* yang digunakan dapat mempengaruhi nilai konduktivitas dari pelat bipolar [32]. Semakin besar tekanan dan semakin tinggi temperatur proses yang digunakan, nilai resistivitas dari pelat bipolar semakin menurun, dengan nilai resistivitas yang semakin menurun berarti nilai konduktivitasnya akan semakin meningkat. Penambahan tekanan dan temperatur yang diberikan dapat menyebabkan pelat bipolar yang dihasilkan semakin padat, sehingga

komponen-komponen penyusun dari pelat bipolar tersebut dapat menghantarkan elektron lebih baik.

4.3 Perbandingan Pelat Bipolar

Tabel 4.6 merupakan sifat dan karakteristik dari seluruh pelat bipolar yang dihasilkan pada penelitian yang dilakukan dengan variabel penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg, 100 mg, 150 mg dan 200 mg. Tabel 4.6 tersebut memberikan informasi mengenai penambahan *polyaniline* yang optimum terhadap sifat konduktivitas listrik, besarnya porositas, kekuatan fleksural dan nilai densitas dari pelat bipolar yang dihasilkan.

Tabel 4.6 Perbandingan Sifat Komposit Pelat Bipolar

Penambahan <i>Polyaniline</i> (mg)	Densitas (gr.cm ⁻³)	Porositas (%)	Kekuatan Fleksural (MPa)	Konduktivitas Listrik (S.cm ⁻¹)
0 [10]	1,79	1,64	25,73	0,295
50	1,83	0,34	19,19	0,23
100	1,75	0,37	12,27	0,24
150	1,80	0,42	18,37	0,27
200	1,81	0,48	19,07	0,293

Jika dilihat dari Tabel 4.6, pelat bipolar dengan penambahan 200 mg *polyaniline* memiliki sifat yang baik dibandingkan dengan pelat bipolar lainnya. Hal ini dikarenakan nilai konduktivitasnya lebih baik dibandingkan dengan pelat bipolar lainnya, dan kekuatan fleksuralnya pun cukup baik. Besarnya porositas juga kecil (tidak sampai angka 0,5 %). Terlihat dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg memiliki karakteristik akhir yang baik.

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 *polyaniline* sebanyak 50 mg, memiliki nilai densitas dan kekuatan fleksural paling besar, yaitu $1,827 \text{ gr/cm}^3$ dan $19,189 \text{ MPa}$ dan memiliki nilai konduktivitas yang paling kecil diantara pelat bipolar lainnya, yaitu $0,273 \text{ S/cm}$. Porositas yang dihasilkan juga paling kecil diantara pelat bipolar lainnya, yaitu sebesar $1,644 \%$.
2. Pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 100 mg memiliki densitas yang paling rendah sekitar $1,752 \text{ gr/cm}^3$ dan porositas $0,242 \%$. Kekuatan fleksural yang dimiliki merupakan kekuatan fleksural yang paling rendah, yaitu $12,267 \text{ MPa}$ dan konduktivitas yang dihasilkan lebih baik daripada pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 50 mg, yaitu $0,242 \text{ S/cm}$.
3. Pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 150 mg memiliki densitas sebesar $1,809 \text{ gr/cm}^3$ dan porositas sebesar $0,420 \%$. Kekuatan fleksural yang dihasilkan lebih baik daripada pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 100 mg, yaitu $18,374 \text{ MPa}$.
4. Komposisi pelat bipolar yang memiliki konduktivitas yang paling tinggi adalah pelat bipolar dengan penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg, yaitu sebesar $0,293 \text{ S/cm}$. Densitas yang dihasilkan sebesar $1,813 \text{ gr/cm}^3$ dan porositas sebesar $0,480 \%$. Sedangkan, kekuatan fleksuralnya cukup baik, yaitu sebesar $19,074 \text{ MPa}$.
5. Penambahan *polyaniline* terlalu sedikit (maksimal 200 mg). Namun pengaruhnya dapat terlihat pada penambahan *polyaniline* sebanyak 200 mg.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Stambouli, A. Boudghene. *Fuel cells, an alternative to standard sources of energy*. E.Traversa University of Roma 'Tor Vergata'. Department of Chemical Science and Technology. Roma, Italy. October 23rd 2001
- [2] Pusat Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral. *Statistik Ekonomi Energi Indonesia 2004*. Jakarta. 2004
- [3] EG & G Technical Services Inc. *Fuel Cell Handbook 7th Edition*. U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory. West Virginia, USA. October 2000
- [4] Chris Rayment & Scott Sherwin. *Introduction to Fuel Cell Technology*. Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame. Notre Dame, USA. May 2nd 2003
- [5] Ling Du. *Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*. May, 2008
- [6] Hugh , Dr. Mike. *Fuel Cell Today Portable Survey 2008*. April 2008
- [7] H. Tawfik, Y. Hunga, D. Mahajan. *Metal Bipolar Plates for PEM Fuel Cell—A Review*. September 27th 2006
- [8] Y. Wang. *Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. Chemical Engineering University of Waterloo, Ontario, Canada, 2006
- [9] Husaeni, Ihsan. *Penambahan Reinforcement MnO₂ pada Pembuatan Carbon Composite Bipolar Plate dengan Bahan Dasar Grafit Electric Arc Furnace*. Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Juni 2009
- [10] Sembiring, Gabriel. *Pembuatan Pelat Bipolar dengan Bahan Dasar Grafit Sintesis dan Polimer Epoxy, serta Penambahan Carbon Black untuk PEMFC*. Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. (dalam penelitian)
- [11] Hertz , Joshua. *Fuel Cells Fundamentals The Materials Science of Renewable Energy*. The Energy IAP 2006.



