



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN 0-10 wt.% CARBON BLACK
TERHADAP KARAKTERISASI KOMPOSIT EPOXY/GRAFIT
SINTETIS SEBAGAI MATERIAL PELAT BIPOLAR *POLYMER
ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL***

SKRIPSI

GABRIEL SEMBIRING

0606074893

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

DESEMBER 2009



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN 0-10 wt.% CARBON BLACK
TERHADAP KARAKTERISASI KOMPOSIT EPOXY/GRAFIT
SINTETIS SEBAGAI MATERIAL PELAT BIPOLAR *POLYMER
ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

GABRIEL SEMBIRING

0606074893

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

DESEMBER 2009

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Gabriel Sembiring

NPM : 0606074893

Tanda Tangan :

Tanggal : 22 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Gabriel Sembiring
NPM : 0606074893
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Penambahan 0-10 wt.% Carbon Black Terhadap Karakterisasi Komposit Epoxy/Grafit Sintetis Sebagai Material Pelat Bipolar *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Ir. Yunita Sadeli, M.Sc. ()
Pembimbing 2 : Dr. Ir. Bambang Prihandoko, MT ()
Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M. Phil.Eng. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 22 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan karunia-Nya lah penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan tepat waktu. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Teknik dari Departemen Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis sangat sadar bahwa tanpa adanya dukungan, pertolongan dan bimbingan dari berbagai pihak, maka proses pembuatan skripsi ini mungkin akan sulit diselesaikan. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Yunita Sadeli, M.Sc selaku dosen pembimbing dari Departemen Metalurgi dan Material yang telah rela meluangkan waktu, tenaga, pikiran serta bantuan lain baik dorongan moril maupun materil.
2. Bpk. Dr. Ir. Bambang Prihandoko, MT sebagai pembimbing dari Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang banyak membantu dan membimbing penulis dalam penelitian ini.
3. Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M. Phil.Eng selaku dosen yang juga banyak membantu dan memberi masukan yang berharga dalam penelitian ini.
4. Kedua orang tua penulis dan keluarga besar penulis yang selalu mendoakan dan memberikan semangat, doa, dan motivasi sehingga skripsi ini selesai disusun.
5. Beringin.S, Dania.F, Farah.F, Kenya Diestha, dan Rio.K selaku teman satu kelompok dalam penelitian ini.
6. Pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

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

Depok, 22 Desember 2009

Penulis

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

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

Nama : Gabriel Sembiring
NPM : 0606074893
Program Studi : Metalurgi & Material
Departemen : Metalurgi & Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

Pengaruh Penambahan 0-10 wt.% Carbon Black Terhadap Karakterisasi Komposit
Epoxy/Grafit Sintetis Sebagai Material Pelat Bipolar *Polymer Electrolyte
Membrane Fuel Cell*

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 22 Desember 2009

Yang menyatakan

(Gabriel Sembiring)

ABSTRAK

Nama : Gabriel Sembiring
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Penambahan 0-10 wt.% Carbon Black Terhadap Karakterisasi Komposit Epoxy/Grafit Sintetis Sebagai Material Pelat Bipolar *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*

Fuel cell adalah suatu alat konversi energi elektrokimia yang mengubah energi kimia (gas H₂ dan O₂) menjadi energi listrik sebagai hasil utama. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang sedang banyak dikembangkan karena memiliki banyak keunggulan seperti, temperatur operasi yang relatif rendah, *power density* yang tinggi, emisi gas buang yang rendah, serta energi yang efisien. Bagian penting dari sistem PEMFC adalah pelat bipolar yang merupakan komponen yang memberikan kontribusi berat dan volume yang tinggi mencapai 80% dari berat *fuel cell* secara keseluruhan. Oleh karena itu, sangat perlu dilakukan suatu rekayasa dengan material komposit yang massa jenisnya ringan namun juga memiliki sifat mekanis dan konduktivitas yang baik.

Penelitian ini bertujuan untuk merekayasa pelat bipolar tersebut dengan menggunakan bahan utama grafit sintetis, polimer termoset *epoxy*, serta penambahan *carbon black* dengan komposisi variabel 0-10%. Pembuatan pelat bipolar ini dilakukan dengan proses *hot press* sebesar 300 kg/cm² dan temperatur 70°C selama 4 jam dengan cetakan yang berukuran panjang 15 cm, lebar 15 cm, dan tebal 4-5 mm. Setelah dilakukan karakterisasi, maka pelat bipolar ini menghasilkan sifat-sifat yang optimal pada penambahan CB 5%, yaitu kekuatan fleksural 25.726 MPa, konduktivitas 0.295 S/cm, densitas 1.788 gr/cm³, serta porositas 1.644%. Hasil ini masih bisa ditingkatkan terutama nilai konduktivitas pada pelat bipolar tersebut, sehingga diharapkan mampu digunakan sebagai pelat bipolar pada sistem *fuel cell* untuk sumber energi masa depan.

Kata Kunci: *Fuel Cell*, komposit, pelat bipolar, konduktivitas, grafit sintetis, *carbon black*

ABSTRACT

Nama : Gabriel Sembiring

Program Studi : Metallurgy and Materials Engineering

Judul : The Effect of 0-10 wt.% Addition of Carbon Black to The Characteristics of Synthetic Graphite/Epoxy Composite as Bipolar Plate Material of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

Fuel cell is an electrochemical energy conversion device that changes chemical energy (H_2 and O_2 gas) to electrical energy as the primary outcome. Polymer electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) is one type of fuel cell being developed because it has many advantages such as operating temperature is relatively low, high power density, emissions are low, and energy efficient. An important part of the PEMFC system is the bipolar plate is a component that contributes to weight and high volume reaches 80% of the weight of the fuel cell as a whole. Therefore, is very necessary to an engineering with composite materials with a minor density but also has good mechanical properties and conductivity.

This research aims to reverse the bipolar plate by using the main material of synthetic graphite, thermosetting epoxy polymers, and the addition of carbon black with variable composition of 0-10%. Bipolar plate manufacturing is done by hot press process with 300 kg/cm^2 pressure and temperature of 70°C for 4 hours by using a mold measuring 15 cm long, 15 cm wide, and 4-5 mm thick. After a characterization, the bipolar plate has the properties of the optimal addition of carbon black at 5%, i.e flexural strength 25.726 MPa, conductivity 0.295 S / cm , density 1.788 gr/cm^3 , and porosity 1.644%. These results could still be improved, especially the value of conductivity of the bipolar plate, so that was expected to be used as bipolar plates in fuel cell systems for future energy sources.

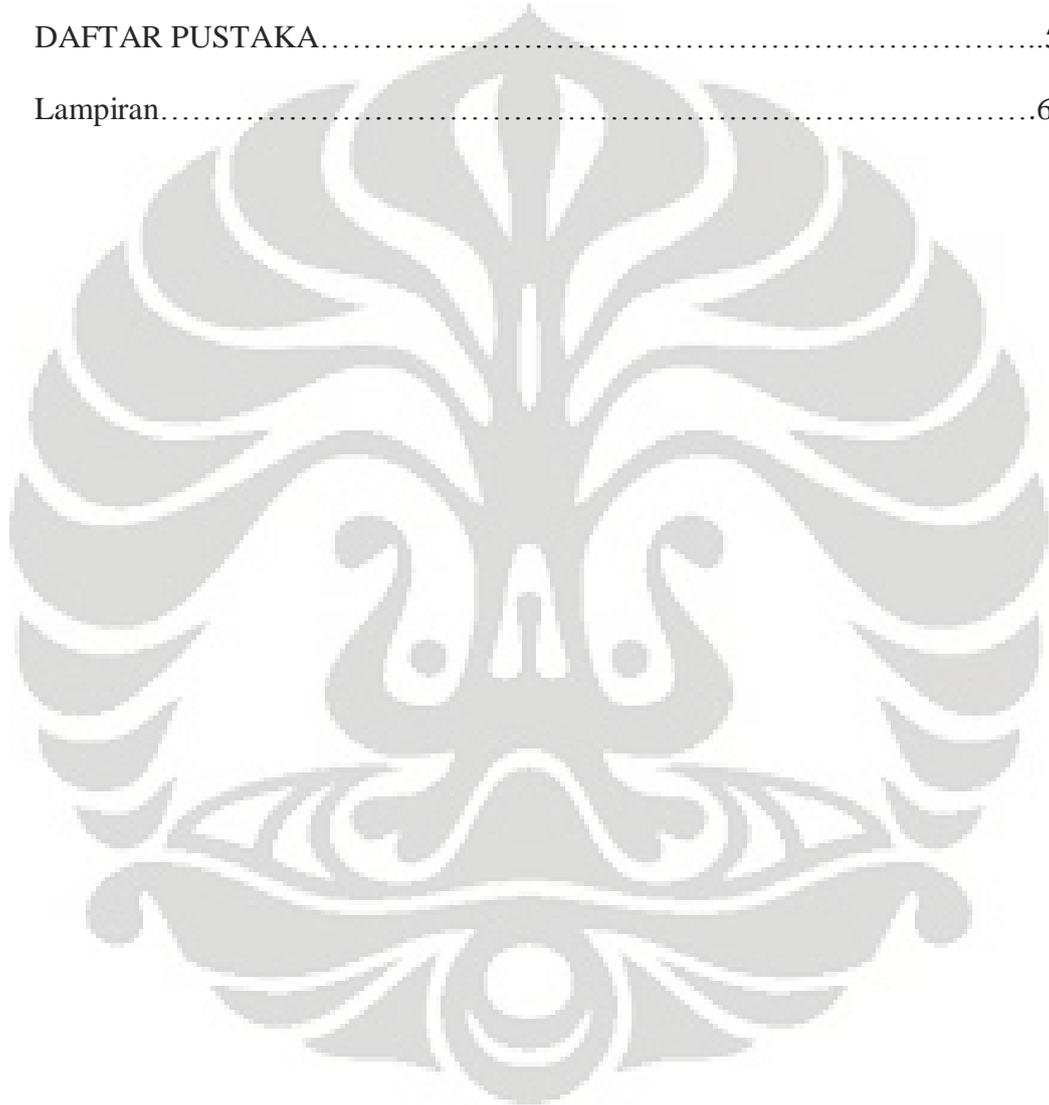
Keywords: Fuel Cell, composite, bipolar plates, electrical conductivity, synthetic graphite, carbon black.

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
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II DASAR TEORI.....	7
2.1 Fuel Cell (Sel Bahan Bakar).....	7
2.2 Jenis Fuel Cell.....	10
2.3 PEMFC.....	11
2.4 Pelat Bipolar.....	15
2.4.1 Epoxy.....	20

2.4.2 Grafit.....	21
2.4.3 Carbon Black.....	23
2.5 Komposit.....	25
BAB III METODELOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	31
3.2 Alat dan Bahan.....	32
3.2.1 Alat.....	32
3.2.2 Bahan.....	33
3.2.2.1 Epoxy Resin & Epoxy Hardener.....	33
3.2.2.2 Grafit Sintetis.....	34
3.2.2.3 Carbon Black.....	34
3.2.2.4 Metanol.....	35
3.3 Prosedur Penelitian.....	35
3.3.1 Pembuatan Pelat.....	35
3.3.2 Preparasi Sampel Pengujian.....	37
3.3.3 Karakterisasi Material.....	38
3.3.3.1 Pengujian Porositas.....	38
3.3.3.2 Pengujian Densitas.....	38
3.3.3.3 Pengujian Kekuatan Fleksural.....	39
3.3.3.4 Pengujian Konduktivitas.....	41
3.3.4 Pengujian <i>Sesille</i> (sudut kontak).....	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1 Hasil Pengamatan Sudut Kontak.....	45
4.2 Hasil Pengamatan Visual Pelat Bipolar.....	47
4.3 Pengujian Densitas.....	48

4.4 Pengujian Porositas.....	51
4.4 Pengujian Konduktivitas.....	52
4.5 Pengujian Fleksural.....	55
4.6 Perbandingan Sifat Pelat Bipolar.....	56
BAB V KESIMPULAN.....	58
DAFTAR PUSTAKA.....	59
Lampiran.....	63



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Operasi dasar Sel Bahan Bakar.....	7
Gambar 2.2	Skema Sel Bahan Bakar (<i>Fuel Cell</i>).....	10
Gambar 2.3	Bagan <i>single cell PEMFC</i> dengan detail elektroda positif, katalis dan Gas Diffusion Layer (GDL).....	13
Gambar 2.4	Diagram kerja <i>Fuel Cell</i> jenis PEMFC.....	15
Gambar 2.5	Pelat Bipolar dengan <i>Gas Flow Channels</i>	17
Gambar 2.6	Material Penyusun Pelat Bipolar Pada Umumnya.....	17
Gambar 2.7	Struktur reaksi <i>Curing</i> resin epoxy dengan hardener.....	21
Gambar 2.8	Struktur kristal Grafit	23
Gambar 2.9	Morfologi dari <i>carbon black</i>	25
Gambar 2.10	<i>Filler Reinforce Composite</i>	27
Gambar 2.11	Fenomena <i>interface</i> pada komposit.....	28
Gambar 2.12	Hasil <i>wettability</i> komposit dengan <i>contact angle</i>	28
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	31
Gambar 3.2	<i>Carbon black</i>	34
Gambar 3.3	(a) Hasil <i>mixing</i> serbuk komposit; (b) Peletakan serbuk komposit dalam cetakan; (c) Proses <i>hot press</i> dengan <i>hydraulic pressure machine</i> ; (d) Alat <i>Hot Plate</i>	37
Gambar 3.4	Skema Pengujian Kekuatan Fleksural.....	40
Gambar 3.5	(a) Alat pengujian Kekuatan Lentur; (b) Peletakan spesimen uji.....	40
Gambar 3.6	Skema Uji Konduktivitas.....	41
Gambar 3.7	Alat Uji Konduktivitas.....	42
Gambar 3.8	(a) Skematik Perhitungan Sudut Kontak untuk <i>Non-Wetting</i> ; (b) Pembasahan <i>Sessile Drops</i>	43
Gambar 3.9	Skematik Perhitungan Sudut Kontak untuk <i>Good Wetting</i>	44
Gambar 4.1	Hasil Pengujian Sudut Kontak Pelat Bipolar	45
Gambar 4.2	Hasil Pencetakan Pelat Bipolar	47

Gambar 4.3	Peletakan Serbuk Komposit (hasil <i>mixing</i>) kedalam Cetakan.....	49
Gambar 4.4	Grafik Hasil Pengujian Densitas.....	47
Gambar 4.5	Grafik Hasil Pengujian Porositas	51
Gambar 4.6	Grafik Hasil Pengujian Konduktivitas.....	53
Gambar 4.7	Grafik Hasil Pengujian Fleksural.....	55

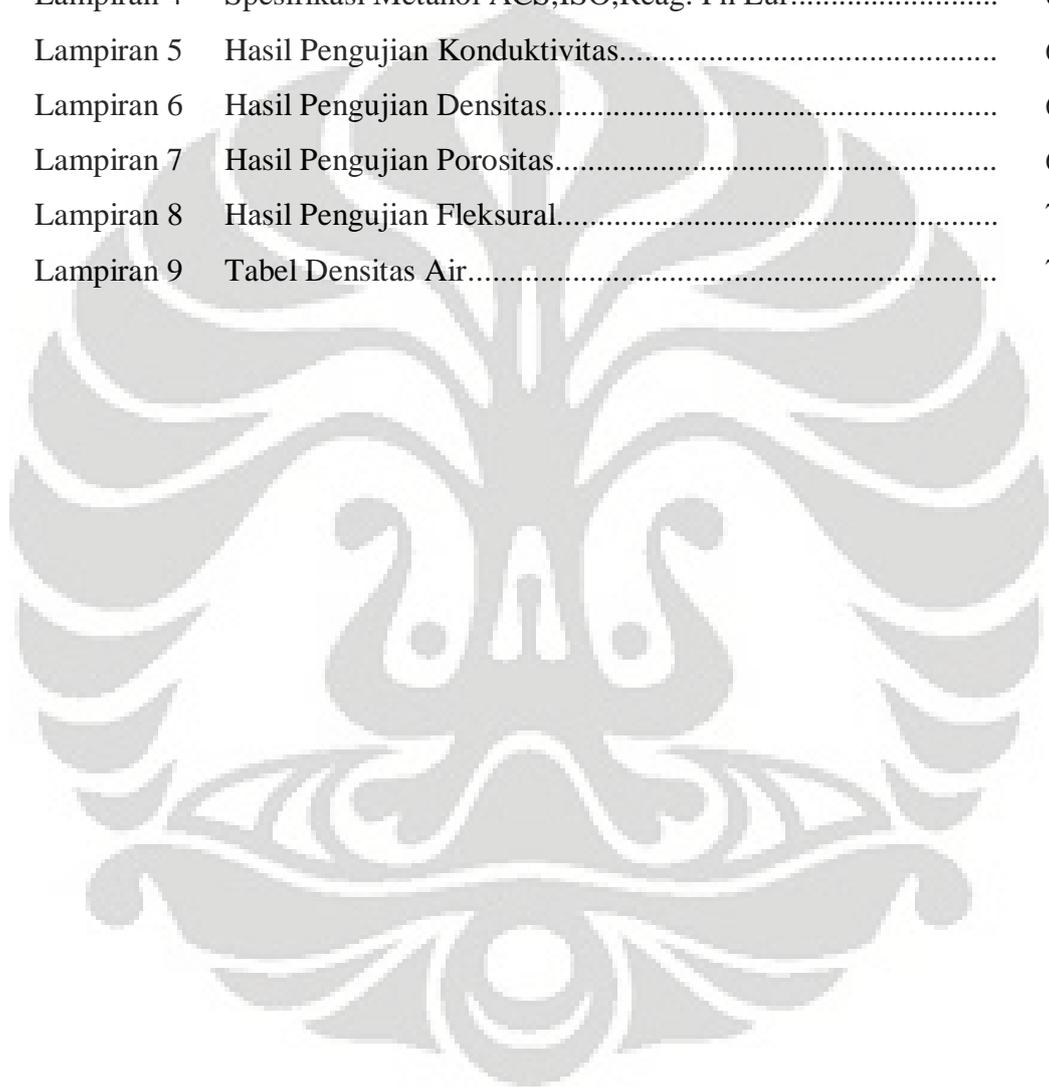


DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Energi yang Dihasilkan oleh Bahan Bakar	9
Tabel 2.2	Jenis-Jenis <i>Fuel Cell</i>	11
Tabel 2.3	Fungsi dan Material Komponen dalam PEMFC	14
Tabel 2.4	Kriteria Pelat Bipolar yang baik.....	16
Tabel 2.5	Target DOE Untuk Pelat Bipolar	19
Tabel 2.6	Sifat-sifat umum dari Grafit.....	23
Tabel 2.7	Sifat komposit yang dipengaruhi oleh <i>interface</i>	27
Tabel 3.1	Komposisi dan kode seluruh sampel yang diteliti.....	33
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Densitas.....	49
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Porositas.....	51
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Konduktivitas.....	53
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Fleksural.....	55
Tabel 4.5	Perbandingan Sifat Bipolar	56

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Spesifikasi Epoxy resin dan Hardener Eposchon.....	63
Lampiran 2	Spesifikasi Grafit Sintetis MERCK	64
Lampiran 3	Spesifikasi Carbon Black.....	65
Lampiran 4	Spesifikasi Metanol ACS,ISO,Reag. Ph Eur.....	66
Lampiran 5	Hasil Pengujian Konduktivitas.....	67
Lampiran 6	Hasil Pengujian Densitas.....	68
Lampiran 7	Hasil Pengujian Porositas.....	69
Lampiran 8	Hasil Pengujian Fleksural.....	70
Lampiran 9	Tabel Densitas Air.....	71



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada zaman yang semakin maju dan modern ini kebutuhan manusia dalam mengonsumsi energi akan semakin meningkat. Tentu kita masih ingat bagaimana evolusi energi listrik terjadi hingga seperti sekarang. Salah satu tahapnya adalah penggunaan *accumulator* atau yang biasa kita sebut sebagai accu atau aki. Alat penghasil listrik ini dulu sering kita jumpai sebagai penghidup televisi. Namun kenyataannya kebutuhan energi tersebut masih dirasa kurang cukup dan juga tidak didukung dengan jumlah energi yang ada di bumi yang semakin menipis, khususnya bahan bakar fosil dan minyak. Oleh karena itu, sangat dibutuhkan suatu energi baru yang murah dan efisien untuk diproduksi dan dijadikan energi alternatif guna menanggulangi kebutuhan energi yang semakin tipis tersebut. Salah satu energi alternatif yang potensial dan sedang ramai dikembangkan adalah *Fuel Cell* atau sel bahan bakar. Energi alternatif ini sangat berguna untuk memenuhi berbagai kebutuhan energi masa depan. *Fuel Cell* memiliki kelebihan-kelebihan dibandingkan dengan energi alternatif lainnya terutama dari segi efisiensi, portabilitas, kebisingan yang rendah, dan emisi yang dihasilkan [1].

Fuel Cell merupakan energi alternatif yang sangat ramah lingkungan. Hal ini dikarenakan dalam aplikasinya tidak dibutuhkan suatu reaksi pembakaran yang dapat menghasilkan gas atau emisi gas buang yang berbahaya seperti energi alternatif pada umumnya. *Fuel Cell* dapat bekerja hanya membutuhkan sumber gas Hidrogen (H_2) dan menghasilkan energi listrik sebagai sumber utama, air dan panas hasil sampingan [1]. Gas hidrogen cukup melimpah di bumi ini keberadaannya dan terikat sebagai senyawa oksida. Gas Hidrogen mempunyai kandungan energi per satuan berat tertinggi di antara berbagai jenis bahan bakar, maka dari itu *fuel cell* merupakan energi alternatif yang cukup murah, efisien, dan sangat menjanjikan di masa depan. Teknologi ini biasanya digunakan pada kendaraan bermotor, telepon selular, komputer, alat rumah tangga maupun pembangkit listrik (*power plant*) [2].

Prinsip kerja *fuel cell* adalah mengubah energi kimia dalam hal ini gas H_2 dan O_2 menjadi energi listrik, air, dan panas dengan menggunakan suatu media elektrolit. Perkembangan teknologi *fuel cell* ini baru dimulai sejak seorang berkebangsaan Inggris yang bernama *Sir William Robert Grove*, manusia pertama pembuat alat sederhana *fuel cell*. Karirnya dalam bidang ilmu pengetahuan dimulai sejak dia membuat *voltaic battery* yang dijelaskannya pada pertemuan *The British Association for the Advancement of Science* di tahun 1839. *Fuel Cell* yang dibuatnya terdiri atas elektrolit asam, keping platina serta tabung gas oksigen dan hidrogen, dan menggunakan prinsip reaksi balik terbentuknya air, di mana hidrogen dan oksigen akan bereaksi dalam larutan asam dan menghasilkan air dan listrik dengan arus sebesar 12 ampere dan tegangan 1,8 volt. Sel ini kemudian disebut sebagai *Grove`s Battery* atau baterai *Grove* [3].

Sejak saat itu baterai *Grove* banyak digunakan. Akan tetapi, karena listrik yang dihasilkan sedikit dan tidak mencukupi lagi untuk kebutuhan listrik yang semakin besar, lambat laun sel *Grove* mulai tergeser. Namun, sel *Grove* tetap menjadi dasar acuan pengembangan *fuel cell* selanjutnya. Pada tahun 1930 seorang pria berkebangsaan Inggris lulusan *Cambridge University* Francis Bacon (1904-1992), menemukan jenis *fuel cell* yang menggunakan elektrolit basa (KOH), yang kemudian disebut *alkaline fuel cell* (*Fuel Cell* tipe basa). Kemudian pada tahun 1950, sebuah perusahaan di Amerika, *General Electric* (GE), juga mengembangkan *fuel cell* tipe baru, yang disebut PEMFC dengan polimer membran sebagai elektrolitnya [2]. PEMFC yang ditemukan oleh GE memiliki keunggulan pada disain, lebih *compact*, dan mampu menghasilkan energi sekitar 1 kW.

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) adalah salah satu sumber energi bersih dan menjanjikan yang sedang marak dikembangkan. Kelebihan utamanya adalah efisiensi arus yang bisa mencapai 60%, densitas energi yang tinggi, serta kemampuan untuk mengolah bahan bakar tanpa adanya polutan yang dihasilkan [4]. Lalu kelebihan lain dari PEMFC temperatur aplikasi yang relatif rendah, suplai bahan bakar yang baik, dan waktu pakai yang panjang. Meskipun memiliki keunggulan-keunggulan yang cukup banyak, perluasan pengembangan PEMFC di masyarakat dunia saat ini dibatasi oleh masalah harga

dan reliabilitas. Selama ini penelitian dan pengembangan yang lebih luas untuk meningkatkan kemampuan katalis dan membran, juga studi mengenai sifat dan perilaku *Fuel Cell* tidak mendapatkan hasil yang begitu memuaskan. Oleh karena permasalahan tersebut maka target penggunaan dan komersialisasi *Fuel Cell* secara luas, termasuk aplikasi pada fasilitas transportasi, ditunda dari tahun 2010 menjadi tahun 2015. Hal ini disebabkan karena masih banyak persoalan pasar dan teknis yang harus diselesaikan. Tantangan untuk para peneliti dan pengembang *Fuel Cell* adalah bagaimana cara menentukan sumber bahan bakar yang tepat, regulasi industri, faktor keamanan, dan dukungan masyarakat yang sangat diperlukan [4].

Salah satu faktor penyebab tingginya biaya produksi PEMFC adalah *bipolar plate* yang beratnya mencapai 80-90% berat dan volume, serta keseluruhan penyebab peningkatan harga produksi PEMFC itu sendiri hingga 60% [5]. Dari hal itu berarti dengan memodifikasi berat, volume menjadi lebih ringan dan lebih kecil, serta pembuatan desain yang lebih baik, dan proses *manufacturing* yang lebih mudah dapat mengurangi harga produksinya. Selain diperlukan penggunaan bahan baku yang ringan dan murah, perlu juga diperhatikan proses fabrikasi komposit pelat bipolar yang sederhana, cepat, dan murah. Salah satu metode pembuatan komposit pelat bipolar yang memenuhi syarat tersebut adalah dengan metoda *hot blending dan compression molding* [6].

Pada penelitian ini ingin dicari dan dikembangkan suatu komposisi dasar dari pelat bipolar yang berbasiskan polimer yang lebih ringan dan murah, yaitu komposit polimer termoset *epoxy* dengan menggunakan grafit sintesis sebagai penguat (*reinforcement*), serta penambahan *filler carbon black* (karbon hitam). Komposit polimer-karbon ini memiliki keunggulan terutama masalah berat yang relatif lebih ringan. Penggunaan grafit serta *carbon black* yang memiliki kualitas tinggi akan sangat mendukung performa dari komposit pelat bipolar yang diharapkan dapat menghasilkan sifat-sifat yang baik, seperti sifat mekanik dan sifat elektrik (konduktivitas), dan lain-lain.

1.2 Perumusan Masalah

Problem yang terdapat pada pembuatan pelat bipolar ini adalah sulitnya untuk menemukan komposisi dasar yang optimal untuk mendapatkan grafit pelat bipolar komposit yang memiliki konduktivitas yang tinggi dan sifat mekanis yang baik. Hal ini dapat dicapai dengan interaksi atau pembasahan yang baik antara matriks (*epoxy*) dan penguat (grafit). Interaksi tersebut juga diharapkan dapat dibantu oleh penambahan beberapa variabel *filler* penguat lainnya, yaitu *carbon black* yang merupakan karbon alami hasil pembakaran yang tidak sempurna dari hirokarbon (minyak bumi). Selain itu untuk mencapai hasil yang maksimal, perlu dilakukan pencampuran yang baik antara *epoxy*, grafit, dan *carbon black* sehingga didapatkan campuran homogen dan merata yang akan mampu menghasilkan produk yang sifatnya terdistribusi secara baik.

1.3 Tujuan Penelitian

Ada beberapa tujuan dan studi yang ingin didapat dan dipelajari dalam pembuatan pelat bipolar ini, secara khusus, adalah:

1. Mengetahui komposisi yang optimal dari penggunaan polimer termoset *epoxy* (matriks), grafit (*reinforcement*), dan *carbon black* yang akan digunakan sebagai pelat bipolar pada *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC)
2. Mengetahui karakteristik dari pelat bipolar setelah dilakukan beberapa pengujian tertentu.
3. Mengetahui apakah dapat terjadinya interaksi atau pembasahan yang baik antara polimer *epoxy* dengan grafit sintetis, serta *carbon black*.
4. Mengembangkan material komposit untuk pelat bipolar PEMFC dengan menggunakan grafit sintetis yang memiliki kemurnian tinggi.

1.4 Ruang lingkup dan Batasan Masalah

Dalam pembuatan material komposit pelat bipolar ini bahan yang akan digunakan adalah bahan atau material termoset polimer *epoxy* resin sebagai matriks dan grafit sintetis, serta penambahan filler *carbon black* dengan variabel 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, dan 10%. Penelitian ini diharapkan akan mendapatkan

komposisi dasar yang optimal dari masing-masing bahan pendukung (*epoxy resin*, grafit sintetis, *carbon black*) pembuatan pelat bipolar. Dari komposisi yang optimal tersebut diharapkan juga akan menghasilkan karakteristik dari material pelat bipolar yang baik, yaitu nilai konduktivitas yang tinggi dan sifat mekanik (kekuatan fleksural) yang baik pula. Pada penelitian ini, tidak dilakukan penambahan unsur atau logam aditif lain, tetapi hanya dilakukan penambahan bahan penguat atau *filler reinforcement* untuk mendapatkan karakteristik yang telah diharapkan sebelumnya.

Secara umum, pembuatan pelat komposit ini dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu:

1. Proses mixing *epoxy resin-hardener*, grafit sintetis, serta *carbon black*.
2. Pembuatan pelat dengan menggunakan cetakan dan proses *hot press*
3. Karakterisasi pelat hasil produksi yang telah dipotong menjadi beberapa sampel pengujian. Karakteristik yang ingin diketahui dari pelat bipolar ini adalah sifat mekanik (fleksural dan densitas), sifat fisik (porositas dan konduktivitas), serta interaksi (pembasahan) antara *epoxy* (matriks), grafit (*reinforcement*) dan *Carbon black* (*filler*)

Bahan baku yang digunakan adalah *epoxy resin* dan *hardener*, grafit sintetis, serta *filler carbon black* sebagai bahan yang dapat meningkatkan konduktivitas dengan menambah aktivasi dari *reinforcement* komposit sehingga terjadi interaksi atau pembasahan yang baik antara matriks dengan penguat.

Pada penelitian ini akan divariasikan formula yang tepat dari penambahan *filler carbon black* dengan menitikberatkan pada perubahan variabel *reinforcement*. Variasi yang ditambahkan ini untuk mengetahui pengaruh penambahan *carbon black* dan *reinforcement* (grafit) terhadap konduktivitas serta sifat mekanis, sehingga dihasilkan komposit *bipolar plate* yang terbaik.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dibuat agar konsep penulisan laporan dapat tersusun secara teratur dan berurutan sehingga didapat kerangka alur pemikiran yang mudah dan praktis. Sistematika penulisan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut:

Bab1 Pendahuluan

Membahas mengenai latar belakang, tujuan, ruang lingkup dan batasan masalah dan sistematika penulisan laporan penelitian.

Bab 2 Dasar Teori

Membahas mengenai dasar teori tentang *polymer electrolyte membrane fuel cell*, pelat bipolar sebagai bagian dari *fuel cell* dan sebagai komposit matriks polimer, serta material penyusun komposit pelat bipolar yang akan dibuat.

Bab 3 Metodologi Penelitian

Bab ini akan menjelaskan mengenai prosedur pembuatan pelat bipolar, pengambilan spesimen uji serta pengujian-pengujian yang akan dilakukan pada tahap karakterisasi.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Membahas mengenai data hasil karakterisasi pelat bipolar berupa tabel, gambar maupun grafik dan membandingkannya dengan literatur, sehingga akan didapat suatu analisis mengenai sifat pelat bipolar tersebut.

Bab 5 Kesimpulan dan Saran

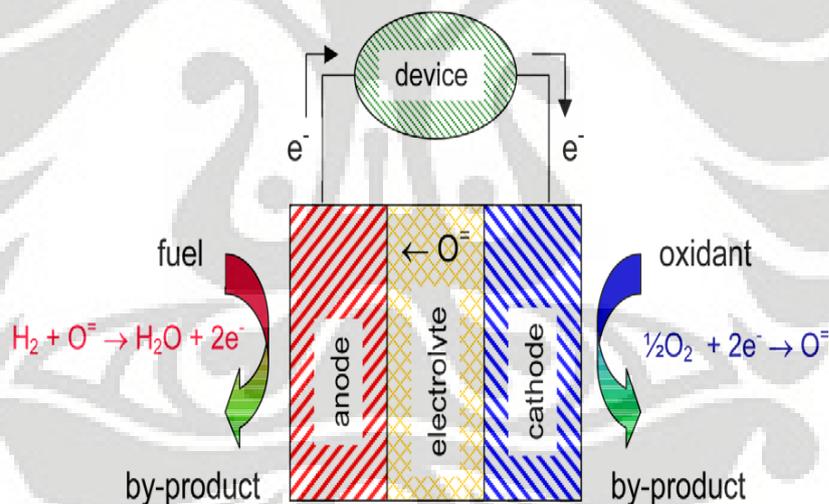
Membahas mengenai kesimpulan dari hasil penelitian pembuatan pelat bipolar dengan variabel *filler carbon black* serta saran untuk mendapatkan pelat bipolar dengan sifat yang baik.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 *Fuel Cell* (Sel Bahan Bakar)

Fuel Cell adalah suatu alat konversi energi elektrokimia yang mengubah energi kimia (gas H₂ dan O₂) menjadi energi listrik sebagai hasil utama. Selain itu juga dihasilkan air (H₂O) dan panas di dalam prosesnya sebagai hasil sampingan. Struktur fisik dasarnya terdiri atas lapisan elektrolit yang salah satu sisinya merupakan daerah kontak anoda berpori dengan katoda berpori pada sisi lainnya [5]. *Fuel Cell* merupakan suatu bentuk teknologi sederhana seperti baterai yang dapat diisi bahan bakar untuk mendapatkan energinya kembali. *Fuel Cell* tidak akan drop dan tidak memerlukan *recharge* selama bahan bakar gas hidrogen tersebut masih tersedia.



Gambar 2.1 Operasi dasar Sel Bahan Bakar [7].

Layaknya sebuah baterai, *fuel cell* memiliki elektroda positif dan negatif atau disebut juga katoda dan anoda. Reaksi kimia yang menghasilkan listrik terjadi pada elektroda. Selain elektroda, pada satu unit *fuel cell* terdapat elektrolit yang akan membawa muatan-muatan listrik dari satu elektroda ke elektroda lain, serta katalis yang akan mempercepat reaksi di elektroda. Operasi dasar dari *fuel cell* dapat dilihat pada Gambar 2.1. Umumnya yang membedakan jenis-jenis *fuel*

cell adalah material elektrolit yang digunakan. Arus listrik serta panas yang dihasilkan setiap jenis *Fuel Cell* merupakan produk samping reaksi kimia yang terjadi di katoda dan anoda.

Pada sistem *Fuel Cell*, sumber gas oksigen didapat dari udara sedangkan gas hidrogen dapat diperoleh dari reaksi reformer dari hidrokarbon dan disimpan didalam suatu tangki atau tabung didalam sistem tersebut. Gas hidrogen mempunyai hambatan besar yaitu kesulitan untuk disimpan dan dipindahkan karena molekul H_2 yang kecil sehingga sulit untuk dicairkan dan gas H_2 mudah sekali terbakar.

Usaha untuk memperoleh hidrogen dengan mudah sedang diusahakan dengan berbagai cara, misalnya memperkecil reaktor reformer dengan bahan baku LPG atau gas *methane*, menguraikan metanol yang dibuat dari pabrik besar tetapi dalam bentuk cair sehingga mudah untuk dipindahkan. Gas hidrogen dapat juga diperoleh dari methanol setelah diuraikan menjadi gas CO dan hidrogen, kemudian gas CO dioksidasi menjadi CO_2 dan air (2). Bahan bakar yang biasanya menggunakan gas hidrogen bertekanan tinggi atau hidrogen cair bagi *Fuel Cell*, mulai mengalami perubahan seiring berkembangnya teknologi reformer. Sehingga tak perlu membawa tabung gas hidrogen atau hidrogen cair yang mudah meledak serta mahal.

Teknologi reformer tersebut sampai saat ini masih dikembangkan dan hal itu sangat diperlukan untuk kedepannya dikarenakan oleh tuntutan dari aplikasi sel bahan bakar itu sendiri. Sumber gas dari sel bahan bakar yang ingin didapatkan adalah suatu gas hidrogen murni yang tidak dapat merusak reaksi ketika proses ionisasi H^+ dan pendistribusian gas, serta pengumpulan elektron. Dengan gas hidrogen yang murni tersebut diharapkan sekali efisiensi dari fuel cell tersebut dapat meningkat.

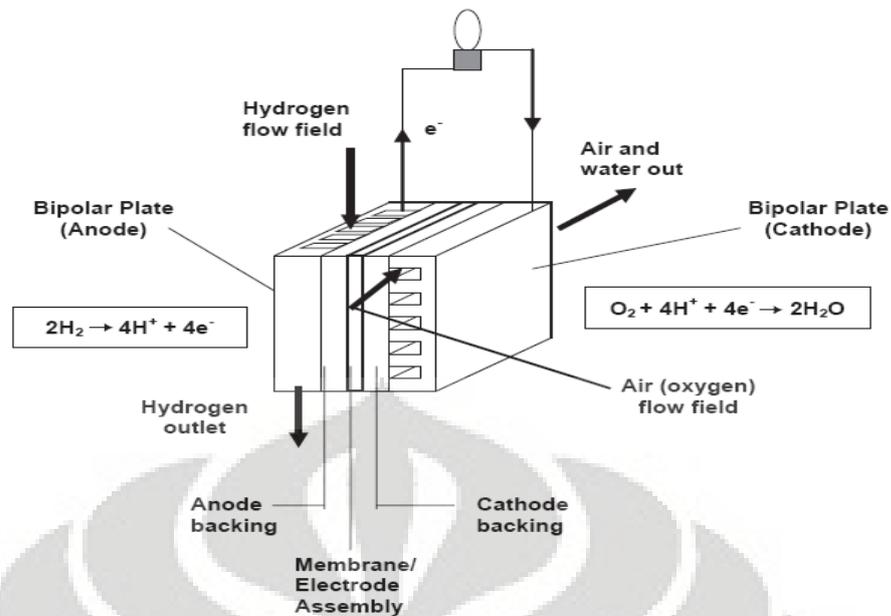
Hidrogen adalah bahan bakar dengan *low density energy*, sehingga untuk mendapatkan energi yang cukup diperlukan jumlah hidrogen yang cukup besar, dari tabel di bawah ini, dapat dilihat berapa banyak energi [kJ] yang dapat dihasilkan oleh masing-masing bahan bakar untuk setiap liter.

Tabel 2.1 Energi yang Dihasilkan oleh Bahan Bakar [9].

Jenis bahan bakar	berat jenis (lb/ft ³)	Energi (BTU/ft ³)	Energi (kJ/l)
Gas hidrogen	0,0052	320	11,9
Hidrogen cair (253°C/10 ⁵ Pa)	4,4	240.000	8942
Metanol cair	49	480.000	17885
Bensin (Octan 90)	46	950.000	35397

Dari tabel 2.1 dapat dilihat bahwa energi yang dihasilkan oleh methanol lebih kecil dari pada bensin, untuk jumlah liter yang sama, sedang hidrogen cair hanya menghasilkan seperempat energi dari bensin. Ditinjau dari per satuan berat, maka hidrogen mampu menghasilkan energi yang jauh lebih besar dari bensin.

Pada sistem *fuel cell* terdapat suatu lapisan tipis membran elektrolit yang merupakan bagian penting dalam sistem ini. Fungsi dari membran pada *fuel cell* adalah sebagai elektrolit dan pemisah dua gas reaktan. Sebagai elektrolit, membran *fuel cell* menjadi sarana transportasi ion hidrogen yang dihasilkan oleh reaksi anoda menuju katoda, sehingga reaksi pada katoda menghasilkan energi listrik. Membran ini diharapkan mampu untuk transfer proton selama *Fuel Cell* beroperasi. Hidrogen pada anoda dipisahkan antara elektron dan proton, kemudian ditransportasikan dalam *Fuel Cell*. Elektron dihantarkan keluar, selama proton berpindah dari membran konduktif ke katoda. Elektron dan proton akan bertemu di katoda dan akan membentuk air. Skema sel bahan bakar dapat dilihat di Gambar 2.2 [1]. Membran hidrat pada PEM beroperasi pada temperatur yang rendah, umumnya 80°C ke bawah [2]. Ion yang bermigrasi dapat sebagai hidrogen, oksigen atau hidroksida. Sedang elektrolit dapat berupa membran polimer, garam karbonat cair, lapisan oksida keramik, larutan alkali dan asam fosfat. Elektroda biasanya terbuat dari logam platina atau nikel [1].



Gambar 2.2 Skema Sel Bahan Bakar (*Fuel Cell*) [1].

2.2. Jenis *Fuel Cell*

Fuel Cell terbagi atas beberapa kategori berdasarkan kombinasi tipe bahan bakar dan oksidan, tipe elektrolit yang digunakan, temperatur operasi, dan lain-lain. Para peneliti terus mengembangkan teknologi *fuel cell* agar lebih efisien, ekonomis, dan mudah digunakan. Sistem *fuel cell* banyak mengalami pengembangan pada jenis elektrolitnya. Adanya perubahan jenis elektrolit juga merekayasa jenis material dan sistem elektrodanya. Beberapa jenis elektrolit yang telah dikembangkan para penemu antara lain cairan alkali (*Alkaline Fuel Cell/AFC*), cairan karbonat (*Molten Carbonate Fuel Cell/MCFC*), asam fosfat (*Phosphoric Acid Fuel Cell/PAFC*), membran pertukaran proton (*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell/PEMFC*), serta oksida padat (*Solid Oxide Fuel Cell/SOFC*). Pengembangan *fuel cell* tipe PEMFC, menggunakan material dengan bahan membran polimer, katalis elektroda dan *graphite bipolar plate* [2]. Secara umum jenis-jenis *Fuel Cell* dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Jenis-Jenis *Fuel Cell* [2].