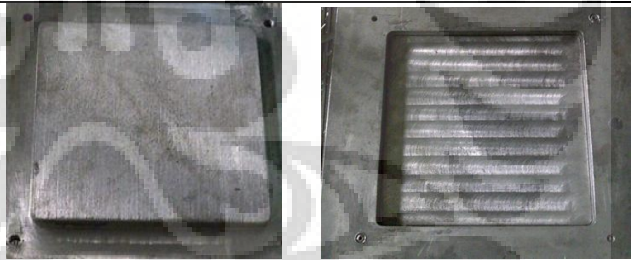

- [12] In Uk Hwanga, Ha Na Yua, Seong Su Kima, Dai Gil Leea, Jung Do Suhb, Sung Ho Leeb, Byung Ki Ahnb, Sae Hoon Kimb, TaeWon Limb. *Bipolar plate made of carbon fiber epoxy composite for polymer electrolyte membrane fuel cells*. Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Fuel Cell Vehicle Team 1, Advanced Technology Center, Corporate Research & Development Division, Hyundai-KIA Motors. Republic of Korea. June 20th 2008
- [13] Larminie, James and Dicks, Andrew. *Fuel Cell Systems Explained*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester. England. 2000
- [14] Mehta, Viral and Cooper, Joyce Smith. *Review and Anaylisis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing*. Department of Mechanical Engineering, University of Washington, Seattle, USA. September 3rd 2002
- [15] H. Jalani, Nikhil. *Development of Nanocomposite Polymer Electrolyte, Membranes for Higher Temperature PEM Fuel Cells*. Faculty of Worcester Polytechnic Institue. March 2006
- [16] 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*. Elsevier. 2004
- [17] Allen Hermanna, Tapas Chaudhuria, Priscila Spagnolb. *Bipolar plates for PEM fuel cells : A review*. Department of Physics, University of Colorado, National Renewable Energy Laboratory, Golden. USA. June 2nd 2005)
- [18] Xiao Zi Yuan, Haijiang Wang, JiuJun Zhang, David P. Wilkinson. *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells - From Materials to Processing*. National Research Council Canada, Institute for Fuel Cell Innovation, Vancouver, Department of Chemical and Biological Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC. Canada. February 8th 2006
- [19] Li, Xianguo and Sabir, Imran. *Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs*. Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, University Avenue West, Waterloo, Ontario. Canada. November 23th 2004
- [20] R.L. Borup, N.E. Vanderborgh. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **1995**