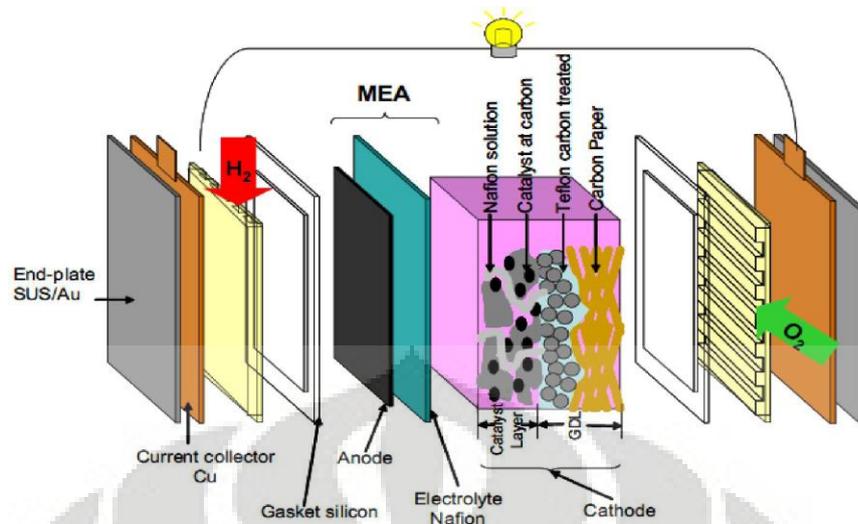
Jenis	Elektrolit	Temperatur Operasi	Karakteristik	Penggunaan
<i>Alkaline Fuel Cell (AFC)</i>	Kalilauge (KOH)	60-120 ⁰ C	Efisiensi tinggi, memiliki kepekaan terhadap CO ₂	Pesawat ruang angkasa, kendaraan.
<i>Polymer Electrolyte Membrane (PEMFC)</i>	Polimer elektrolit H ⁺	60-100 ⁰ C	Kerapatan energi tinggi, memiliki kepekaan terhadap CO (<100ppm)	Kendaraan (sedan, bis, minivan), stasiun pembangkit panas
<i>Molten Carbonate (MCFC)</i>	Molten Carbonate (CO ₃ ²⁻)	500-650 ⁰ C	Problem korosi	Stasiun pembangkit energi panas, pembangkit energi listrik
<i>Solide Oxide (SOFC)</i>	Lapisan keramik (O ²⁻)	800-1000 ⁰ C	Efisiensi sistem tinggi, Temperatur operasi perlu diturunkan	Pembangkit energi panas, pembangkit dengan turbin gas
<i>Phosporic Acid (PAFC)</i>	Phospor Acid (H ⁺)	160-200 ⁰ C	Efisiensi energi terbatas, peka terhadap CO (<1,5% Vol)	Stasiun pemangkit panas, kendaraan
<i>Direct Methanol (DMFC)</i>	Elektrolit Polimer (H ⁺)	60-120 ⁰ C	Efisiensi sistem tinggi, peka terhadap hasil oksidasi pada anoda	Kendaraan

Adapun jenis *fuel cell* terbaru yang sudah cukup dikembangkan yaitu *Regenerative Fuel Cell*. Dengan menggunakan elektrolisa tenaga *solar cell*, maka bahan-bahan yang diperlukan oleh *Fuel Cell* diambil dari air dengan cara mengubahnya menjadi hidrogen dan oksigen, yang selanjutnya dapat menghasilkan tenaga listrik, panas dan air. Air ini didaur ulang dengan proses yang sama [9].

2.3 PEMFC

Polymer Electrolyte Membran Fuel Cells (PEMFCs) atau *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang berbentuk kompak, ringan, dan memiliki banyak kelebihan lainnya seperti temperatur operasi yang relatif rendah, *power density* yang tinggi, sistem yang baik dan emisi gas buang yang rendah. Dalam PEMFC terdapat *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang terdiri dari anoda dan katoda yang dipisahkan oleh membran polimer. MEA merupakan lapisan tipis padat yang berfungsi sebagai elektrolit pemisah katoda dan anoda. Membran ini secara selektif mengontrol transport proton dari anoda ke katoda dalam *fuel cell*.

MEA dapat memisahkan reaktan dan menjadi sarana transportasi ion hidrogen yang dihasilkan di anoda menuju katoda sehingga menghasilkan energi listrik. Untuk mencukupi daya yang dibutuhkan maka MEA disusun dalam jumlah yang besar dan dipisahkan oleh pelat bipolar. Bahan yang terdapat pada katalis biasanya adalah platina (Pt) dan elektrolit adalah nafion. Kelemahan dari Pt adalah mudah teracun CO, pada katoda Pt mengubah oksigen menjadi air masih menghasilkan peroksida sehingga elektroda menjadi korosif dan butirannya bergumpal sehingga reaktifitas berkurang, serta mahal. Nafion adalah polimer asam *perfluorosulfonic* yang diproduksi oleh Dupont. Kelemahan nafion adalah mudah terhidrasi pada suhu lebih besar dari 80°C menjadikan proton transfer tidak berjalan dengan baik, *crossover* dari cairan tinggi yang mengakibatkan katoda tergenang dan anoda kering serta proses pembuatannya rumit dan mahal. Untuk mengatasi kendala tersebut, pengembangan katalis yang tidak menghasilkan peroksida pada saat reaksi berlangsung, adalah dengan menggunakan nanokatalis yang mampu mereduksi O₂ langsung menjadi H₂O melalui proses 4 elektron transfer dan non-Pt, yaitu Co, Fe, V, Cu dan berukuran kurang dari 2 nm. Untuk menggantikan Nafion dan mengatasi dehidrasi membran, maka partikel nano-Silika ditambahkan pada material baru seperti polimer suhu tinggi (PEEK) dan lokal polimer (*Acrylonitrile butadiene styrene*) yang telah mampu meningkatkan efisiensi *Fuel Cell* karena nano-silika menyerap air pada suhu tinggi dan menurunkan *crossover* cairan [10].



Gambar 2.3 Bagan *single cell* PEMFC dengan detail elektroda positif, katalis dan *Gas Diffusion Layer* [10].

Pada PEMFC, gas yang kaya akan oksigen atau hidrogen akan dimampatkan yang akan berfungsi sebagai oksidan. Dari anoda, hidrogen akan berpindah secara difusi melalui GDL (*gas diffusion layer*) menuju lapisan katalisator dimana molekul hidrogen tersebut akan terurai menjadi elektron dan proton dengan reaksi elektrokimia setengah sel sebagai berikut :



Proton akan berjalan melewati membran elektrolit menuju katoda dan elektron akan berjalan melalui sirkuit eksternal menuju katoda. Pada katoda, oksigen dari udara luar akan berdifusi melalui katoda *gas diffusion layer* menuju katoda katalis. Pada Katalis tersebut oksigen akan bereaksi dengan proton dan elektron yang membentuk air (H_2O) dan memproduksi panas yang sesuai dengan reaksi setengah sel sebagai berikut :



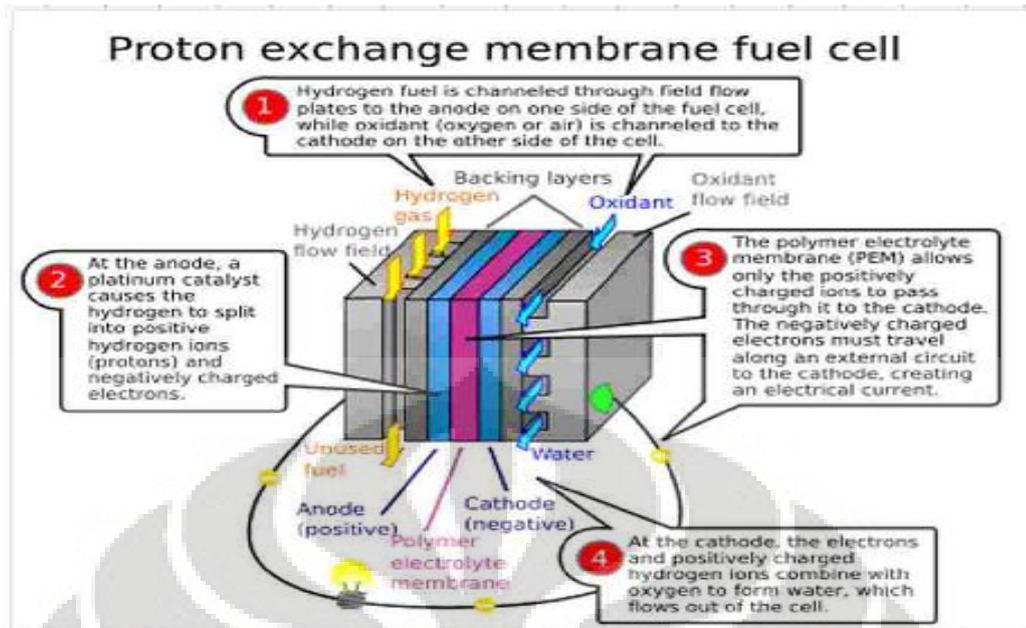
Sehingga reaksi secara keseluruhan yang terjadi pada anoda dan katoda adalah sebagai berikut :



Secara umum, PEMFC memiliki beberapa komponen yang sangat penting selain *Membran Elektroda Assembly* (MEA) yang terdiri dari elektroda (anoda & katoda) serta satu elektrolit, *bipolar plate*, *gas flow chanel*, dan *end plate* pada bagian ujung, Fungsi dari masing-masing komponen tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3 dibawah ini.

Tabel 2.3 Fungsi dan Material Komponen dalam PEMFC [11].

Komponen	Material	Fungsi
Membrane Electrolyte Assembly (MEA)	Polimer solid terimpregnasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda. Kertas atau kain carbon berpori untuk lapisan difusi gas (GDL)	Terdiri dari 2 elektroda, 1 membran elektrolit, dan 2 GDL. Membran memisahkan (dengan pembatas gas) dan melepas proton dari anoda ke katoda. Lapisan katalis yang terdispersi pada elektroda memacu setiap setengah reaksi. GDL mendistribusikan gas secara merata ke katalis dimembran, mengalirkan elektron dari area aktif menuju pelat bipolar dan membantu pengaturan air
Pelat Bipolar	Grafit, SS, atau komposit polimer termoplastik	Mendistribusikan gas di bagian area aktif membran. Mengumpulkan dan mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda, membuang air keluar sel
Pelat penutup	Material dengan kekuatan mekanik yang baik	Menyatukan rangkaian <i>fuel cell</i>
Penyimpan arus	Logam dengan kontak elektrik dan konduktivitas yang baik	Menyimpan dan mentransfer arus listrik dari dalam ke luar sirkuit <i>fuel cell</i>



Gambar 2.4 Diagram kerja *Fuel Cell* jenis PEMFC [12].

2.4 Pelat Bipolar

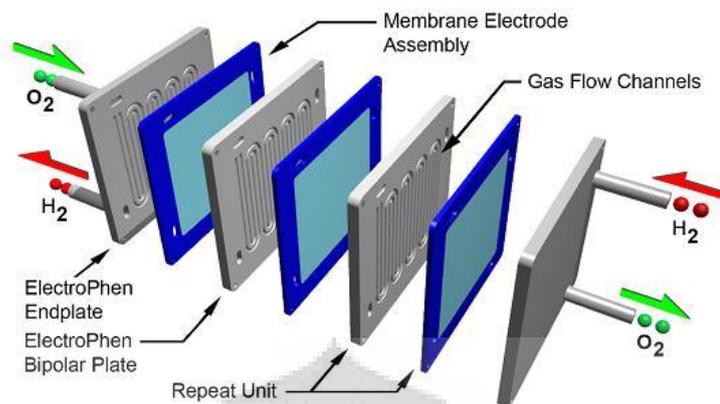
Pelat bipolar atau *bipolar plate* seringkali dikenal pula dengan sebutan *flow field plate* atau pelat separator. Pelat bipolar ini digunakan sebagai penghubung elektrik antara dua elektroda dengan kutub yang berbeda. Pelat bipolar berfungsi untuk mendistribusikan gas ke membran, memfasilitasi aliran air dari setiap sel, penghantar elektron dari anoda ke katoda, mengalirkan arus, 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. Pelat ini juga seringkali dilengkapi dengan saluran pendingin sebagai penjaga temperatur. Pelat bipolar dibuat dari material yang memiliki konduktivitas listrik baik dan tidak dapat dilewati oleh gas. Dapat berlaku sebagai pengumpul arus, dan mampu menopang struktur dari PEMFC.

Suatu Material pelat bipolar yang mampu mengurangi berat *fuel cell* serta memiliki nilai konduktivitas dan sifat mekanik yang baik yang sangat diperlukan pada saat ini. Komposit bermatriks polimer sudah banyak diteliti oleh berbagai pihak untuk digunakan. Penelitian ini mengacu kepada kriteria pelat bipolar yang baik yaitu :

Tabel 2.4 Kriteria Pelat Bipolar V. Mehta dan J.S Cooper [13].

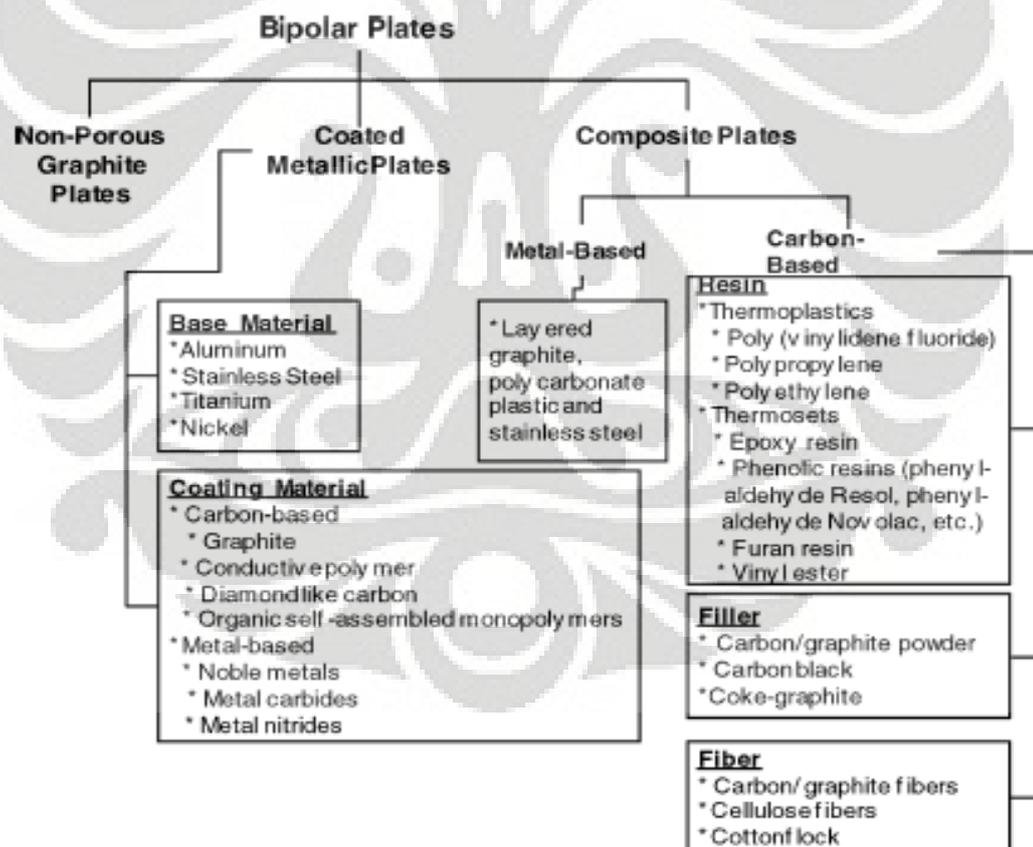
Parameter	Nilai standar
Resistivitas	$< 0.01\Omega\text{cm}^2$
Konduktivitas	Setinggi mungkin (> 100)
Permeability gas	$< 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s cm}^2$
Corrosion resistance	$0.016\text{mA}/\text{cm}^2$
Density	$< 5 \text{ gr}/\text{cm}^3$
Kekuatan Flexural	$> 22 \text{ lb}/\text{in}^2$
Material Cost	$\$4/\text{kW}$
Manufactured Cost	$< \$ 10 /\text{kW}$
Interfaceial Contact Resistant (ICR)	$140 \text{ N}/\text{cm}^2 = 20\text{m}\Omega \text{ cm}^2$

Bipolar plate merupakan komponen utama dalam satu unit PEMFC dengan berbagai macam fungsi dan karakterisasinya. Pelat Bipolar harus dibuat setipis dan seringan mungkin, ekonomis, dan mudah dibentuk serta di-machining [14]. 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*. Pelat ini biasa dibuat dari grafit, logam (titanium, stainless steel, dan nikel), atau dapat juga dibuat dari komposit. Pada permukaan pelat bipolar terdapat saluran-saluran yang dibuat sebagai jalur untuk gas reaktan (*gas flow channels*).



Gambar 2.5 Pelat Bipolar dengan *Gas Flow Channels* [15].

Seperti pada skematik dibawah ini, pelat bipolar dapat dibuat dengan beberapa macam bahan dasar diantaranya adalah non-logam, logam dan komposit. Berikut ini adalah penjelasan mengenai bahan dasar penyusun pelat bipolar tersebut :



Gambar 2.6 Material Penyusun Pelat Bipolar Pada Umumnya [16].

1. Non-Logam (*Non-Porous Graphite Plates*)

Pelat Bipolar jenis ini digunakan grafit sebagai material utama (alami atau sintetis) karena kedua material tersebut memiliki stabilitas kimia yang baik, konduktivitas yang tinggi, impregnasi terhadap polimer dan menghasilkan energi yang besar. Akan tetapi grafit pelat bipolar ini memiliki kekurangan yaitu pelat bipolar ini akan rapuh dan memiliki ketebalan yang tinggi, harganya masih mahal, Serta perlu adanya *machining* untuk membuat *gas flow channel*.

2. Logam

Logam merupakan suatu material yang cukup baik jika digunakan sebagai pelat bipolar. Hal itu dikarenakan logam memiliki nilai konduktivitas yang sangat tinggi, tahan terhadap beban kejut dan getaran, beban dari permeabilitas, namun di sisi lain penggunaan *bipolar plate* pada temperatur 80°C dan dengan pH 2-3 dapat menyebabkan logam akan sangat mudah terkorosi, selain itu juga harga yang masih relatif mahal untuk pembuatan *gas flow channels*.

a) *Non-coated (base material)*

Material logam yang tidak dilapisi ini (*Stainless Steel*) memiliki kekuatan yang tinggi, stabilitas kimia yang tinggi, gas permeabilitas yang kecil, *applicable* untuk produksi dalam jumlah cukup banyak, serta murah. Faktor utama yang menyebabkan digunakannya material *stainless steel* adalah karena adanya suatu lapisan film yang protektif pada *stainless steel* yang akan sulit mengalami kehilangan sebagian permukaan material akibat reaksi dengan lingkungannya (korosi).

b) *Coated*

Pada *coated bipolar plate* logam terbagi menjadi 2 material, yaitu *base material* dan *coated material*. Pada *base material* digunakan logam seperti aluminium, stainless steel, titanium, serta nikel. Sedangkan untuk *coated material* yang biasa digunakan adalah material-material yang memiliki nilai konduktivitas cukup baik serta tahan korosi. Beberapa *coated material* yang biasa digunakan antara lain carbon, grafit, *conductive polymer*, *diamond*, dan *noble metal*.

3. Komposit

Ada dua jenis pelat bipolar komposit yang telah dikembangkan, yaitu *metal base composite* dan *carbon base composite*. Pada *metal base* biasa

dipadukan dengan penguat grafit, polycarbonate, serta stainless steel. Sedangkan pada carbon *base* biasa digunakan penguat berupa polimer baik itu *thermoplastic* seperti polypropylene, ataupun polyethylene dan *thermoset* seperti epoxy resin phenolic resin, maupun vinil ester. Selain itu pada *carbon composite bipolar plate* biasa ditambahkan *filler* maupun fiber guna meningkatkan sifat dari *bipolar plate* ini.

Komposit karbon ini merupakan obyek yang akan diteliti untuk mendapatkan suatu pelat bipolar yang memiliki sifat-sifat yang akan disesuaikan oleh target *Department of Energy*, USA seperti dapat dilihat pada Tabel 2.5. Hal itu dikarenakan komposit karbon memiliki prospek yang sangat baik untuk dikembangkan karena beberapa keunggulan yang dimilikinya, diantaranya [17]:

- a. Resistansi kontak permukaan yang sangat kecil
- b. Memiliki berat atau *density* yang lebih ringan
- c. Nilai konduktivitas yang sangat tinggi
- d. Memiliki kekuatan yang cukup baik dibanding dengan material kandidat lain selain logam
- e. *Gas impermeability* dan ketahanan korosi
- f. Proses relatif lebih singkat
- g. Mudah untuk dibuat *prototype* dengan berbagai dimensi

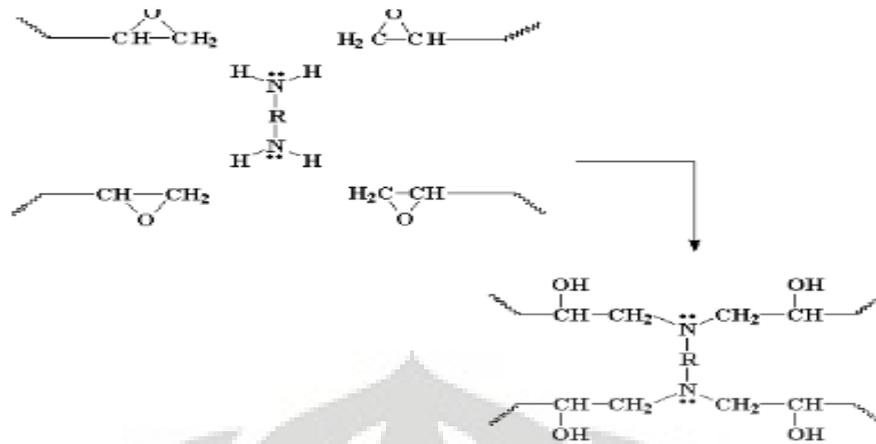
Tabel 2.5 Target DOE Untuk Pelat Bipolar [18].