- [21] V. Mehta, J.S. Cooper. *Review and Analysis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing*. J.f Power Sources. 2003
- [22] Pratt, Colin. *Conduvting Materials*
- [23] A. Kanhegaokar, Shivkalyan. *Studies on Conducting Polymers Synthesis and Characterization of Conducting Polymer Blends*. Polymer Science & Engineering National Chemical Laboratory/ Pune. January 2004
- [24] Mamuya, Yevgen. *Electical Properties and Structure of Polymer Composites with Conductive Fillers*. Institute of Macromolecular Chemistry National Academy of Sciences of Ukraine Kiev. Ukraine
- [25] *ASM Handbook Volume 21 Composite*. ASM Internasional. 2001
- [26] Akovali, Güneri. *Handbook of Composite Fabrication*. RAPRA Technology Ltd. June 5th 2001
- [27] Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia MSc. *Diktat Kuliah Komposit*. Departemen Metalurgi & Material UI. Depok. 2009
- [28] Mattews and Rawlings. *Composite Material: Engineering and Science*. New York. 2005
- [29] Taylor and Francis. *Wood Thermoplastic Composites Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite*. D.F. Caulfield et al. 2005
- [30] K. Robberg, V. Trapp, in: W. Vielstich, H.A. Gasteiger, A. Lamm. *Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications..* Wiley & Sons. New York. 2003
- [31] T.M. Besmann, J.W. Klett, T.D. Burchellet. *Carbon/Carbon Composite Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel cell*. J.of Elec. Soc. 2000
- [32] H.S. Lee, H.J. Kim, S.G. Kim, S.H. Ahn. *Evaluation of graphite composite bipolar plate for PEM (proton exchange membrane) fuel cell: Electrical, mechanical, and molding properties*. School of Mechanical and Aerospace Engineering, National University, Institute of Advanced Machinery and Design, Seoul National University Seoul, South Korea
- [33] L. C. F. Blackman. *Modern Aspects of Graphite Technology*. Academic Press. NY, USA. 1970

- [34] Pratama, Renanto Prahastio. *Pembuatan dan Karakterisasi Pelat Bipolar Grafit dengan Aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat*. Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Juli 2009
- [35] Shu-Hang Liaoa, Chuan-Yu Yena, Cheng-Chih Wenga, Yu-Feng Lina, Chen-Chi M. Maa, Ching-Hung Yangb, Ming-Chi Tsai c, Ming-Yu Yena, Min-Chien Hsiaoa, Shuo-Jen Leed, Xiao-Feng Xiee, Yi-Hsiu Hsiaoa, *Preparation and properties of carbon nanotube/polypropylene nanocomposite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells*, Department of Chemical Engineering, National Tsing Hua University, Plastics Industry Development Center, Department of Engineering and System Science, National Tsing Hua University, Fuel Cell Center, Yuan Ze University, Institute of Nuclear and New Energy technology, Taiwan and *Beijing*. Juli 19th 2008
- [36] 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. July 26th 2005
- [37] <http://en.wikipedia.org> diakses pada 26 November 2009
- [38] Jan-Chan Huang. *Carbon Black Filled Conducting Polymers and Polymer Blends*. *Plastics*. Engineering Department, University of Massachusetts Lowell. Juni 18th, 2002
- [39] <http://www.efunda.com/> diakses pada 26 November 2009
- [40] A. Kanhegaokar, Shivkalyan. *Studies On Conducting Polymers Synthesis And Characterization Of Conducting Polymer Blends*. Bharati Vidyapeeth Pune (Deemed University), Division Of Polymer Science & Engineering. January 2004
- [41] D. Wells, Richard. *The Effects Of Adding Inherently Conductive Polymers To Silver-Filled Epoxies*. University Of Akron. December, 2006
- [42] A. Skotheim, Terje and R.Reynolds, John. *Handbook of Conducting Polymers Third Edition : Conjugated Polymers Processing and Applications*. CRC Press. US. 2007



- [43] Panayota Tsotra, Oleg Gryshchuk, Klaus Friedrich. *Morphological Studies of Epoxy/Polyaniline Blends*. Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW), University of Kaiserslautern. 2005
- [44] Orest L. Adrianowycz et al., *Presentation: Flexible Graphite Resin Composite Bipolar Plates for High Temperature High Energy Density PEM Fuel Cells*, GrafTech International
- [45] Chow CY, Wozniczka B, Chan JKK. *Integrated reactant and coolant fluid flow field layer for a fuel cell with membrane electrode assembly*.
- [46] Suhandi, A, N. Indayaningsih, B. Prihandoko, A. Subhan. *Research on PEMFC Graphite Composite Bipolar Plate Influenced by Composition of Filler and Binder*. Research Centre of Physics – Indonesia Institute of Sciences. 2009
- [47] Zulfia, Anne. *Pressureless Infiltration of Aluminium Matrix Composite*. November 2000.