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

2.4.1 Epoxy

Epoxy adalah salah satu jenis polimer *thermosetting* yang digunakan sebagai matriks pada penelitian kali ini. Hal ini dikarenakan epoxy merupakan polimer yang dapat terjadi suatu proses pensettingan pada pemanasan beberapa temperatur dan tidak dapat dibentuk kembali pada pemanasan ulang atau dengan kata lain tidak dapat didaur ulang dan *degradable*. Secara umum, polimer jenis thermoset terdiri dari dua penyusun, yaitu susunan resin dan *curing agent* (*hardener*) yang nantinya akan membuat proses polimerisasi terjadi pada temperatur ruang. *Epoxy hardener* akan dicampurkan dengan *epoxy resin* untuk menghasilkan reaksi *curing* agar didapatkan *hardened polymer* (*Cross link*) yang kuat dan mempunyai sifat mekanis baik sebagai matriks dasar komposit matriks polimer pelat bipolar. Sementara hardener adalah suatu senyawa reaktif *aliphatic amine* yang mempunyai sifat *curing time* yang cepat bila direaksikan pada temperatur ruang. Disamping kelebihan-kelebihan yang disebutkan diatas, *epoxy resin* juga mempunyai kekurangan. Walaupun sifat mekanik cukup baik pada saat reaksi *curing*, tetapi akan memberikan nilai elongasi yang buruk (kurang tangguh), serta umur dan daya pakai yang cukup pendek jika digunakan pada temperatur ruang. Reaksi *curing* antara *epoxy resin* dan hardener dapat dilihat pada Gambar 2.7.

Epoxy merupakan jenis yang paling sering digunakan sebagai matriks komposit meskipun mahal dan tidak mempunyai ketahanan pada suhu tinggi dibandingkan dengan polimer jenis lain. *Epoxy resin* banyak digunakan sebagai matriks untuk berbagai jenis komposit dikarenakan *epoxy resin* memiliki daya isi dan juga sebagai agen penguat yang baik dalam komposit. Reaksi kimia antara *epoxy resin* dengan *agent* yang lain tidak perlu banyak memerlukan daya pembasahan yang besar. Selain non reaktif terhadap reaksi kimia, juga sebagai isolator yang baik untuk sifat elektriknya [19].



Gambar 2.7 Struktur reaksi *Curing* resin epoxy dengan hardener [20].

Berikut ini merupakan beberapa keunggulan dan kekurangan polimer jenis *epoxy resin* ini dapat dilihat dibawah ini [21] :

- Mampu mengikat dengan gaya adhesi antara karbon dengan resin secara baik (kekuatan adhesi yang sangat baik)
- konduktivitas listrik dapat mudah ditingkatkan dengan penambahan aditif atau *filler* yang sesuai
- Sifat *electrical insulating* (isolator listrik) yang sangat baik
- Kekuatan tinggi dan fleksibilitas yang rendah.
- Kemungkinan terjadinya penyusutan selama polimerisasi sangat kecil.
- Ketahanan terhadap reaksi kimia, *creep* dan *fatigue* baik.
- Berbahaya karena mengandung racun kimia (epoxy resin)
- Daya penyerapan terhadap air sangat tinggi dan Polimerisasinya lambat
- Sulit untuk menggabungkan antara kekuatan dan ketahanan terhadap suhu tinggi

2.4.2 Grafit

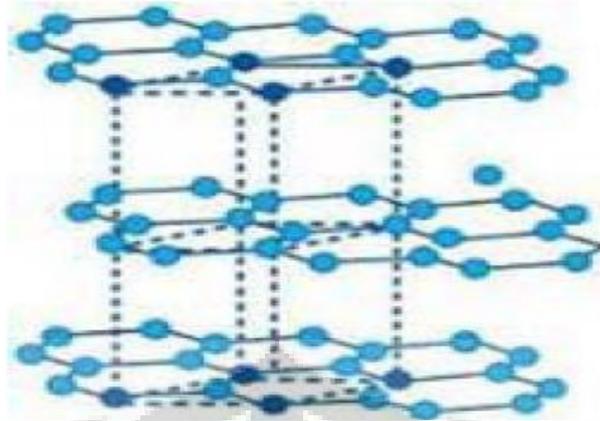
Grafit adalah salah satu bentuk alotropi atau modifikasi dari karbon yang menyerupai struktur dari intan. Struktur kristal grafit adalah *hexagonal* yang tersusun atas atom karbon yang terbentuk dari kisi planar dengan ikatan kovalen dan antar lapisannya memiliki ikatan *Van der Waals*. Perbedaan jenis ikatan ini menciptakan derajat anisotropik pada grafit. Perbedaan jenis ikatan ini berada

dalam arah kristalografi yang berbeda. Sebagai contoh, grafit mampu berlaku sebagai pelumas padat sebagai akibat dari sifat anisotropik tersebut. Ikatan *Van der Waals* yang lemah memungkinkan tiap lapisan bergerak secara individual dan memberikan sifat lubrikasi yang baik. Umumnya digunakan sebagai pelumas pada industri, penguat pada baja, 'lead' pada pensil dan *reinforcement* untuk komposit dengan kekuatan tinggi [22].

Grafit sintetis yang akan digunakan dalam penelitian ini sebagai keramik *reinforcement* dan konduktor listrik untuk komposit matriks polimer. Grafit tersebut digunakan dalam bentuk *filler particle* karena dapat memungkinkan untuk terjadinya peningkatan konduktivitas, kekakuan dan sifat mekanis pada komposit [8]. Selain dapat memperbaiki sifat komposit, alasan lain penggunaan Grafit sintetis adalah karena harganya cukup ekonomis dan ketersediaan (*availability*) barang dalam pasar yang baik. Selain itu processability grafit dalam komposit cukup baik, karena mempunyai sifat *self lubricant*, yaitu mampu mempunyai sistem lubrikasi sendiri tanpa harus adanya pemberian pelumas secara kontinu [8]. Ini terjadi karena oli atau pelumas lain dapat masuk ke dalam *porous* grafit, sehingga dapat digunakan untuk aplikasi proses dalam komposit [8]. Struktur kristal dari grafit dapat dilihat pada Gambar 2.8.

Keunikan sifat dari grafit berasal dari keistimewaan struktur lapisan dan sifat inert terhadap kimia menjadikan material ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi karena [23] :

1. Memiliki konduktivitas termal dan elektrik yang baik
2. Memiliki sifat sebagai lubricant yang baik pada perubahan temperatur dan tekanan
3. Memiliki ketahanan oksidasi dan imun pada lingkungan agresif



Gambar 2.8 Struktur kristal Grafit [19].

Pada aplikasinya sebagai pelat bipolar, grafit tersebut mampu memberikan konduktivitas listrik yang baik dan juga meningkatkan sifat mekanis dari komposit tersebut. Selain itu, penambahan grafit juga mampu meningkatkan kemampuprosesan dari material komposit karena sifatnya yang baik sebagai pelumas padat. Hal-hal tersebut mampu memberikan performa yang baik dan stabil dalam aplikasi sebagai pelat bipolar. Sifat-sifat umum dari grafit dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Sifat-sifat umum dari Grafit [24].

Formula	C
System :	Hexagonal
Lusture :	Sub-Metallic
Hardness (Vickers) :	$V_{HN10} = 7 - 11 \text{ kg/mm}^2$
Modulus of Elasticity :	4.8 Gpa
Density (calculated) :	2.26 g/cm^3
Molecular Weight :	12.011 g/mol
specific Surface Area :	$1.00 \text{ m}^2/\text{g}$
Kemurnian	>99.5% C
Ukuran bubuk	50 μm

2.4.3 Carbon black

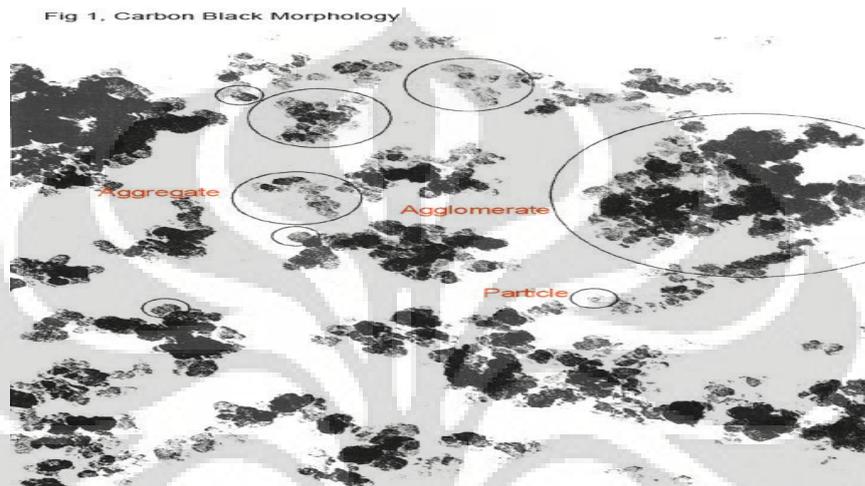
Karbon hitam adalah material yang dihasilkan dari pembakaran yang tidak sempurna pada produk berat minyak bumi (hidrokarbon) seperti *FCC tar*, *coal tar*, *ethylene cracking tar*, dan sejumlah kecil dari minyak sayur. Karbon hitam adalah suatu bentuk karbon amorf yang memiliki luas permukaan yang tinggi

terhadap volume rasionya, meskipun luas permukaan terhadap volume rasio lebih rendah dibandingkan dengan karbon aktif [25]. Semua *carbon black* biasanya memiliki oksigen *chemisorbed* kompleks (*karboksilat*, *quinonic*, *lactonic*, kelompok *fenolik* dan lain-lain) pada permukaannya untuk berbagai derajat jumlahnya tergantung pada kondisi manufakturnya. Kelompok oksigen permukaan ini secara kolektif disebut sebagai *volatile content*. Hal itu juga dikenal sebagai non-bahan konduktif karena kontennya yang tidak stabil. Morfologi *carbon black* dapat dilihat pada Gambar 2.9.

Ada 2 jenis teknik manufaktur *carbon black*, yaitu *furnace black* dan *thermal black*, kedua teknik ini yang paling familiar untuk menghasilkan hampir seluruh jenis *carbon black* yang ada di dunia, dengan *furnace black* sebagai teknik yang paling umum [26]. Proses *furnace black* biasanya menggunakan produk berat minyak sebagai bahan baku aromatik. Tanur produksi menggunakan reaktor tertutup untuk mengatomisasi bahan baku minyak di bawah kondisi yang dikontrol dengan sangat teliti (terutama suhu dan tekanan). Bahan baku utama dimasukkan ke dalam aliran gas panas (dicapai dengan membakar bahan baku sekunder, misalnya, gas alam atau minyak) di mana bahan baku tersebut akan menguap dan kemudian terjadi *pyrolyzes* dalam fase uap karbon untuk membentuk partikel mikroskopis. Dalam kebanyakan tungku reaktor, laju reaksi dikendalikan oleh uap atau semprotan air. *Carbon black* yang dihasilkan dihubungkan melalui reaktor, lalu didinginkan, dan dikumpulkan dalam kantong *filter* dalam suatu proses yang berkesinambungan. Residual gas atau *tail gas* dari tungku reaktor mencakup berbagai gas seperti karbon monoksida (CO) dan hydrogen (H₂). Kebanyakan rencana proses *furnace black* menggunakan sebagian gas residu ini untuk menghasilkan panas, uap, atau tenaga listrik [26].

Karbon hitam saat ini sudah banyak digunakan pada plastik untuk kemasan konduktif, film, serat, moldings, pipa dan kabel semi-konduktif yang bercampur dalam produk seperti karung, industri tas, fotografi kontainer, pertanian pupuk film, stretch wrap, dan aplikasi untuk molding termoplastik otomotif, listrik atau elektronik, peralatan rumah tangga dan *blow-molded containers* [27]. Pada material komposit, penambahan *carbon black* digunakan sebagai antistatik, *electrostatic dissipative*, dan material semikonduktif. *Carbon*

black dengan luas permukaan yang tinggi dapat mengumpulkan arus listrik pada konsentrasi yang lebih rendah dan membentuk jaringan karbon konduktif. Umumnya *carbon black* juga digunakan di dalam komposit sebagai *reinforcement* dan pigmen pada ban untuk meningkatkan kekauan, *high performance coating*, *toner* serta tinta untuk printer dan *conductive powder* untuk komposit matriks polimer [8].



Gambar 2.9 Morfologi dari *carbon black* [28].

2.5 Komposit

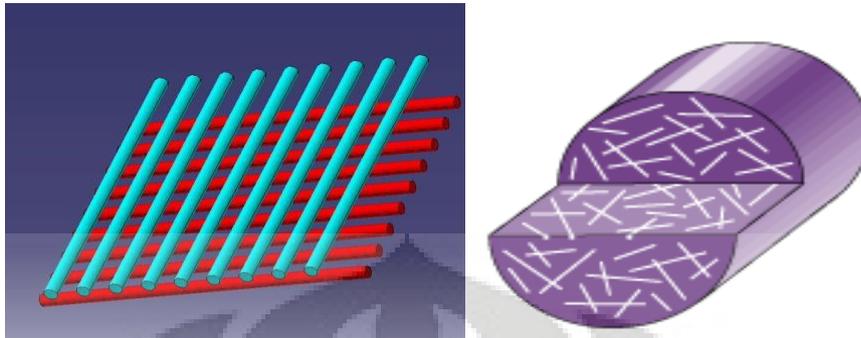
Material komposit adalah kombinasi dari dua atau lebih material yang memiliki perbedaan fasa dan sifat yang berbeda, membentuk satu material yang baru dan memiliki sifat yang lebih baik daripada material penyusunnya. Komposit berbeda dengan paduan (*alloying*). Umumnya komposit dilakukan secara makro dengan menambahkan material penguat. Suatu komposit terdiri dari dua konstituen, yaitu matriks dan penguat (*reinforcement*). Matriks berfungsi sebagai pengikat dari penguat, mendistribusikan beban antara penguat, menginfiltrasi penguat memproteksi penguat dari lingkungan, dan melindungi permukaan abrasi mekanis. Pemilihan matriks ini menjadi sangat penting karena dalam suatu komposit dibutuhkan sifat mekanis yang baik, sifat mampuproses yang baik, dan juga memiliki resistansi yang baik terhadap bahan kimia dan panas. Sementara penguat digunakan dalam suatu komposit untuk meningkatkan sifat dari material komposit yang dihasilkan, memiliki kemampuan untuk mampu dibasahi oleh

matriks dan dapat ditempatkan pada arah pembebanan untuk meningkatkan sifat mekanisnya [1].

Sifat dari sebuah material komposit sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat dan konsentrasi konstituen penyusunnya, arah orientasi penguat, dan juga ikatan antara matriks dan penguatnya. Pada suatu komposit biasanya diperlukan suatu hipotesis awal mengenai sifat dari material komposit yang akan dihasilkan dan sesuai dengan aplikasinya. Misalnya diinginkan material komposit dengan sifat mekanis dan konduktivitas yang baik. Dalam hal ini dapat digunakan material polimer yang memiliki sifat mekanis yang cukup baik, tetapi sifat konduktivitasnya kurang baik. Sifat konduktivitas ini harus dapat ditingkatkan dengan penambahan suatu penguat yang memiliki konduktivitas yang baik pula (karbon atau grafit). Namun seiring dengan penambahan penguat karbon atau grafit tersebut akan memungkinkan sekali terjadinya penurunan sifat mekanis dari material komposit yang dihasilkan. Karena seperti diketahui sifat mekanis karbon yang sangat getas dikarenakan struktur *hexagonal* dan *flakes* (serpihan). Oleh karena itu, dibutuhkan suatu komposisi yang tepat untuk mendapatkan sifat mekanis dan konduktivitas yang optimal. Pelat bipolar yang akan digunakan dalam penelitian ini merupakan jenis Komposit Matriks Polimer atau *Polymer Matrix Composite*, dengan epoxy resin sebagai matriks polimer *thermoset* dan keramik grafit sebagai fasa penguat, grafit ditambahkan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan (*strength and stiffness*), konduktivitas listrik dan thermal serta kemampuan untuk diaplikasikan pada temperatur tinggi pada komposit [41].

Material grafit komposit yang dipilih ini dikarenakan memiliki keuntungan yang tidak begitu reaktif terhadap lingkungan korosif, memiliki densitas dan resistivitas yang rendah, dan sebagainya. Akan tetapi kelemahan grafit komposit ini adalah sulit dilakukan proses pemesinan dan merupakan material yang rapuh [29]. Grafit dibagi menjadi dua jenis, yaitu alami dan sintetik [30]. Grafit sintetik merupakan grafit yang memiliki kemurnian yang lebih tinggi bila dibandingkan grafit alam. Grafit yang dipakai pada penelitian kali ini adalah grafit sintetik. Jenis komposit pelat bipolar yang ingin dihasilkan dalam penelitian ini berdasarkan klasifikasi bentuk *reinforce*-nya adalah *particle reinforce composite*, dengan

Grafrit dan *Carbon black* sebagai penguat *filler* seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.10.



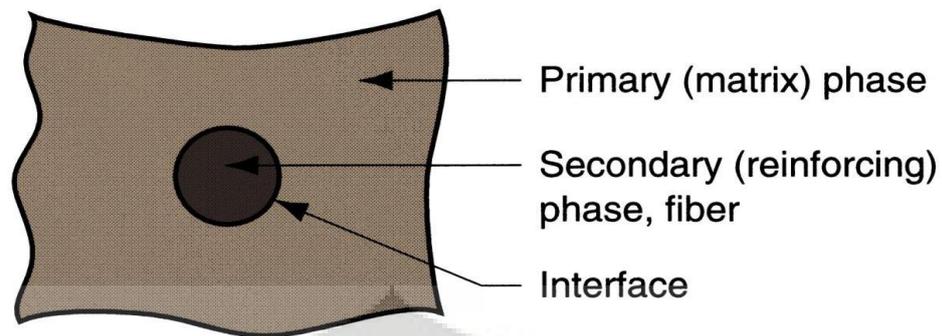
Gambar 2.10 *Filler Reinforce Composite* [41].

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi dari sifat suatu produk komposit matriks polimer adalah sebagai berikut :

- a) Karakteristik dari suatu matriks dan penguat ditentukan dari kemampuan suatu matriks dan penguat untuk dapat memaksimalkan fungsinya masing-masing, dua fungsi utama epoxy resin sebagai matriks adalah untuk melindungi unsur penguat dan mentransfer beban yang diaplikasikan terhadap komposit.
- b) *Interface* atau *interfacial bond* merupakan permukaan yang terbentuk diantara matriks dan penguat yang didalamnya mengalami kontak dengan membuat suatu ikatan yang kuat diantara keduanya sebagai media untuk perpindahan beban dari matriks – penguat – matriks,. Permukaan yang terbentuk tersebut akan mempengaruhi sifat-sifat dari komposit nantinya [8].

Tabel 2.7 Sifat komposit yang dipengaruhi oleh *interface* [41].

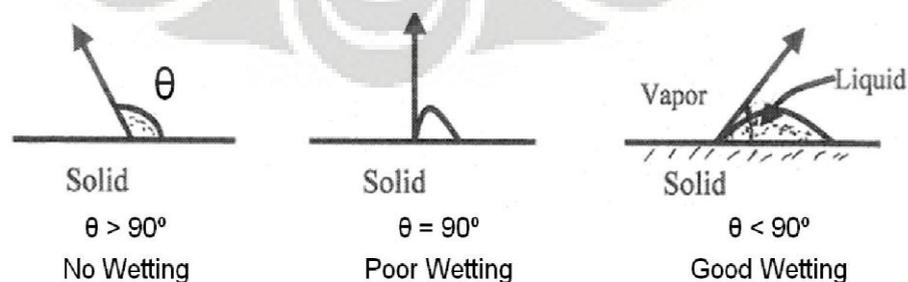
<i>Composite strength</i>	<i>Critical Fiver length</i>
<i>Modes of failure</i>	<i>Environmental resistance</i>
<i>Young's modulus</i>	<i>Structural stability at elevate temperatures</i>
<i>Interlaminar shear strength</i>	<i>Fracture and Fatigue behaviour</i>
<i>Compressive strength</i>	<i>Specific strength</i>
<i>Creep resistance</i>	<i>Specific Stiffness</i>



Gambar 2.11 Fenomena *interface* pada komposit [41].

Untuk mengontrol *interface* agar mempunyai sifat mekanis yang bagus maka perlu untuk mempelajari mekanisme adhesi dan mekanika perpindahan beban pada *interface*. *Interface* sangat berpengaruh terhadap kekuatan, kekakuan, ketangguhan, ketahanan mulur, dan degradasi terhadap lingkungan pada material komposit [31].

- c) *Wetability*, adalah kemampuan suatu matriks (*epoxy*) untuk membasahi seluruh permukaan *reinforcement* (grafit) agar terjadinya suatu ikatan yang baik (kekuatan tinggi) dan juga untuk mengurangi jumlah porositas. Agar terjadi pembasahan yang baik, *contact angle* yang terjadi harus lebih kecil dari 90° , namun ketika *contact angle* antara matriks dan penguat lebih besar dari 90° maka perlu ditambahkan *wetting agent* untuk mengurangi tegangan atau energi permukaan (*surface tension*) [41]. Karena semakin tinggi *surface tension*, pembasahan antara grafit dengan epoxy akan menjadi semakin sulit. Kondisi pembasahan yang baik dapat dilihat pada Gambar 2.12 [8].



Gambar 2.12 Hasil *wettability* komposit dengan *contact angle* [41].

Wettability dari permukaan padat terhadap permukaan cair (contoh adhesive) dapat diketahui berdasarkan persamaan Young [32] :

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LV} \cos \theta + \gamma_{SL} \dots\dots\dots(2.5)$$

dimana γ_{SV} energi bebas per unit area pada permukaan padat dan gas, γ_{LV} tegangan permukaan antara permukaan cair dan gas, γ_{SL} energy interfacial, dan θ adalah sudut kontak

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

$$W_A = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.5) dan (2.6) maka didapat persamaan *Young-Dupré*:

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

Berikut ini merupakan kriteria dan persyaratan tambahan untuk komposit yang memiliki *good wetting* [8]:

- Permukaan komposit harus terbebas dari partikel asing. Hal ini dapat menghilangkan batas lapisan yang lemah (*weak boundary*) atau pengotor (H_2O , *organic vapor*, *nitrates*, *ketones*, *alcohols*, *amines*)
 - Bidang kontak antar muka yang besar
 - Secara termodinamika, energi permukaan yang tinggi adalah yang paling konduktif untuk *good wetting* terutama jika mengandung adesif yang memiliki grup polar
 - Penambahan atau penciptaan *chemical group*
 - Variasi dari topografi permukaan (*mechanical interlocking*)
- d) Komposisi penguat dan matriks komposit mempengaruhi karakteristik komposit . Semakin banyak komposisi material dalam komposit, maka akan semakin besar material tersebut mendominasi sifat komposit. Sifat yang dipengaruhi dari komposisi tersebut biasanya berupa koefisien elongasi, densitas, *stress ratio*, *strain ratio tensile strength*, *hardness* dll. Pengaruh

komposisi terhadap sifat komposit ini diturunkan dengan menggunakan *rule of mixture* memprediksi sifat akhir komposit [33].

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

E = Modulus Elastisitas (composite(c), reinforce(f), matrix(m))

V = Fraksi Volume (composite(c), reinforce(f), matrix(m))

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} = \frac{m_f + m_m}{V_f + V_m + V_v} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{V_f + V_m + V_v} = \rho_f V_f + \rho_m V_m \dots (2.9)$$

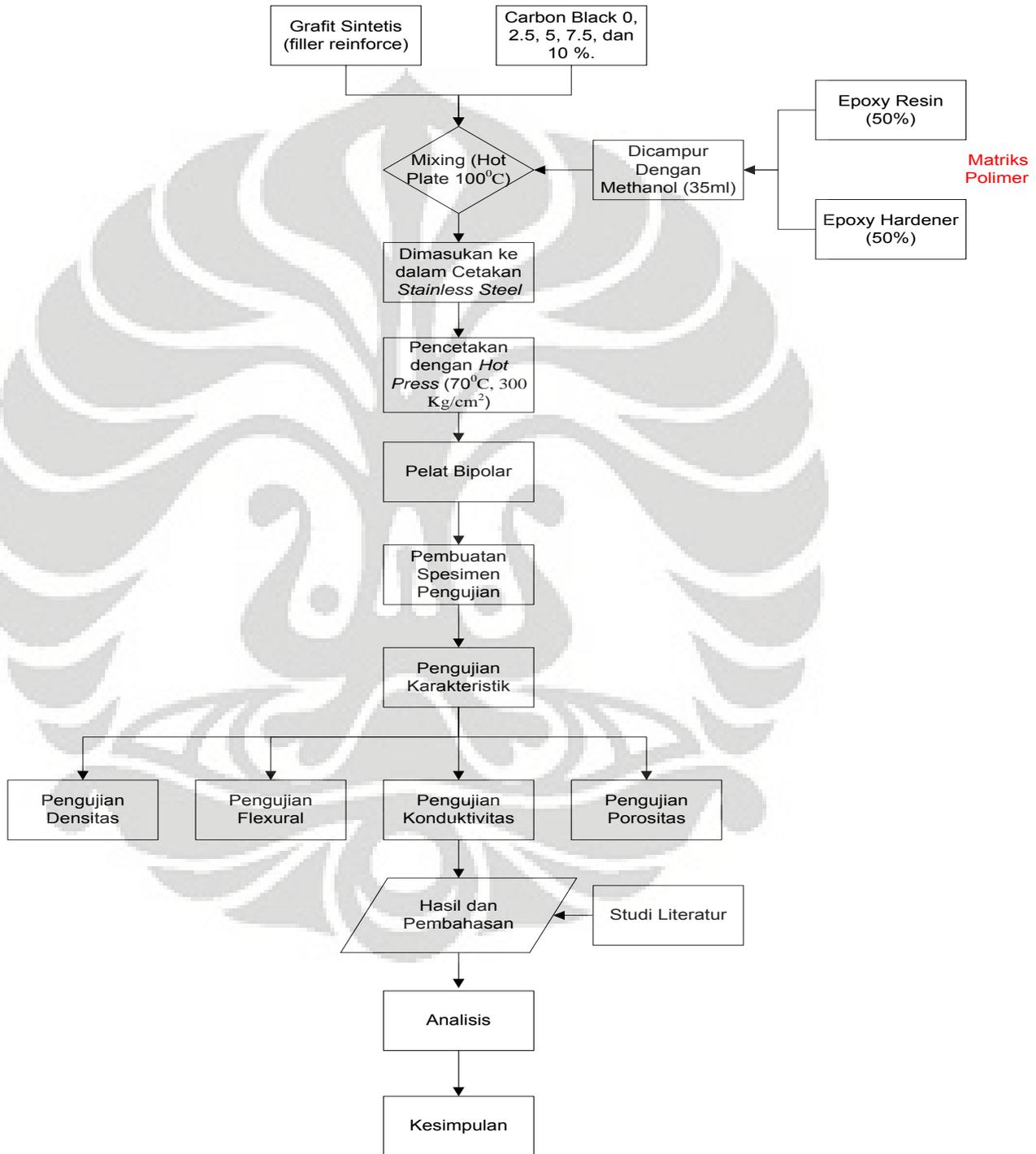
ρ = Densitas (composite(c), reinforce(f), matrix(m))



BAB III

METODELOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian mengenai pembuatan pelat bipolar PEMFC untuk mendapatkan karakteristik dari pelat bipolar yang maksimal dan komposisi bahan penyusun yang optimal dimulai dengan pembuatan komposit pelat bipolar yaitu, polimer termoset epoxy sebagai matriks dan grafit sebagai penguat dan dilakukan juga penambahan *filler carbon black*. Penjelasan skematis penelitian akan digambarkan melalui diagram alir diatas.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

1. Sarung Tangan
2. Gergaji dan Gerinda
3. Beaker Glass 1000 ml, 500 ml, dan 100 ml
4. Mixer
5. Spatula
6. Pipet Volume
7. Gelas Ukur
8. Thermometer
9. Hot Plate
10. Timbangan Digital
11. Cetakan Pelat ukuran 15 cm x 15 cm
12. Kertas Amplas 100#, 240#, 320#, dan 1200#
13. Jangka Sorong
14. Oven
15. *Hydraulic Pressure Machine*
16. *Rotary Ball Milling*
17. Mesin Uji Kekuatan lentur, *UTM T22K JJ-Loyd Instument*
18. Mesin Uji Konduktivitas *Veeco FPP 5000- four point probe detector*
19. Kamera Digital
20. Tisu
21. Kain Katun

3.2.2 Bahan

Pada penelitian ini, pembuatan komposit *bipolar plate* dengan bahan dasar karbon grafit ini mengacu pada penelitian sebelumnya yang juga menggunakan bahan utama grafit MERCK dengan perbandingan terbaik antara polimer dengan grafit 2:8 [34]. Pada penelitian ini bahan yang *dimixing* sesuai dengan variabel masing-masing sehingga total massa paduan tersebut adalah 180 gram untuk setiap cetakan. Secara umum bahan yang digunakan dalam pembuatan komposit ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Komposisi dan kode seluruh sampel yang diteliti.

Bahan	Satuan	Kode Formulasi Sampel				
		1	2	3	4	5
Resin	Wt%	10	10	10	10	10
Epoxy	gr	18	18	18	18	18
Resin	Wt%	10	10	10	10	10
Hardener	gr	18	18	18	18	18
Grafit	Wt%	80	77.5	75	72.5	70
Merck	gr	144	139.5	135	130.5	126
<i>Carbon</i>	Wt%	0	2.5	5	7.5	10
<i>black</i>	gr	0	4.5	9	13.5	18
Total	gr	180	180	180	180	180

3.2.2.1 Epoxy Resin & Epoxy Hardener

Epoxy Resin dan hardener yang digunakan adalah jenis epoxy *EPOSCHON* buatan Jerman. Epoxy yang merupakan polimer jenis termoset ini digunakan untuk mengikat atau membasahi grafit *reinforce* serta *filler carbon black*. Jumlah epoxy resin dan hardener (matriks) yang digunakan pada paduan komposit ini selalu tetap untuk 5 variabel pengujian. Dari total jumlah 20% jumlah polimer yang dibutuhkan terdiri dari epoxy resin dan epoxy hardener dengan perbandingan 1:1. Komposisi epoxy resin dan epoxy hardener yang dibutuhkan dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan spesifikasi epoxy (resin dan hardener) dapat dilihat pada Lampiran 1.

3.2.2.2 Grafit Sintetis

Grafit sintetis memiliki ukuran partikel lebih kecil dari 50 mikron (325 #). Grafit ini memiliki nilai konduktivitas listrik yang sangat baik dibanding karbon lain (*Carbon black*) yang digunakan pada penelitian ini sehingga grafit sintetis ini merupakan jumlah yang paling dominan. Prosentase jumlah grafit ini diambil dari total jumlah karbon yang digunakan yaitu 80% dari total berat bipolar plate yang di mixing. Jumlah grafit sintetis yang ditambahkan akan semakin berkurang sejalan dengan bertambahnya jumlah *filler carbon black* yang digunakan. Jumlah grafit sintetis yang dibutuhkan dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan spesifikasinya pada Lampiran 2.

3.2.2.3 *Carbon black*

Carbon black merupakan karbon yang amorf, konduktivitas cukup rendah namun dapat berfungsi sebagai katalis. *Carbon black* ini akan menyerap arus listrik yang melewatinya yang kemudian akan dihantarkan melewati permukaan yang lain. Pada penelitian ini *carbon black* yang dipakai dihasilkan dari karbon arang buatan tangan sendiri dengan struktur amorf yang berfungsi sebagai katalis grafit konduktif aktif. Penambahan *carbon black* ini dilakukan sebanyak 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, dan 10% dari masing-masing pelat bipolar. Spesifikasi *Carbon black* dapat dilihat pada lampiran 3.



Gambar 3.2 *Carbon black*

3.2.2.4 Metanol

Metanol 0,1 M digunakan untuk melarutkan *epoxy resin* dan hardener sebelum dicampur dengan grafit. Metanol digunakan karena sifat metanol yang mudah menguap sehingga tidak akan menyisakan senyawa pengotor yang dapat mengganggu keseimbangan reaksi pada saat epoxy dan grafit dicampurkan serta tidak membuat perubahan sifat-sifat di komposit pelat bipolar ini. Pada prosesnya nanti metanol akan dikeluarkan dengan pemanasan campuran pada saat di mixing sebelum dicetak dengan metode *hot press*. Penambahan metanol ini sangat menentukan produk yang akan dicetak di cetakan. Semakin banyak metanol yang dilarutkan maka tingkat keencerannya akan semakin tinggi, hal ini akan menyebabkan hasil adonan yang semakin basah dan nantinya hasil dari cetakan dapat menjadi lembek, berlubang, serta memiliki sifat mekanik yang buruk. Begitu juga sebaliknya jika semakin sedikit metanol yang digunakan maka distribusi *epoxy* akan didalam grafit akan semakin tidak homogen. Selain itu pada saat pencetakan jika terlalu kering maka dapat menyebabkan hasil produk yang dihasilkan yang permukaannya buruk serta pecah-pecah. Namun permasalahan kesesuaian metanol yang diperlukan akan dapat diatasi dengan metode mixing yang tepat dengan *hot plate* untuk mengatur keenceran atau tingkat kebasahan dari campuran pelat tersebut. Penambahan metanol yang diperlukan untuk pelat komposit carbon ini adalah sekitar 35 ml untuk masing-masing epoxy resin dan hardener. Berikut ini merupakan spesifikasi methanol yang dipakai. Spesifikasi methanol yang dipakai dapat dilihat pada lampiran 4.

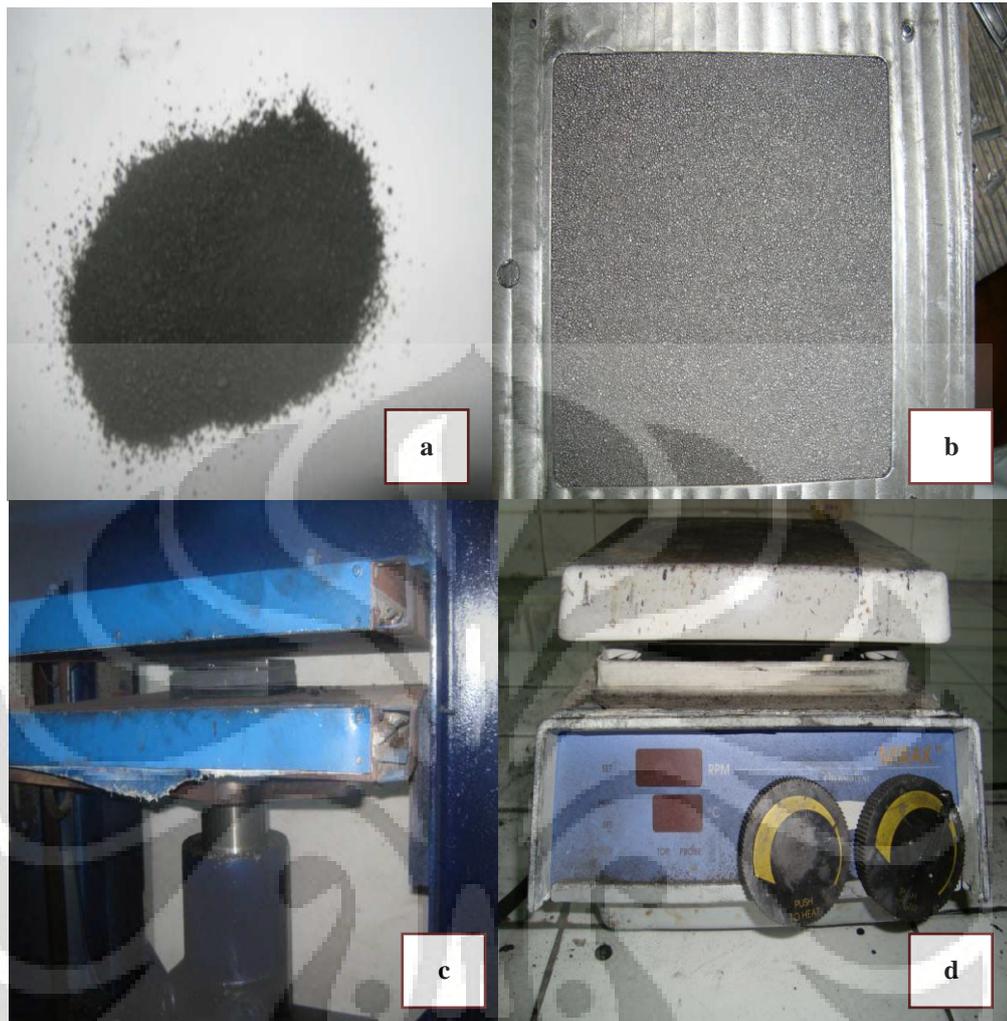
3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Pembuatan Pelat

Sebelum proses pembuatan pelat dimulai pastikan peralatan dan bahan yang digunakan tersedia dan siap untuk digunakan. Pada mulanya bahan ditimbang dengan timbangan digital sesuai dengan proporsi dan kebutuhan dari masing-masing bahan komposit pelat bipolar tersebut. Komposisi bahan yang akan digunakan untuk pembuatan pelat tersebut dapat dilihat di Tabel 3.1.

Pencampuran dilakukan dengan proses *dry mixing* menggunakan mixer dan beaker glass, serta *hot plate* untuk memanaskan saat pengadukan. Prosedur pencampuran dan pencetakan pelat tersebut adalah:

1. Siapkan alat dan bahan yang dibutuhkan.
2. Larutkan dengan cara mengaduk *epoxy resin* dan *hardener* dengan metanol dalam beaker glass 100 ml terpisah selama 5 menit.
3. Campurkan grafit sintetis, *carbon black*, dalam beaker glass 1000 ml dan kemudian diaduk hingga rata.
4. Masukkan *epoxy resin* yang telah diencerkan dengan metanol 35 ml ke dalam adonan dan *mixing* selama 5 menit.
5. Masukkan *epoxy hardener* yang telah dilarutkan dengan metanol 35 ml ke dalam adonan dan *mixing* selama 5 menit.
6. *Mixing* kembali adonan di luar *hot plate* selama 3 menit untuk meratakan distribusi penyebaran keenceran metanol, grafit dan *epoxy*.
6. Lanjutkan *mixing* adonan di atas *hot plate* (100°C) selama 15 menit untuk mengeluarkan metanol yang ada di adonan
8. Hasil adonan tersebut kemudian dimasukkan ke dalam cetakan, dan kemudian diletakan di atas *hydraulic pressure machine* untuk dilakukan hot press ($T = 70^{\circ}\text{C}$) selama 4 jam dengan tekanan 300 kg/cm^2 atau setara 30 MPa. Tekanan yang digunakan 30 MPa [35] akan meningkatkan konduktivitas paling tinggi.



Gambar 3.3 (a) Hasil *mixing* serbuk komposit; (b) Peletakan serbuk komposit dalam cetakan; (c) Proses *hot press* dengan *hydraulic pressure machine*; (d) Alat *Hot Plate*

3.3.2 Pembuatan Spesimen Pengujian

Pelat yang sudah dihasilkan kemudian dibagi menjadi beberapa bagian, setelah itu akan dilakukan pengujian untuk mengetahui karakterisasi komposit carbon yang digunakan:

- a. Untuk pengujian densitas dan porositas dibuat sampel kecil dengan ukuran 2 x 2 cm sebanyak 5 buah. Dalam standar ASTM diatur bahwa volume minimal untuk specimen uji adalah 1 cm² [36]. Cuplikan tersebut kemudian di amplas hingga permukaannya rata. Namun pada kedua pengujian ini sampel yang akan diuji diambil dari sampel yang sudah dilakukan pengujian konduktivitas terlebih dahulu.

- b. Untuk pengujian kekuatan lentur dibuat cuplikan berukuran 12 x 1,3 x 0,3 cm sebanyak 5 buah. Sampel ini diampelas hingga permukaannya rata sehingga tidak adanya permulaan crack yang dapat terjadi ketika akan dilakukan pengujian kekuatan lentur.
- c. Untuk konduktivitas dibuat 5 buah cuplikan berukuran 2 x 2 cm sebanyak 5 buah. Bagian specimen tersebut juga diampelas karena permukaan yang rata dan halus sangat dibutuhkan agar arus yang ditembakkan dapat diterima oleh penangkap arus setelah ditembakkan dari alat penguji konduktivitas.