Lampiran 1 Peralatan Preparasi Sampel

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

<p><i>Mesin Hot Press</i></p>	
-------------------------------	--

Lampiran 2 Peralatan Pengujian Karakterisasi

Nama Alat	Foto Alat
<p><i>Conductivity Four Point Probe Test Machine</i></p>	
<p><i>Universal Testing Machine</i></p>	

Scanning Electron Microscope



Ultrasonic Cleaner




Dryer



Oven



Lampiran 3 Spesifikasi Epoxy



Technical Information

EP

Bakelite® EPR 174

Unmodified, liquid standard epoxy resin based on Bisphenol-A

Characteristics

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

Curing agent

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

Applications

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

Shelf Life

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

Precautions

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

P.T. JUSTUS KIMARAYA
 JAKARTA

Lampiran 4 Spesifikasi *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 Kimiatu
JAKARTA

Lampiran 5 Spesifikasi Metanol dan *Toluene*

Metanol

Formula	CH ₃ OH
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

Toluene

Formula	C ₇ H ₈ atau C ₆ H ₆ CH ₃
Massa Molar	92,14 g/mol
Penampakan	Cairan tidak berwarna
Densitas	0,8669 g/mL
Titik Leleh	-93 ⁰ C
Titik Didih	110,6 ⁰ C
Kelaruan di dalam Air	0,47 g/l (20 – 25 ⁰ C)
Viskositas	0,590 cP pada 20 ⁰ C

Lampiran 6 Spesifikasi Grafit Sintesis dan *Polyaniline*

Grafit Sintesis

Formula	C
Struktur Kristal	Heksagonal
Kekerasan (vickers)	VHN ₁₀ = 7 – 11 kg/mm ²
Densitas	2,26 g/cm ³
Modulus Elastis	4,80 Gpa
Massa Molekul	12,011 g/mol
Area Permukaan	1,00 m ² /g
Kemurnian	>99,5 % C
Ukuran Bubuk	50 μm

Polyaniline

Struktur	<i>Emeraldine Base</i>
Berat Molekul	20.000 g/mol
Titik Leleh	400 ⁰ C
Hal yang Haus Diperhatikan	Sensitif terhadap udara dan dianjurkan disimpan dalam gas <i>inert</i>

Lampiran 7 Hasil Perhitungan Sudut Kontak

> Penambahan *Polyaniilne* sebanyak 50 mg

$$h = 2,5 \text{ mm}$$

$$r = 7 \text{ mm}$$

$$\theta = 19,65^{\circ}$$

> Penambahan *Polyaniilne* sebanyak 100 mg

$$h = 3 \text{ mm}$$

$$r = 8 \text{ mm}$$

$$\theta = 20,56^{\circ}$$

> Penambahan *Polyaniilne* sebanyak 150 mg

$$h = 1,8 \text{ mm}$$

$$r = 6 \text{ mm}$$

$$\theta = 16,70^{\circ}$$

> Penambahan *Polyaniilne* sebanyak 200 mg

$$h = 2 \text{ mm}$$

$$r = 7 \text{ mm}$$

$$\theta = 15,94^{\circ}$$

Lampiran 8 Hasil Pengujian Densitas

Sampel		A (Udara) (gr)	B (Air) (gr)	A-B (gr)	ρ air (gr/cm ³)		Densitas (gr/cm ³)	Densitas rata2 (gr/cm ³)
<i>Polyaniline</i> 50 mg	I	3,100	1,224	1,876	0.996089		1,829	1.827
	II	2,910	1,325	1,585	0.996089	T =	1,827	
	III	2,911	1,321	1,590	0.996089	28.0 ⁰ C	1.824	
<i>Polyaniline</i> 100 mg	I	2,618	1,131	1,487	0.996089		1,754	1,752
	II	2,595	1,118	1,477	0.996089	T =	1,749	
	III	2,802	1,210	1,592	0.996089	28.0 ⁰ C	1,753	
<i>Polyaniline</i> 150 mg	I	3.850	1.730	2,120	0.996089		1,806	1,809
	II	3.650	1.640	2,010	0.996089	T =	1,808	
	III	3.980	1.790	2,190	0.996089	28.0 ⁰ C	1,812	
<i>Polyaniline</i> 200 mg	I	3,247	1,459	1,788	0.996089		1,809	1,812
	II	3,909	1,764	2,134	0.996089	T =	1,815	
	III	3,298	1,487	1,811	0.996089	28.0 ⁰ C	1,814	