3.3.3 Karakterisasi Material

3.3.3.1 Pengujian Porositas

Pengujian porositas mengacu pada standar ASTM C20 dengan alat yang bernama Densitometri. Sampel ditimbang di udara luar dan hasilnya dicatat sebagai D. Lalu sampel direndam dalam air pada suhu 100°C selama 2 jam dan kemudian didinginkan selama 12 jam dalam air. Sampel tersebut ditimbang dan dicatat sebagai S. Kemudian sampel dikeringkan dengan menggunakan kain katun, ditimbang dan dicatat sebagai S_w . Nilai porositasnya dihitung dengan aturan sebagai berikut [37]:

$$\text{Porositas (\%)} = [S_w - D / D - S] \times 100\% \dots \dots \dots (3.1)$$

3.3.3.2 Pengujian Densitas

Pengujian dan Pengukuran rapat massa dapat dilakukan dengan prinsip perbandingan massa material di udara dengan massa material di dalam air (ASTM D792) [38]. Densitas (kerapatan massa) adalah ukuran massa suatu benda per unit volume, densitas dinyatakan dalam satuan kg/m³ dilambangkan dengan ρ .

$$\rho = m/v \dots \dots \dots (3.2)$$

dimana: ρ = densitas (kg/m^3)
 m = massa (kg)
 V = volume (m^3)

Perhitungan *bulk density* penting dalam mempengaruhi karakteristik sifat keramik atau komposit. Densitas pada bentuk yang kompleks ditentukan dengan menggunakan prinsip Archimedes, yaitu membandingkan perbedaan berat di udara dengan berat dalam cairan. Berikut persamaan untuk menentukan densitas sampel:

$$\rho = A/(A-B) \dots \dots \dots (3.3)$$

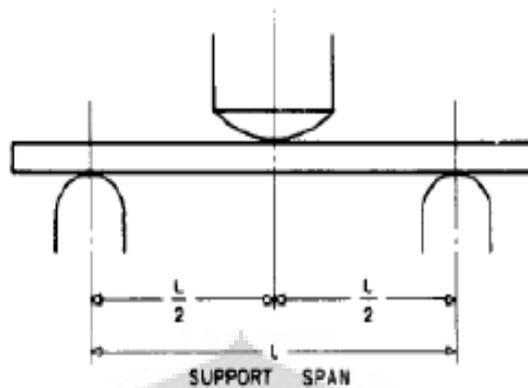
dimana: ρ = *bulk density* (gr/cm^3)
 A = massa sampel kering (gr)
 B = massa sampel tergantung dalam air (gr)
 ρ air = rapat massa air pada suhu tertentu 28.5°C (0.996089 gr/cm^3)

Prosedur pengujian densitas dengan metode Archimedes adalah sebagai berikut [41] :

1. Sampel pelat bipolar ditimbang pada timbangan digital, dan nilainya dicatat sebagai massa sampel di udara (A)
2. Lalu sampel dicelupkan dalam gelas berisi *aquades*, pencelupan sampel harus dilakukan secara menyeluruh pada area sampel hingga semua permukaan sampel benar-benar tercelup di dalam *aquades* tetapi tidak boleh menyentuh dasar dan pinggir gelas.
3. Setelah sampel tercelup, sampel ditimbang dan nilainya adalah (B)

3.3.3.3 Pengujian Kekuatan Fleksural

Tujuan dari pengujian kekuatan lentur ini adalah untuk mengetahui kekuatan *bipolar plate* ini dari beban tekan yang datang. Pengujian bending lebih tepat digunakan untuk menentukan kekuatan pelat bipolar daripada uji tarik, karena dalam aplikasi dalam fuel cell nanti, pelat bipolar lebih banyak menerima beban tekan dari gas hidrogen kearah luar daripada menerima beban regang dan juga pada saat dipasangkan dengan *endplate*. Pengujian kelenturan ini dilakukan dengan metode *three point bending*, seperti ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.4 Skema Pengujian Kekuatan Fleksural [39]

Pada skema gambar pengujian di atas terdapat tiga titik utama dengan 2 titik sebagai tumpuan dan satu titik pembebanan pada bagian tengahnya. Beban lentur diberikan dengan kecepatan konstan hingga specimen mengalami patah. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) T22K. Standar pengujian kekuatan lentur ini menggunakan ASTM D790 [39] dengan panjang support span 64 mm, diameter punch 12 mm dan kecepatan pembebanan 1.5 mm/menit.



Gambar 3.5 (a) Alat pengujian Kekuatan Lentur; (b) Peletakan spesimen uji

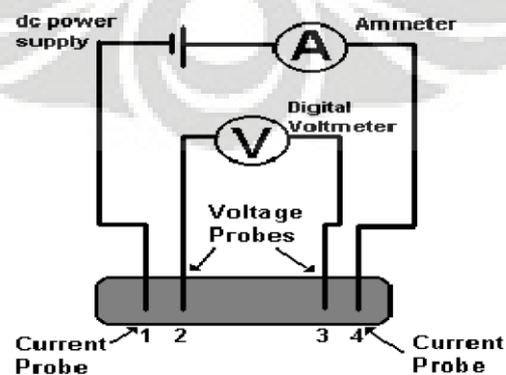
Data yang didapat dari pengujian ini adalah beban maksimal (P) yang diberikan hingga mengalami patah. Beban yang dihasilkan ini kemudian dikonversikan untuk menghitung stress (tegangan) maksimal dari sampel tersebut. Hasil perhitungan kekuatan kekuatan lentur adalah:

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \dots\dots\dots(3.4)$$

dimana : σ_f = tegangan / kekuatan lentur (MPa)
 P = beban maksimal (N)
 L = panjang specimen (mm)
 b = lebar specimen (mm)
 d = tebal specimen (mm)

3.3.3.4 Pengujian Konduktivitas

Pengujian konduktivitas ini dimaksudkan untuk mengetahui kemampuhantaran listrik dari bipolar plate yang dibuat. Kemampuhantaran listrik ini sangat penting mengingat pada aplikasinya *bipolar plate* ini berfungsi sebagai membrane pengumpul arus. Alat pengujian konduktivitas listrik ini menggunakan alat digital *four point probe test*. Dengan menggunakan 4 titik yang terdiri dari titik 1 dan 4 sebagai titik pengukur arus yang dibaca di *amperemeter*, sedangkan titik 2 dan 3 sebagai pengukur tegangan yang akan dibaca di *voltmeter*. Hasil dari pengujian ini adalah resistivitas listrik dari specimen uji.



Gambar 3.6 Skema Uji Konduktivitas [40]

Proses pengujian konduktivitas ini adalah dengan menaruh specimen uji di dalam mesin uji yang kemudian dijepit dengan cakram agar specimen berfokus pada arus yang akan ditembakkan. Dari hasil pengujian ini akan dihasilkan resistivitas listrik (ρ). Dengan nilai ini kita akan dapat menghitung nilai konduktivitas listrik dengan persamaan [40]:

$$\sigma = 1/\rho \dots \dots \dots (3.5)$$

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



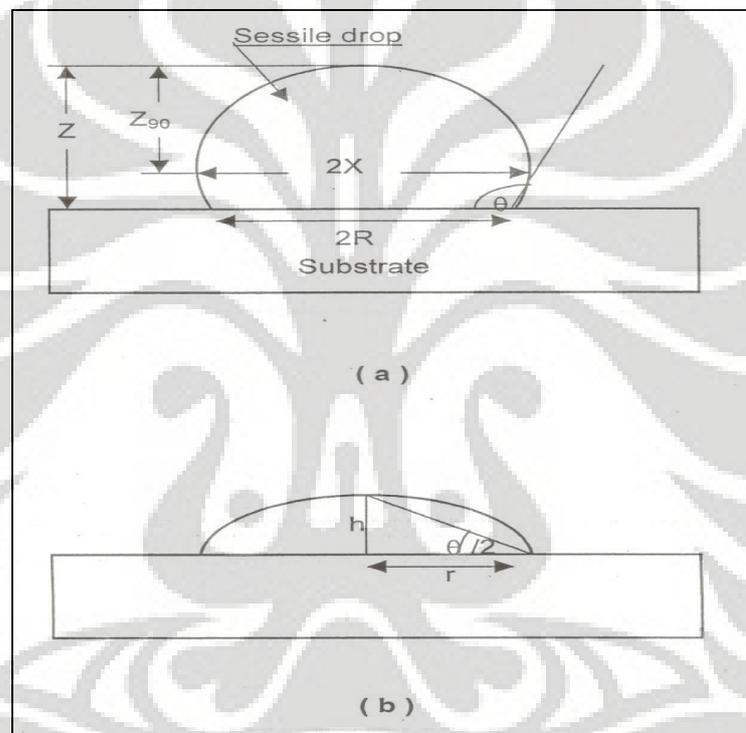
Gambar 3.7 Alat Uji Konduktivitas

3.3.4 Pengujian *Sessile* (Sudut kontak)

Pengujian sudut kontak pada material komposit bertujuan untuk melihat dan mengamati apakah terjadi pembasahan yang baik antara matriks (*Epoxy*), penguat (Grafit), serta *filler* (*Carbon black*). Pembasahan yang baik akan terjadi apabila sudut kontak (θ) yang dibentuk antara permukaan padat dan cair pada komposit yaitu lebih kecil dari 90^0 . Dengan pembasahan yang baik, maka sifat mekanik yang dibentuk oleh komposit pelat bipolar tersebut akan semakin baik pula.

Pengujian ini dilakukan dengan cara meneteskan campuran *epoxy resin* dan *hardener* (1:1) pada bagian pelat bipolar yang sudah dilakukan pengujian fleksural. Setelah dilakukan penetasan maka sudut kontak permukaan cair dan padat yang terbentuk dapat dilihat dengan cara mengambil gambar pada saat pembasahan terjadi. Berikut ini cara mengukur atau menghitung sudut kontak yang terjadi pada pengujian *sessile* :

a). Ketika nilai $\theta > 90^\circ$ (Kondisi pembasahan yang kurang baik)



Gambar 3.8 (a) Skematik Perhitungan Sudut Kontak untuk *Non-Wetting* ; (b) Pembasahan *Sessile Drops*

Dimana untuk mendapatkan nilai θ kita harus mengetahui parameter berikut :

$2X$ = Diameter maksimum

$2R$ = Diameter *base*

Z = Tinggi maksimum

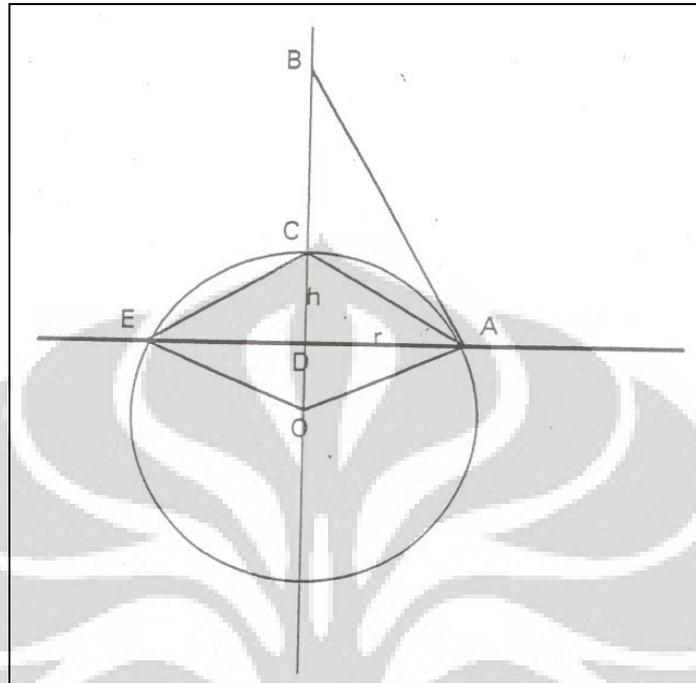
θ = Sudut kontak

$\beta = \rho g b^2 / \gamma_{lv}$

b = Radius dari kurva awal

Φ = Sudut normal dari permukaan Z

b). Ketika nilai $\theta < 90^\circ$ (Kondisi pembasahan yang baik)



Gambar 3.9 Skematik Perhitungan Sudut Kontak untuk *Good Wetting*.

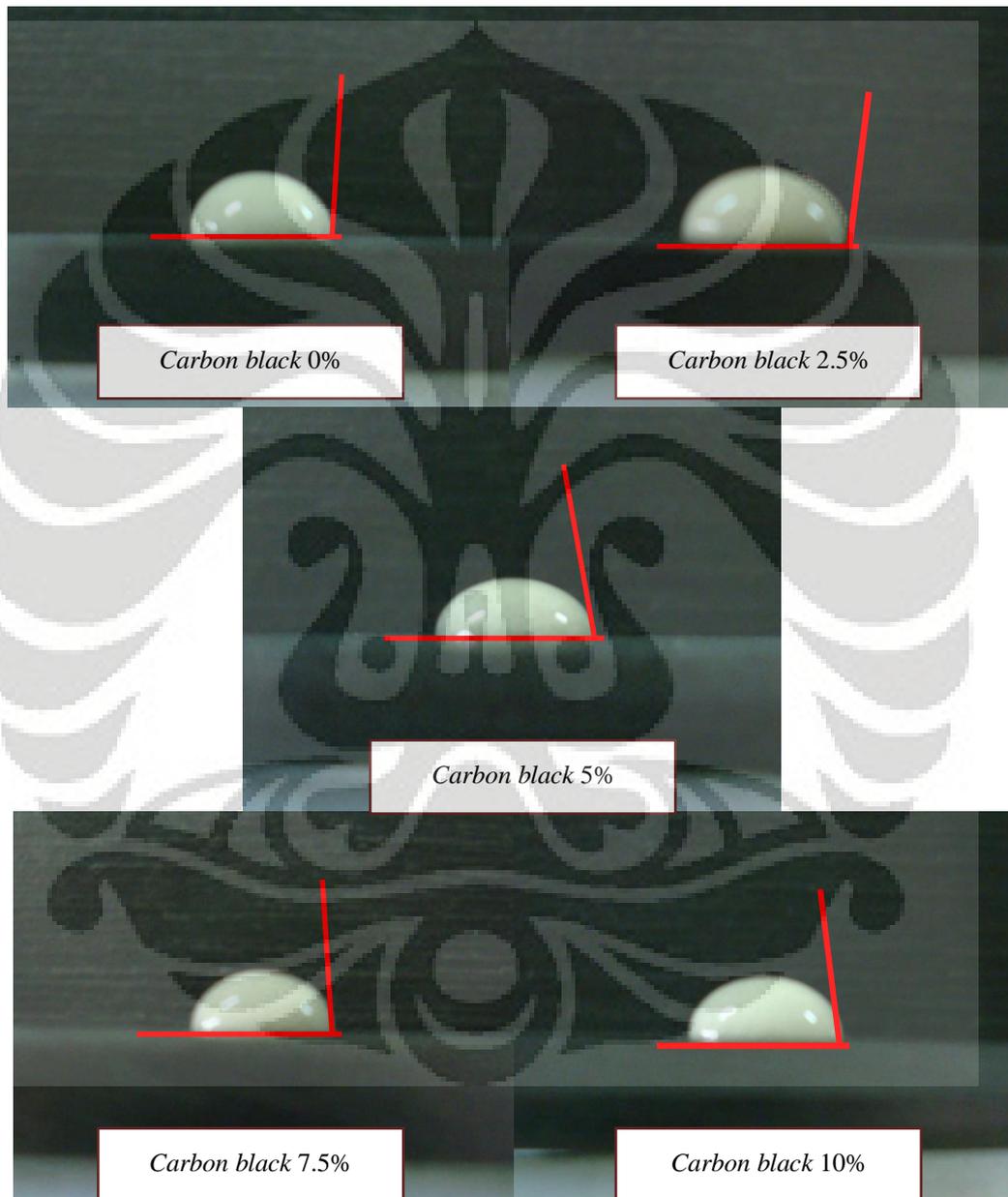
Bentuk dari hasil pengujian *sessile drop* ini dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan *spherical*, dapat diwakili dengan area yang termasuk pada titik A, C, E mempunyai tinggi yang sama dengan h, dan radius yang sama dengan r.

$$\begin{array}{ll}
 \text{In } \triangle OAE & \overline{CE} = \overline{CA} \\
 \overline{OE} = \overline{OA} \text{ (radius sama)} & \angle CED = \angle CAD \\
 \overline{OD} \perp \overline{AE} & \text{Karena } \angle CED = \angle CAD, \text{ maka} \\
 \overline{DE} = \overline{DA} & \angle CAB = \angle CAD \\
 & \tan \theta = h/r \\
 & \theta/2 = \tan^{-1} h/r \\
 \\
 \text{In } \triangle CEA & \\
 \overline{DE} = \overline{DA} & \\
 \overline{EA} \perp \overline{CD} & \text{Jadi, } \theta = 2 \tan^{-1} h/r \\
 \overline{CE} = \overline{CA} & \\
 \angle CED = \angle CAD &
 \end{array}$$

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengamatan Sudut Kontak



Gambar 4.1 Hasil Pengujian Sudut Kontak Pelat Bipolar

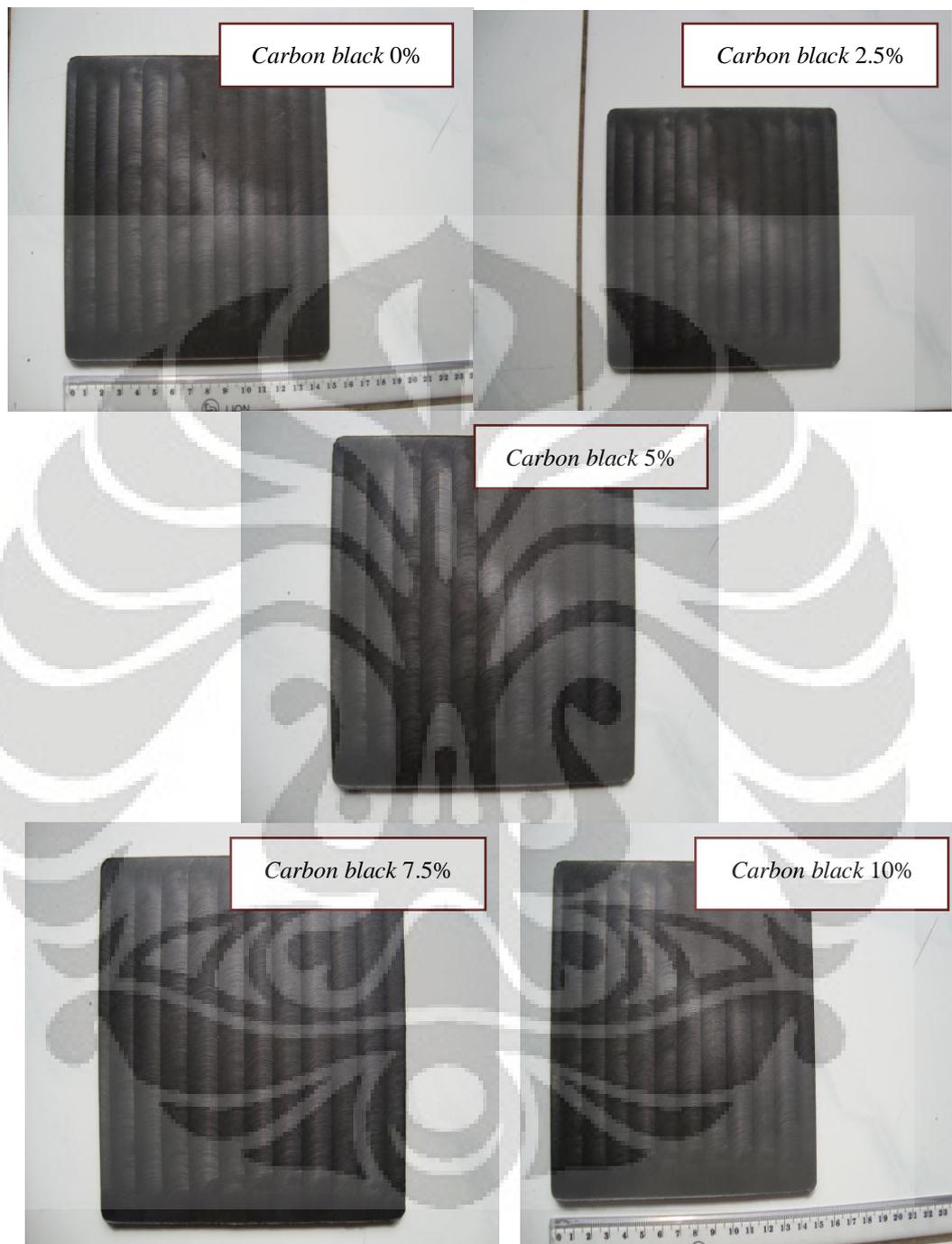
Pengujian sudut kontak diatas dilakukan dengan cara meneteskan campuran *epoxy resin* dan *hardener* dengan perbandingan 1:1 pada komposit pelat bipolar, lalu setelah itu dilakukan proses pengambilan gambar. Interaksi atau pembasahan yang baik antara matriks dan penguat terjadi jika matriks *epoxy resin* mampu secara sempurna membasahi seluruh permukaan penguat (grafit) agar terjadi suatu ikatan yang baik. Kemampuan *epoxy resin* untuk membasahi penguat tersebut dapat diukur dengan energi atau tegangan permukaan cair terhadap padat dan juga dapat diwakili oleh suatu sudut kontak (θ) antara permukaan cair dan padat tersebut. Dimana jika nilai θ lebih kecil dari 90^0 (tegangan atau energi permukaan kecil), maka pembasahan yang baik akan terjadi antara matriks dengan penguat. Dari Gambar 4.1 diatas, dapat dilihat sudut kontak dari hasil interaksi atau pembasahan antara matriks *epoxy* dengan penguatnya (grafit) serta *filler carbon black*.

Sudut kontak (θ) yang didapat secara kuantitatif setelah dilakukan perhitungan sudut kontak pada pelat bipolar 0% CB (104.30^0), 2.5% CB (110.5^0), 5% CB (72.05^0), 7.5% CB (80.20^0), dan 10% CB (76.09^0). Setelah dilakukan pengukuran terhadap sudut kontak tersebut, dapat dilihat bahwa sudut kontak yang dibentuk antara permukaan cair dan padatnya lebih dominan memiliki sudut kontak yang lebih kecil dari 90^0 , kecuali pelat bipolar dengan 0% dan 2.5 % CB.

Metanol yang digunakan sebagai pelarut *epoxy resin* dan *hardener* pada kali ini menjadi *wetting agent* dari matriks *epoxy* dan penguat grafit dan *carbon black*, sehingga sudut kontak yang dibentuk pada gambar diatas menjadi lebih kecil dari 90^0 . Hal itu menandakan pembasahan yang baik terjadi antara epoxy dengan grafit, sehingga *interface* yang terbentuk juga semakin baik dan kuat. Oleh karena itu pelat bipolar tersebut akan menghasilkan kekuatan dan sifat-sifat yang baik pula.

Bila dilihat lebih teliti lagi, seiring dengan penambahan *carbon black*, sudut kontak yang dibentuk secara umum akan semakin mengecil. Dengan sudut kontak yang kecil ini, maka penambahan *carbon black* dapat juga dikatakan membantu *wettability* dari grafit komposit pelat bipolar.