Lampiran 9 Hasil Pengujian Porositas

Sampel		D (gr)	S (gr)	Sw (gr)	Sw-D (gr)	D-S (gr)	Porositas (%)	Porositas rata2 (%)
<i>Polyaniline</i> 50 mg	I	2,679	1,225	2,685	0,006	1,454	0,351	0,344
	II	2,903	1,323	2,908	0,005	1,580	0,342	
	III	2,823	1,290	2,828	0,005	1,533	0,339	
<i>Polyaniline</i> 100 mg	I	2,723	1,182	2,728	0,005	1,541	0,325	0,371
	II	2,335	1,010	2,341	0,006	1,325	0,453	
	III	2,783	1,199	2,788	0,005	1,584	0,335	
<i>Polyaniline</i> 150 mg	I	2,814	1,273	2,820	0,006	1,541	0,435	0,420
	II	3,005	1,363	3,012	0,006	1,642	0,457	
	III	2,591	1,175	2,597	0,006	1,416	0,452	
<i>Polyaniline</i> 200 mg	I	3,235	1,471	3,244	0,006	1,764	0,476	0,480
	II	3,896	1,771	3,906	0,010	2,125	0,447	
	III	3,543	1,612	3,553	0,010	1,931	0,518	

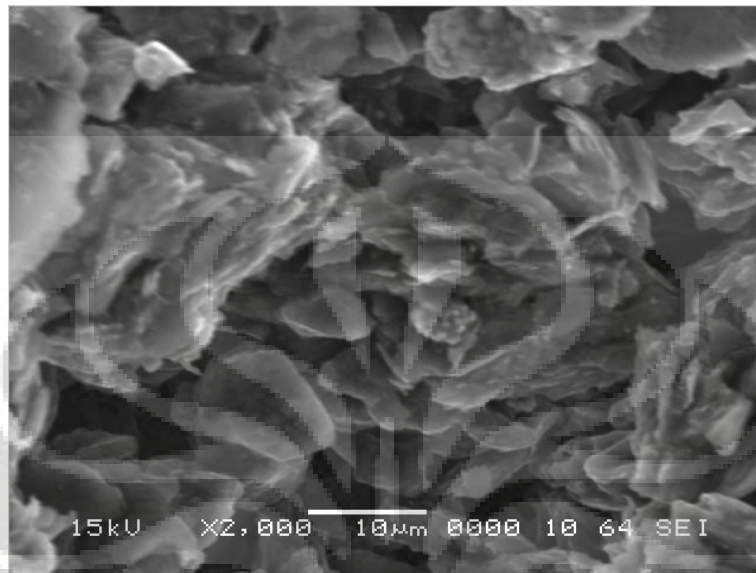
Lampiran 10 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik

Sam pel	Epoxy (%)	<i>Polyaniline</i> (mg)	Grafit Sintetis (%)	Resistivitas ($\Omega \text{ cm}^{-1}$)	Konduktivitas (S cm)	Konduktivitas Rata2 (S cm)
I	20	50		5,40	0,185	0,231
II	20	50	74,969	4,28	0,234	
III	20	50		3,64	0,274	
I	20	100		4,22	0,237	0,242
II	20	100	74,939	4,48	0,223	
III	20	100		3,76	0,266	
I	20	150		3,62	0,276	0,268
II	20	150	74,909	3,73	0,268	
III	20	150		3,86	0,259	
I	20	200		2,63	0,380	0,293
II	20	200	74,879	3,89	0,257	
III	20	200		4,12	0,243	