4.2 Hasil Pengamatan Visual Pelat Bipolar



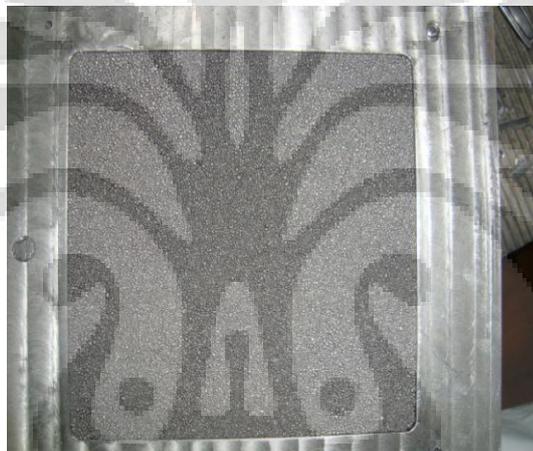
Gambar 4.2 Hasil Pencetakan Pelat Bipolar

Dari hasil pengamatan visual diatas, semua pelat bipolar yang dihasilkan relatif baik dan sama. Permukaan pelat yang dihasilkan juga relatif halus dan rata. Hal ini dikarenakan proses pencampuran yang baik dari *epoxy resin* dan *hardener*,

Universitas Indonesia

grafit serta *carbon black*. Campuran yang didapat pada penelitian ini memiliki tingkat kekeringan yang hampir sama pada semua pelat. Campuran yang relatif kering adalah campuran yang cukup baik agar proses *setting epoxy* dan *hardener* dapat terjadi secara menyeluruh. Dengan penyettingan yang baik dan merata tersebut, maka akan didapatkan pelat yang mempunyai permukaan visual yang mulus, keras dan kokoh, serta minim cacat (porositas).

Faktor peletakan serbuk hasil campuran *epoxy*, grafit dan *carbon black* ke dalam cetakan juga mempengaruhi hasil akhir dari pelat bipolar yang akan dihasilkan. Peletakan serbuk komposit yang menyebar secara merata adalah cara yang paling baik untuk mendapatkan pelat bipolar yang baik. Metode peletakan serbuk komposit ini dapat dilihat pada Gambar 4.3 dibawah ini.



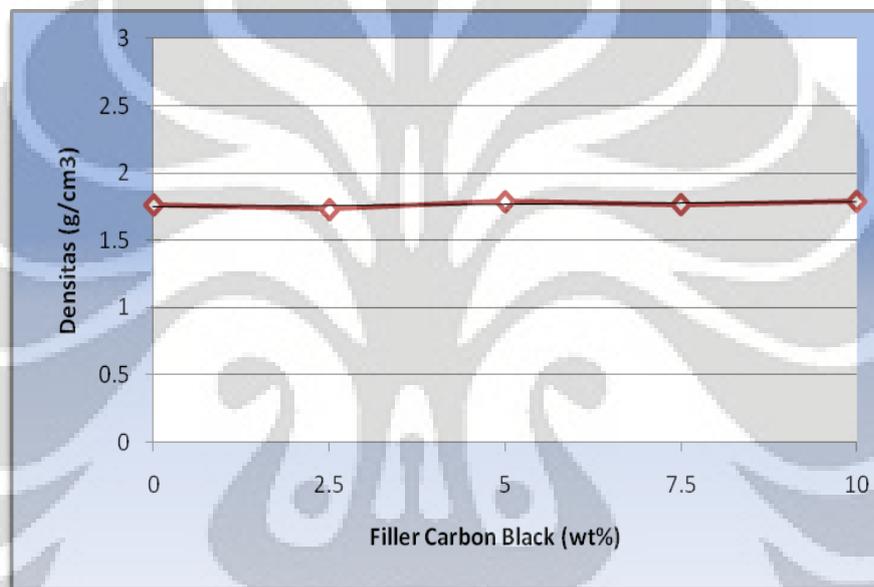
Gambar 4.3 Peletakan Serbuk Komposit (hasil *mixing*) kedalam Cetakan

4.3 Pengujian Densitas

Pengujian densitas ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui massa jenis pelat bipolar tersebut. Dengan pelat bipolar yang mempunyai massa jenis yang kecil, maka hal itu akan meningkatkan efisiensi PEMFC pada saat diaplikasikan, misalnya pada kendaraan bermotor. Selain itu pelat bipolar yang ringan sangat berguna terutama dalam aplikasi perlengkapan *portable*. Tabel 4.1 berikut ini menunjukkan hasil pengujian densitas.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Densitas

Sampel	Kadar CB	ρ (g/cm ³)
1	0%	1.76
2	2.5%	1.73
3	5%	1.78
4	7.5%	1.76
5	10%	1.79

**Gambar 4.4** Hasil Pengujian Densitas

Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa seiring dengan penambahan CB, maka nilai densitas pelat bipolar tersebut cenderung fluktuatif. Pada penambahan CB 2.5% terjadi total penurunan sekitar 1.92% dari kadar CB 0%. Setelah itu densitas tersebut mengalami kenaikan sebesar 3.35% pada kadar CB 5%, pada kadar 7.5 % mengalami penurunan sebesar 1.18%, dan pada kadar CB 10% mengalami kenaikan kembali sebesar 1.34%. Namun perubahan hasil uji ini tidak terlalu berubah secara signifikan.

Pada penelitian ini grafit sintetis dengan nilai densitas 2.2 gr/cm³ yang dipakai adalah sekitar 80% dari total pelat bipolar tersebut. Jika komposisi grafit dikonversikan dalam bentuk gram adalah sekitar 1.76 gr/cm³. Oleh karena itu

densitas yang dihasilkan pada pelat bipolar akan mempunyai rentang nilai yang berdekatan ($1.73-1.79 \text{ gr/cm}^3$) dengan densitas grafit walaupun ditambah *carbon black*. Dengan hukum pencampuran, seharusnya nilai densitas yang didapat seiring penambahan CB adalah menurun. Hal ini dikarenakan nilai densitas dari epoxy (sekitar 1.2 gr/cm^3) dan *carbon black* (sekitar 1.8 gr/cm^3) yang lebih kecil dibandingkan dengan densitas seluruh grafit. Ketika *carbon black* ditambahkan di dalam campuran grafit dan epoxy, maka densitas campuran tersebut akan mengalami penurunan karena densitas CB yang lebih kecil dibanding densitas campurannya.

Densitas yang dihasilkan pada penelitian ini dapat ditinjau dari perilaku polimer komposit. Matriks *epoxy resin* yang dipakai adalah sebuah polimer jenis *thermoset* yang memiliki spesifik volume (merupakan fungsi tekanan, temperatur dan *cooling rate*) dimana dalam keadaan tertentu, misalnya saat pendinginan lambat maka pergerakan molekul-molekul memiliki kesempatan untuk berdekatan satu sama lain. Oleh karena itu nilai *free volume* cenderung turun dan menyebabkan nilai densitas yang berdekatan.

Pada penelitian ini, ukuran serbuk dari *filler* CB yang digunakan memiliki ukuran yang lebih besar ($140 \text{ mesh} = 105 \mu\text{m}$) dibanding grafit sintetis ($<50 \mu\text{m}$), sehingga akan menyebabkan tingkat dispersi atau penyebaran partikel CB yang semakin buruk. Semakin besar ukuran partikel *filler* maka densitas atau kerapatannya seharusnya akan semakin menurun.

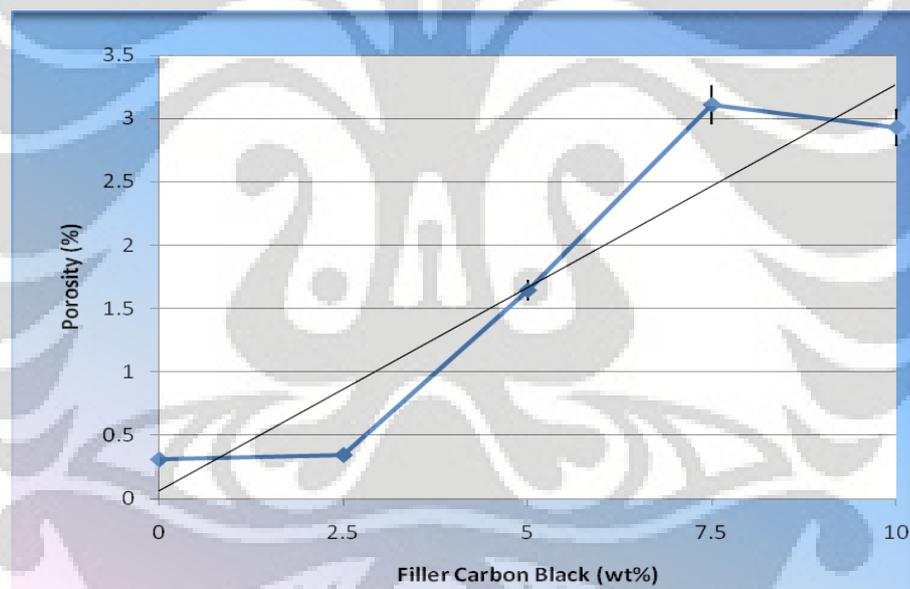
Berdasarkan pengujian densitas yang telah dilakukan, nilai densitas yang paling optimum didapatkan pada sampel dengan penambahan *filler* CB sebesar 2.5%, yaitu sebesar 1.73 gr/cm^3 . Namun secara umum semua pelat bipolar yang dihasilkan ini sangat ringan dan masih di dalam syarat berat jenis pelat bipolar yang baik, yaitu 5 g/cm^3 [13]. Nilai densitas pelat bipolar akan mempengaruhi berat total suatu *fuel-cell stack* [14]. Dimana, untuk menghasilkan *fuel cell* yang ringan nilai densitas pelat bipolar yang didapatkan harus serendah mungkin [14].

4.4 Pengujian Porositas

Porositas merupakan salah satu parameter yang dapat menentukan kualitas performa pelat bipolar pada sistem PEMFC. Dimana pelat bipolar tersebut harus mempunyai sifat tidak tembus gas (*impermeability*) yang baik agar tidak merusak rekasi *fuel cell* yang sedang berlangsung.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Porositas

sampel	% Porositas
1	0.30
2	0.34
3	1.64
4	3.10
5	2.93



Gambar 4.5 Hasil Pengujian Porositas

Pada Tabel 4.2 nilai porositas pelat bipolar yang paling kecil terletak pada komposisi grafit sintetis tanpa penambahan *carbon black* (CB 0%). Nilai porositas pelat bipolar akan naik seiring dengan penambahan CB dan akhirnya pada penambahan CB 10% nilai porositas tersebut mengalami penurunan sedikit. Pada penambahan 2.5% CB porositas mengalami kenaikan sebesar 11.00%, lalu juga mengalami kenaikan sebesar 379.30% pada penambahan 5% CB, selanjutnya

mengalami kenaikan kembali sebesar 89.05% pada penambahan 7.5%, dan pada akhirnya mengalami penurunan 5.72%.

Porositas dapat terjadi karena proses penguapan metanol. Proses *hot press* pada pencetakan *bipolar plate* ini akan mengeluarkan metanol yang digunakan untuk melarutkan *epoxy*. Oleh karena itu penguapan metanol tersebut akan meninggalkan banyak porositas pada permukaan maupun bagian dalam. Selain itu *carbon black* itu sendiri juga memiliki struktur yang mirip seperti porositas. Oleh karena itu jika *carbon black* ditambahkan pada pelat bipolar, maka nilai porositasnya akan semakin naik.

Penyebab terjadinya rongga-rongga dalam sampel uji disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu tingginya viskositas atau masih lembabnya campuran serbuk komposit pada daerah tertentu sehingga campuran tersebut mungkin saja menyerap gelembung-gelembung udara (kemampuan alirnya rendah) dan ketika dilakukan proses pencetakan akan menghasilkan kepadatan yang tidak merata. Nilai porositas akan semakin besar pada penambahan CB dengan ukuran partikel (140 *mesh*) yang lebih besar dari ukuran partikel grafit, karena dispersi atau penyebaran maupun pembasahan oleh monomer *epoxy* dengan grafit dan CB akan semakin buruk.

Secara keseluruhan nilai porositas yang dihasilkan tidak terlalu besar seiring dengan penambahan *filler* CB yang berkisar diantara 0.30–3.10%. Dengan tingkat porositas yang kecil akan meningkatkan efisiensi performa pelat bipolar pada sistem *fuel cell*. Sehingga diharapkan dapat memenuhi kriteria pelat bipolar yang baik pada penggunaannya yang dipersyaratkan pada pemakaian *fuel cell* sebagai salah satu energi alternatif di masa depan.

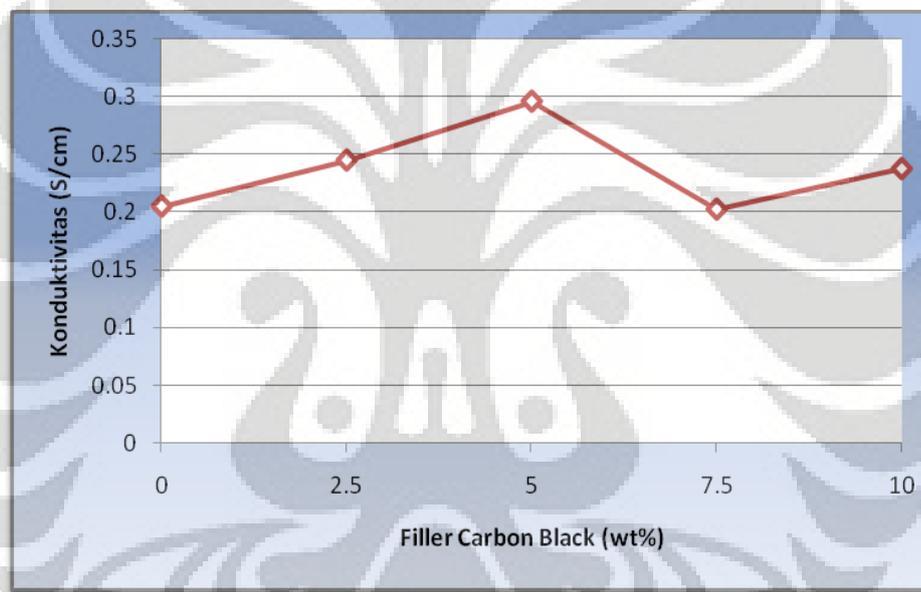
4.5 Pengujian Konduktivitas

Pelat bipolar sangat memiliki peranan yang besar dalam sistem *fuel cell*. Dimana fungsi utama dari pelat bipolar tersebut adalah mengumpulkan dan mengalirkan arus dari kutub anoda ke kutub katoda. Oleh karena itu material pelat bipolar harus memiliki sifat konduktivitas listrik yang baik untuk mengantarkan atau menghasilkan arus listrik tersebut. Dari hasil pengukuran resistivitas atau hambatan yang dilakukan oleh alat *four point probe* akan didapatkan suatu nilai

konduktivitas (S/cm) pelat bipolar yang dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.6.

Tabel 4.3. Hasil Pengujian Konduktivitas

Sampel	Konduktivitas (S/cm)
1	0.20
2	0.24
3	0.29
4	0.20
5	0.23



Gambar 4.6 Hasil Pengujian Konduktivitas

Dari Gambar 4.6 di atas terlihat data yang diperoleh cenderung naik sampai penambahan CB 5%, lalu selanjutnya turun dan kembali lagi naik pada penambahan CB 10%. Pada penambahan 2.5% CB terjadi kenaikan nilai konduktivitas sebesar 19.02%, lalu pada penambahan 5% CB nilai konduktivitas juga mengalami kenaikan sebesar 20.90%, selanjutnya pada penambahan 7.5% CB mengalami penurunan sebesar 31.52%, dan akhirnya pada penambahan 10% CB mengalami kenaikan kembali sebesar 17.32%. Penambahan 5% CB pada pelat bipolar ini memiliki nilai konduktivitas yang paling besar dibandingkan dengan pelat bipolar yang lain yaitu sebesar 0.29 S/cm.

Pada material komposit, penambahan *carbon black* digunakan sebagai antistatik, *electrostatic dissipative* (daya disipasi listrik), dan *filler konduktif* [8]. *Carbon black* dengan luas permukaan yang tinggi dapat mengumpulkan arus listrik pada konsentrasi yang lebih rendah dan membentuk jaringan karbon konduktif. *Carbon black* juga berfungsi sebagai medium dari proses migrasi elektron didalam grafit dan *epoxy resin*, sehingga arus yang mengalir didalamnya akan saling terdorong dan semakin mudah bergerak secara kontinyu yang menyebabkan arus yang dihasilkan akan semakin besar. Hal ini yang menyebabkan nilai konduktivitas pada grafik diatas yang semakin meningkat sampai titik optimum pada penambahan CB 5% dan selanjutnya akan mengalami penurunan.

Penurunan nilai konduktivitas listrik pada penambahan CB 7.5% mungkin disebabkan oleh meningkatnya porositas pada penambahan CB 7.5% yang menyebabkan turunnya nilai konduktivitas listrik. Adanya porositas yang terbentuk tersebut membuat spesimen uji akan sulit mengalirkan arus dengan baik, sehingga nilai konduktivitasnya menjadi berkurang. Faktor lain yang juga dapat menyebabkan penurunan nilai konduktivitas itu juga dikarenakan ukuran partikel dari *carbon black (140 mesh)* yang lebih besar dari grafit sintetis, sehingga semakin banyak komposisi CB dalam campuran serbuk komposit tersebut maka akan semakin banyak kemungkinan partikel yang lebih besar didalam campuran serbuk komposit tersebut. Hal inilah yang menyebabkan nilai konduktivitas semakin menurun [34].

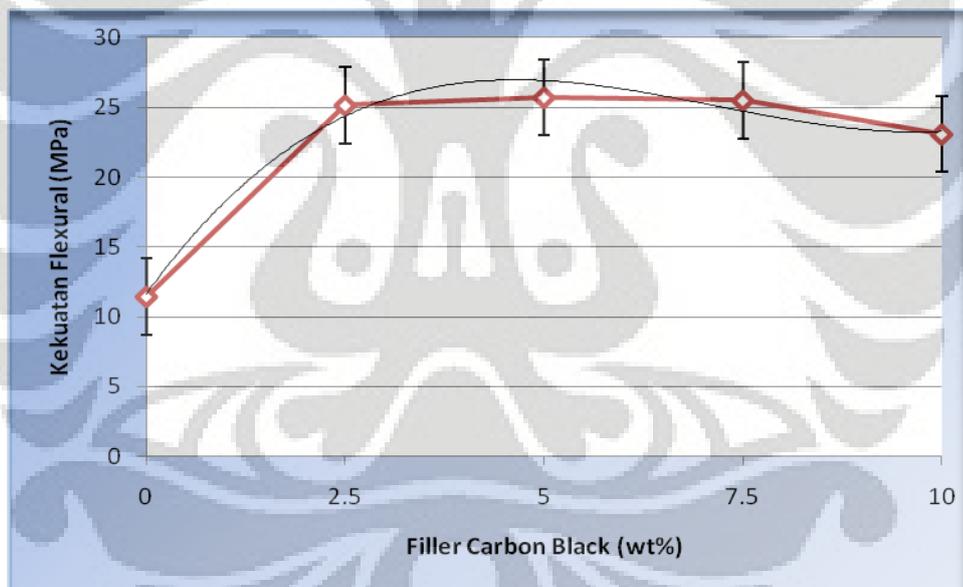
Secara umum, nilai konduktivitas yang didapatkan dari lima pelat bipolar yang dihasilkan diatas masih belum bisa memenuhi target *Departement of Energy, USA* dimana nilai konduktivitas yang diinginkan adalah lebih tinggi dari 100 S/cm [18]. Nilai konduktivitas seharusnya bisa ditingkatkan dengan mengatur arah orientasi penguat dan CB dengan desain cetakan yang baik pula. Namun pada lima pelat bipolar ini, arah orientasi penguat tidak diatur sedemikian rupa sehingga tidak memiliki orientasi penguat dengan matriks yang searah.

4.6 Pengujian Fleksural

Data hasil pengujian fleksural untuk seluruh sampel disajikan dalam Tabel 4.4. dan digambarkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.7

Tabel 4.4. Hasil Pengujian Fleksural

sampel	Kekuatan Fleksural (MPa)
1	11.42
2	25.16
3	25.72
4	25.51
5	23.08



Gambar 4.7 Hasil Pengujian Fleksural

Dari grafik hasil pengujian fleksural diatas tampak bahwa penambahan *filler* CB akan meningkatkan kekuatan fleksural dari pelat bipolar. Kekuatan fleksural meningkat cukup signifikan pada penambahan 2.5% CB yaitu sebesar 120.27% dan selanjutnya naik lagi pada penambahan 5% (maksimum) sebesar 2.24%, lalu menurun pada penambahan 7.5% CB sebesar 0.83%, dan akhirnya menurun kembali sebesar 9.52% pada penambahan CB 10%. Hal ini terjadi

Universitas Indonesia

secara umum pada penambahan *carbon black* didalam polimer. Penambahan sedikit *carbon black* umumnya akan meningkatkan modulus elastis dari polimer komposit tersebut. Namun jika konsentrasi CB yang ditambahkan sangat tinggi maka kekuatan tarik dan fleksural kembali menurun. Kekuatan fleksural akan meningkat dengan maksimal dengan penambahan 5% CB pada polimer komposit dan selanjutnya akan menurun seiring dengan tingginya kadar CB didalam polimer komposit [36].

Carbon black biasanya dikaitkan dengan konsentrasi lokal karbon hitam yang bertindak sebagai *inhomogeneities* (ketidakhomogenan) [36], Sehingga partikel-partikel CB akan berkumpul pada daerah tertentu dan tidak tersebar secara merata. Ukuran partikel CB yang lebih besar juga mempengaruhi nilai kekuatan fleksuralnya. Luas permukaan partikel yang lebih kecil membuat area pembasahan antara *epoxy* dengan CB lebih kuat dibandingkan *epoxy* dengan grafit

Secara umum, nilai kekuatan fleksural yang dihasilkan berhasil memenuhi target DOE dimana nilai kekuatan fleksural yang diinginkan diatas 25 MPa [18]. Pada sampel pelat bipolar pertama (tanpa penambahan CB) masih memiliki nilai kekuatan fleksural yang jauh lebih kecil dari 25 MPa dan pada sampel ke lima juga lebih kecil namun masih mendekati target DOE. Kekuatan fleksural yang terbaik terdapat pada sampel ke tiga (penambahan 5% CB) yaitu 25.72 MPa.

4.7 Perbandingan Sifat Pelat Bipolar

Dari hasil penelitian di atas, maka dapat dilakukan suatu perbandingan antara sifat-sifat komposit pada setiap sampel yang dapat dilihat pada Tabel 4.5 dibawah ini.

Tabel 4.5 Perbandingan Sifat Bipolar

Sampel	1	2	3	4	5
Konduktivitas (S/cm)	0.20	0.24	0.29	0.20	0.23
Kekuatan Fleksural (MPa)	11.42	25.16	25.72	25.51	23.08
Porositas (%)	0.30	0.34	1.64	3.10	2.93
Densitas (gr/cm ³)	1.76	1.73	1.78	1.76	1.79

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa sampel 3 dengan penambahan *carbon black* 5% menghasilkan peningkatan nilai kekuatan fleksural dan konduktivitas yang paling tinggi (optimal). Walaupun pada sampel 3 tersebut memiliki porositas ketiga tertinggi, namun nilai porositas tersebut masih berada di batas aman sehingga gas-gas hidrogen atau oksigen, serta pengotor tidak masuk melalui pelat bipolar yang dapat merusak sistem kerja serta efisiensi dari PEMFC nantinya. Jika dibandingkan dengan sifat-sifat pelat bipolar yang baik dan telah ditargetkan oleh DOE (Tabel 2.5), kelima sampel pelat bipolar yang dihasilkan pada penelitian ini memiliki kekuatan fleksural yang tinggi dan nilai fleksural yang didapat secara umum sudah memenuhi target DOE, yaitu lebih besar 25 MPa. Akan tetapi nilai konduktivitas yang didapat pada penelitian ini masih belum bisa memenuhi target DOE, sehingga perlu adanya penelitian lebih lanjut agar dihasilkan komposisi dan performa komposit pelat bipolar yang optimal supaya dapat diaplikasikan sebagai sumber energi alternatif masa depan.



BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan penelitian pada kelima sampel komposit pelat bipolar ini, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Komposisi pelat bipolar yang paling optimal terjadi pada penambahan 5% *filler carbon black* karena mempunyai nilai konduktivitas yang cukup tinggi (0.29 S/cm) dan peningkatan kekuatan fleksural yang sangat baik (25.72 MPa) dibanding dengan penambahan *filler CB* 0%, 2.5%, 7.5%, dan 10%.
2. Komposit pelat bipolar dengan menggunakan 10% *filler carbon black* memiliki nilai densitas tertinggi sebesar 1.79 gr/cm³. Nilai densitas tersebut masih berada di dalam rentang yang diharapkan (dibawah 5 gr/cm³) pada penggunaan pelat bipolar untuk sistem PEMFC.
3. Komposit pelat bipolar dengan menggunakan 7.5% *filler carbon black* memiliki nilai porositas tertinggi sebesar 3.10%. Nilai ini masih berada didalam nilai yang aman untuk digunakan sebagai pelat bipolar untuk sistem PEMFC.
4. Komposit pelat bipolar dengan menggunakan 5% *filler carbon black* memiliki nilai konduktivitas listrik tertinggi sebesar 0.29 S/cm. Nilai ini masih jauh di bawah standard DOE yaitu diatas 100 S/cm.
5. Komposit pelat bipolar dengan menggunakan 5% *filler carbon black* memiliki nilai kekuatan fleksural tertinggi sebesar 25.72 MPa. Nilai ini berhasil memenuhi target DOE yaitu diatas 25 MPa.
6. Interaksi atau pembasahan yang baik antara polimer *epoxy* dengan grafit sintesis, serta *carbon black* dapat dilakukan dengan bantuan metanol (*wetting agent*). Hal ini dapat dibuktikan dengan nilai sudut kontak yang secara umum lebih kecil dari 90⁰ pada setiap pelat bipolar.
7. Pengembangan material komposit pelat bipolar dengan menggunakan grafit sintesis ini berhasil dilakukan. Hanya saja konduktivitas pelat bipolar yang ditargetkan pada penelitian ini tidak berhasil dicapai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] *Fuel Cell Handbook, 7th ed. EG&G services, Parson Inc. US Departement of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, West Virginia.2004.*
- [2] Rayment,Chris. “*Introduction to Fuel Cell Technology*”. Department of Aerospace and Mechanical Engineering. Notre Dame. May 2, 2003.
- [3] <http://www.alpensteel.com/article/65-109-energi-fuel-cell-sel-bahan-bakar-bakar/1739—perkembangan-fuel-cell.html>
- [4] Nikhil H. Jalani, *Development of Nanocomposite Polymer Electrolyte Membrane for Higher Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (Worchester Polytechnique Institute)
- [5] A. Kumar, R.G Ressay, in; D. Chandra. R.G Bautista (Eds.), *Foundamentals of Advanced Materials for Energy Conversion*. TMS. 2002. Pp 41 – 53
- [6] Yoghi Suharjanto, *Skripsi: Komposit Konduktif Polipropilena (PP)/Maleated-Anhydride-Grafted-Polypropylene (PP-g-MA)/Karbon untuk Aplikasi Pelat Bipolar Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells*, Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Juli 2009.
- [7] Fuel cell materials and components_ Sossina M. Haile * *Department of Materials Science and of Chemical Engineering, California Institute of Technology, 138-78, Pasadena, CA, 91125, USA*
- [8] <http://www.alpensteel.com/article/65-109-energi-fuel-cell-sel-bahan-bakar/1742--penerapan-teknologi-fuel-cell.html>
- [9] Hendrata Suhada, *Fuel Cell sebagai Penghasil Energi Abad 21* (Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra)
- [10] <http://aulia09.myblogrepublika.com/2009/03/09/pengembangan-nanokatalis-dan-nanokomposit-material-dalam-energi-alternatif-polymer-electrolyte-fuel-cell/>

- [11]. J.K.Kim dan Y.W.Mai, Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites(Elsevier Science Ltd,1998,hlm1,5-8
- [12] Yuhua Wang. Conductive Thermoplastic Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC). 2006.
- [13]. V. Mehta dan J.S. Cooper. Review and analysis of PEM Fuel Cell design and manufacturing. hal.114,32-53.2003.
- [14] 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)
- [15] <http://www.futureenergies.com/pictures/fuelcellpower.jpg&imgrefurl>
- [16] Review and analysis of PEM Fuel Cell design and manufacturing, Viral mehta, Joyce smith cooper. Department of mechanical engineering, university of seattle, WA 98195, USA
- [17] Besmann, Ted, James Klett, John Henry, Jr., and Edgar Lara-curzio. *Carbon Composite Bipolar plate for PEM Fuel Cells*.
- [18] Orest L. Adrianowycz et al., *Presentation: Flexible Graphite Resin Composite Bipolar plates for High Temperature High Energy Density PEM Fuel Cells*, Graf Tech International
- [19] Kakati Biraj, K, and Deka Dhanapati. *Effect of Resin Matrix Precursor on the Properties of Graphite Composite Bipolar plate for PEM Fuel Cell*. *Energy & Fuel* 21, 1681-1687.2007.
- [20] <http://www.psrc.usm.edu/macrog/epoxy.htm>
- [21] Harper.A. Charles. *modern plastics handbook 2000*. Mc Graw-Hill published company.hlm 2.62.USA.2000.
- [22] <http://www.galleries.com/minerals/elements/graphite/graphite.htm>

- [23] www.graphite.de/pdf/infoblatt-brennstoff-engl.pdf (18 November 2009 20.27 WIB)
- [24] www.graftech.com/getdoc/46c98ecfcc4b4345aefd8c913367d29/gti_download.aspx (5 september 2009 11.00 WIB)
- [25] http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_black
- [26] <http://carbon-black.org/>.
- [27] <http://carbon-black.org/uses.html>.
- [28] <http://www.koppers.com.au/images/UserUploadedImages/102/CarbonBlackMorphology.jpg>
- [29] Makkus RC, Janssen AHH, de Bruijn FA, Mallant RKAM. *Fuel Cell Bull.* 3:5. 2000.
- [30] R.B. Mathur, S.R. Dhakate, D.K. Gupta, T.L. Dhami, R.K. Aggarwal. *Effect of different carbon fillers on the properties of graphite composite bipolar plate. journal of materials processing technology 2003 .184–192.* 2008.
- [31] Gregor Hoogers. *Fuel Cell Technology Handbook.* CRC Press. Washington D.C. 2003.
- [32] D.F. Caulfield et al., *Wood Thermoplastic Composites Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite, Chap 13 (Taylor and Francis), hlm 4-5.* 2005
- [33] Mattews and Rawlings. *Composite Material: Engineering and Science.* New York. 2005.
- [34] Kuan, Hsu-Chiang (a), Chen-Chi M.Ma (a), Ke Hong Chen (a), Shih-Ming Chen (b). *Preparation, electrical, mechanical and thermal properties of composite bipolar plate for a fuel cell.*(a)Department of Chemical Engineering, National Tsing-Hua University, Hsin-Chi 30043, Taiwan

ROC, Materials Research Laboratories, Industrial Technology research. 2004.

- [35] 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.
- [36] Blunk, Richard, Mahmmoud Hassan Abd Elhamid, Daniel Lisi, Youssef Mikhail. “Polymeric Composite Bipolar Plates for Vehicle Application”. General Motor Global R&D Center, Fuel Cell Activities, 30500 Mound road. USA.2005.
- [37] American Standards for Testing Material international. ASTM C20-00 Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Garity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water. 2003.
- [38] American Standards for Testing Material international. ASTM D792-00 Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. 2003.
- [39] American Standards for Testing Materials International. ASTM D790–00 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. 2003.
- [40] American Standards for Testing Materials International. ASTM B193 – *Standard Test Methods for Resistivity of Electrical Conductor Materials*. 2003.
- [41] Anne Zulfia, *Diktat Kuliah Teknologi Komposit MMF420803*, Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2009.

Lampiran 1 Spesifikasi Epoxy resin dan Hardener Eposchon

Sifat	Nilai
Viskositas pada 25 ⁰ C	16000-20000
<i>Epoxy Equivalent (g/equiv)</i>	184-204
<i>Hydrolyzable chlorine content (%)</i>	< 0.05
<i>Colour according to the Gardner scale</i>	< 1

Sifat	Nilai
Kekuatan Tarik (kgf/cm ²)	410
Kekuatan Fleksural (kgf/cm ²)	810
Kekuatan Tekan (kgf/cm ²)	740
Kekuatan Geser Adhesive (kgf/cm ²)	160

Lampiran 2 Spesifikasi Grafit Sintetis MERCK

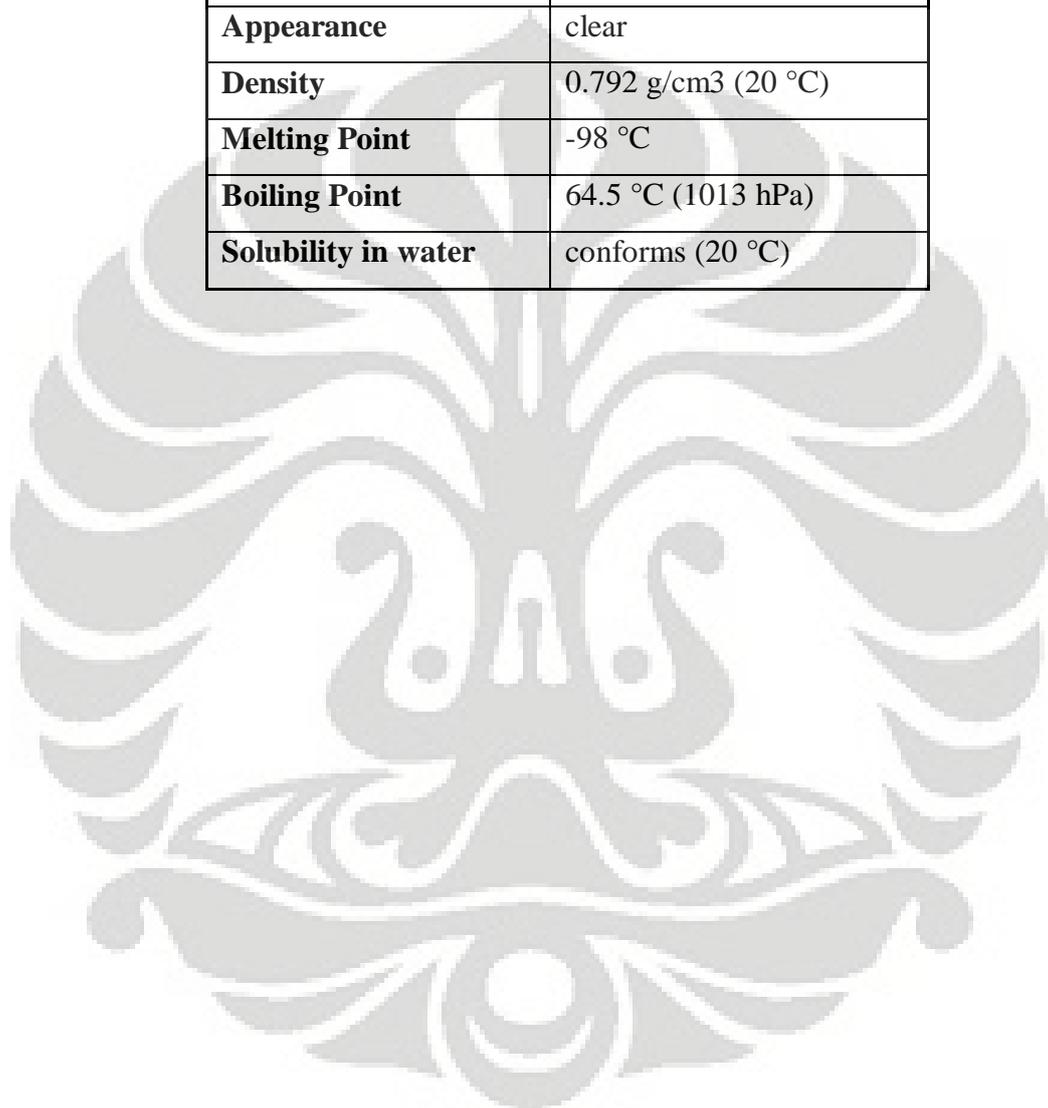
GRAPHITE (C) - 104206	
Massa molar	12.01g/mol
Data Kimia dan Fisika	
Kelarutan dalam air	(20 °C) tidak dapat larut
Densitas	2.2 g/cm ³ (20 °C)
Angka pH	5 - 6 (50 g/l, H ₂ O, 20 °C)
Spesifikasi	
Particle size (< 50 µm)	≥ 99.5 %
Bulk density	20 - 30 g/100ml

Lampiran 3 Spesifikasi Carbon Black

	PARAMETER	REQUIRED VALUE Tested according to GOST method
1.	Specific surface area, m ² /g	14 - 18
2.	DBP Absorption, cm ³ /100g	86 - 100
3.	pH value	7,5 - 9,5
4.	Ash content, %	max 0,5
5.	Losses at drying 105°C,%	max 0,5
6.	Sieve Residue % Mesh 0045 by GOST 6613-86	max 0,08

Lampiran 4 Spesifikasi Metanol ACS,ISO,Reag. Ph Eur [38]

Molecular Formula	CH ₃ OH
Purity (GC)	≥ 99.9 %
Molar Mass	32.04 g/mol
Appearance	clear
Density	0.792 g/cm ³ (20 °C)
Melting Point	-98 °C
Boiling Point	64.5 °C (1013 hPa)
Solubility in water	conforms (20 °C)



Lampiran 5 Hasil Pengujian Konduktivitas

	Epoxy (%)	CB (%)	Grafit sintetis (%)	Resistivitas (Ωcm)	Konduktivitas (S/cm)	Konduktivitas rata-rata (S/cm)
I	20	0	80.00	4.82	0.20	0.20
II	20	0	80.00	4.95	0.20	
III	20	0	80.00	4,86	0.20	
I	20	2.50	77.50	3.24	0.30	0.24
II	20	2.50	77.50	4.17	0.23	
III	20	2.50	77.50	4.84	0.20	
I	20	5.00	75.00	3.20	0.31	0.29
II	20	5.00	75.00	3.08	0.32	
III	20	5.00	75.00	3.86	0.25	
I	20	7.50	72.50	5.50	0.18	0.20
II	20	7.50	72.50	5.91	0.16	
III	20	7.50	72.50	3.41	0.29	
I	20	10.00	70.00	4.49	0.22	0.23
II	20	10.00	70.00	3.91	0.25	
III	20	10.00	70.00	4.23	0.23	

Lampiran 6 Hasil Pengujian Densitas

		A (Udara) (gr)	B (Air) (gr)	A-B (gr)	ρ air (gr/cm ³)	Densitas (gr/cm ³)	Densitas rata-rata (gr/cm ³)
CB 0%	I	3.3108	1.4409	1.8699	0.996089	1.76	1.76
	II	3.3665	1.4675	1.899	0.996089	1.76	
	III	3.5783	1.5575	2.0208	0.996089	1.76	
CB 2.5%	I	3.5227	1.5507	1.972	0.996089	1.77	1.73
	II	2.9463	1.1463	1.800	0.996089	1.63	
	III	3.3408	1.4722	1.8686	0.996089	1.78	
CB 5%	I	3.3702	1.4465	1.9237	0.996089	1.74	1.78
	II	3.1792	1.4285	1.7507	0.996089	1.80	
	III	3.2962	1.4849	1.8113	0.996089	1.81	
CB 7.5%	I	3.1329	1.365	1.7679	0.996089	1.76	1.76
	II	3.4015	1.5438	1.8577	0.996089	1.82	
	III	2.9964	1.2546	1.7418	0.996089	1.71	
CB 10%	I	3.7266	1.6553	2.0713	0.996089	1.79	1.79
	II	3.4755	1.5408	1.9347	0.996089	1.78	
	III	3.4178	1.5176	1.9002	0.996089	1.79	

Lampiran 7 Hasil Pengujian Porositas

		D (gr)	S (gr)	Sw (gr)	Sw-D (gr)	D-S (gr)	Porositas (%)	Porositas rata-rata (%)
CB 0%	I	3.207	1.3989	3.2107	0.0037	1.8081	0.20	0.30
	II	3.1915	1.3793	3.1959	0.0044	1.8122	0.24	
	III	3.5394	1.5408	3.549	0.0096	1.9986	0.48	
CB 2.5%	I	3.4118	1.5445	3.417	0.0052	1.8673	0.27	0.34
	II	3.2543	1.4771	3.2623	0.008	1.7772	0.45	
	III	3.3511	1.5051	3.3567	0.0056	1.846	0.30	
CB 5%	I	3.7298	1.7103	3.7386	0.0088	2.0195	0.43	1.64
	II	3.1669	1.4557	3.2149	0.048	1.7112	2.80	
	III	3.2853	1.5068	3.3154	0.0301	1.7785	1.69	
CB 7.5%	I	3.2476	1.5175	3.2584	0.0108	1.7301	0.62	3.10
	II	3.1158	1.4481	3.2325	0.1167	1.6677	6.99	
	III	3.3882	1.5571	3.4194	0.0312	1.8311	1.70	
CB 10%	I	3.5079	1.5799	3.5576	0.0497	1.928	2.57	2.93
	II	3.2504	1.5077	3.27	0.0196	1.7427	1.12	
	III	3.3232	1.5192	3.415	0.0918	1.804	5.08	

Lampiran 8 Hasil Pengujian Fleksural

		b (mm)	d (mm)	L (mm)	P (N)	σ_f (MPa)	σ_f rata-rata (MPa)
CB 0%	I	13.55	4.35	64	30.40	11.38	11.42
	II	13.10	4.00	64	24.00	10.99	
	III	13.50	4.15	64	28.80	11.89	
CB 2.5%	I	14.10	4.10	64	56.00	22.68	25.16
	II	15.60	4.00	64	62.40	24.00	
	III	14.00	4.00	64	67.20	28.80	
CB 5%	I	14.50	4.50	64	75.20	24.58	25.72
	II	13.10	5.10	64	92.80	26.14	
	III	15.00	4.40	64	80.00	26.44	
CB 7.5%	I	15.00	4.45	64	88.00	24.96	25.51
	II	15.00	4.15	64	88.00	26.61	
	III	15.70	4.50	64	72.00	24.95	
CB 10%	I	14.10	4.40	64	65.60	23.07	23.08
	II	16.60	4.10	64	64.00	22.01	
	III	15.10	4.00	64	60.80	24.15	

Lampiran 9 Tabel Densitas Air (www.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