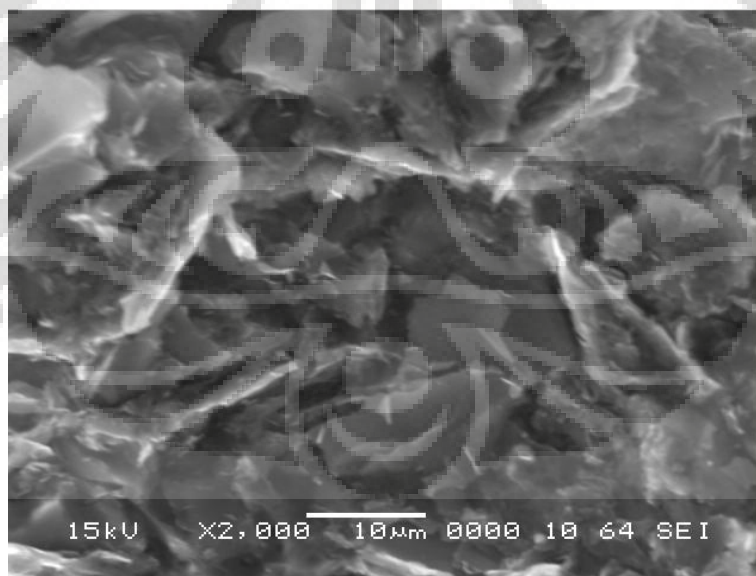
Lampiran 11 Hasil Pengujian Fleksural

Sampel		b (mm)	d (mm)	L (mm)	P (N)	σ_f (MPa)	σ_f rata2 (MPa)
<i>Polyaniline</i> 50 mg	I	14,9	4.00	64	44,8	18,040	19,189
	II	16,9	4.10	64	59,2	20,005	
	III	17	3.60	64	44,8	19,521	
<i>Polyaniline</i> 100 mg	I	15,4	4.00	64	33,6	13,091	12,267
	II	13,9	4.30	64	30,4	11,355	
	III	16,1	4.00	64	36,8	13,714	
<i>Polyaniline</i> 150 mg	I	16,0	4	64	46,4	17,400	18,374
	II	15,7	3,2	64	30,4	18,153	
	III	17,2	3,7	64	48	19,570	
<i>Polyaniline</i> 200 mg	I	15,5	4,3	64	59,2	19,830	19,074
	II	15,9	4	64	51,2	19,321	
	III	17	4	64	51,2	18,071	

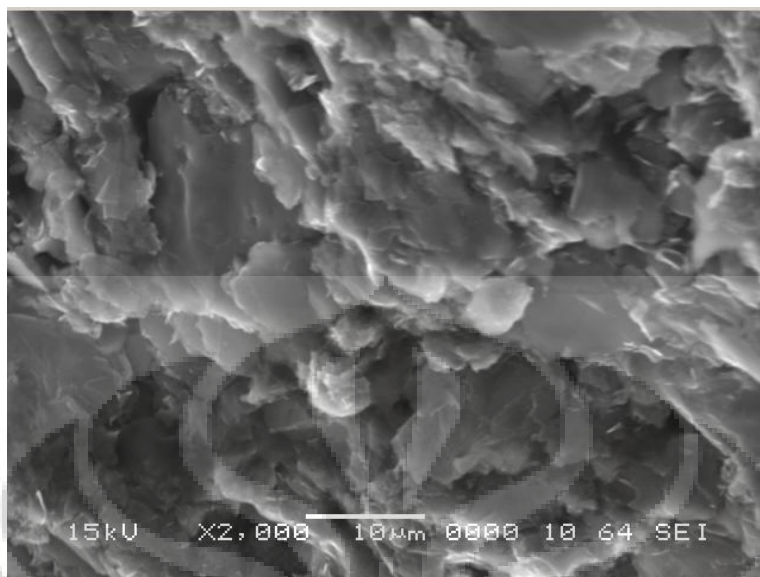
Lampiran 12 Hasil Pengamatan SEM



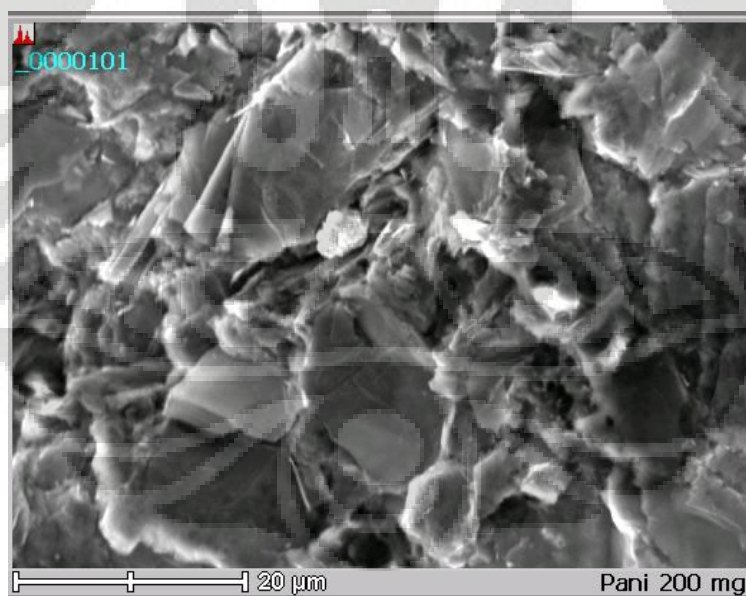
Polyaniline 50 mg



Polyaniline 100 mg

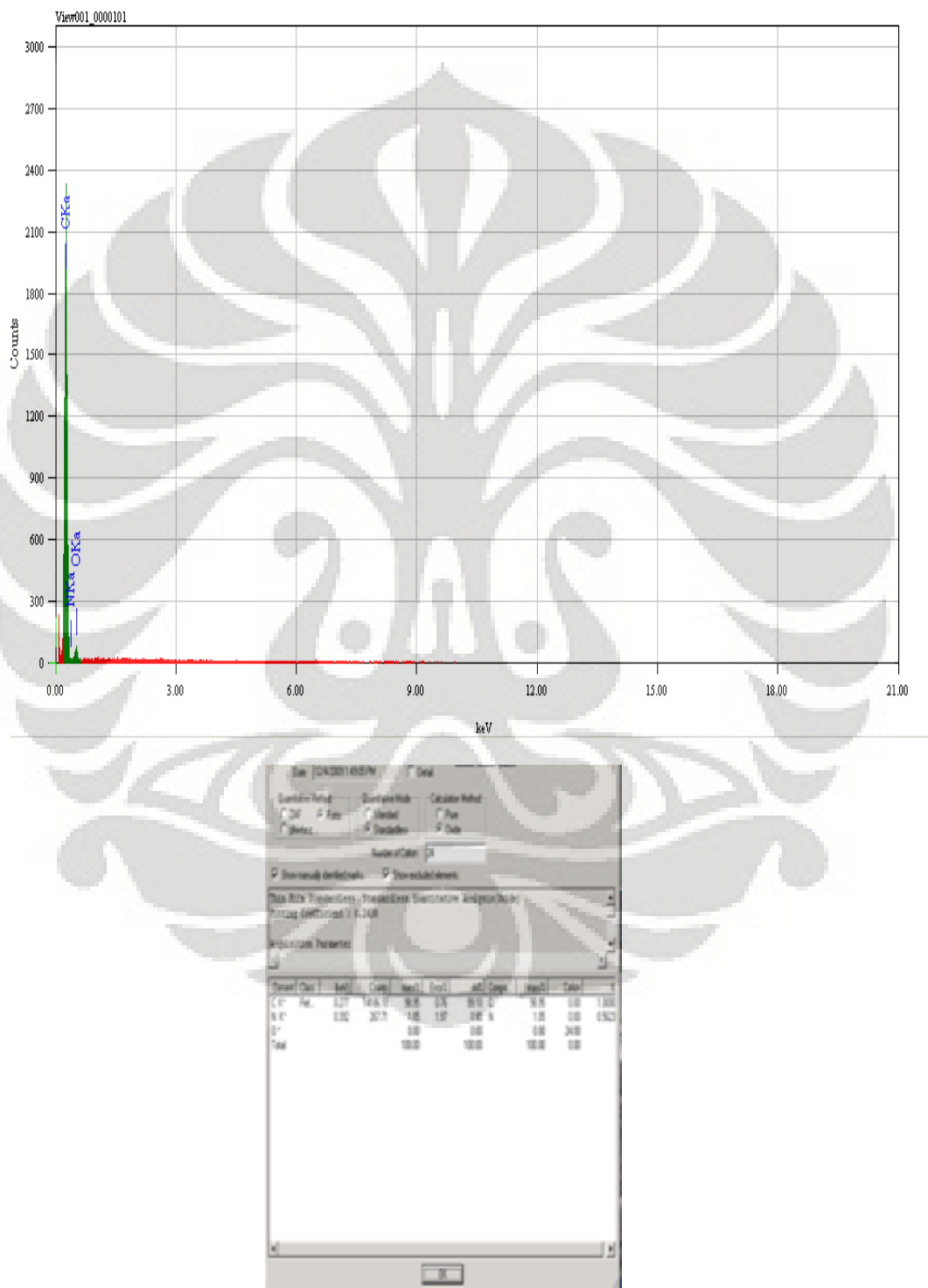


Polyaniline 150 mg



Polyaniline 200 mg

Lampiran 13 Hasil Pengujian EDS



Lampiran 14 Tabel Bashforth dan Adams



Lampiran 15 Tabel Densitas Air (simetric.co.uk)

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