



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN 0-10 WT. % *CARBON BLACK*
TERHADAP KARAKTERISASI KOMPOSIT *EPOXY*/GRAFIT
EAF SEBAGAI MATERIAL PELAT BIPOLAR PADA PEMFC**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Sarjana Teknik (ST.)

DANIA FEBRIYANI

0606074703

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

UNIVERSITAS INDONESIA

DESEMBER 2009

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Dania Febriyani

NPM : 0606074703

Tanda Tangan :

Tanggal : Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Dania Febriyani

Npm : 0606074703

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul Skripsi : Pengaruh Penambahan 0 - 10 wt. % *Carbon Black* terhadap Karakterisasi Komposit *Epoxy*/Grafit EAF sebagai Material Pelat Bipolar pada PEMFC

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

DEWAN PENGUJI :

Pembimbing : Ir. Yunita Sadeli, MSc. ()

Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M. Phil.Eng. ()

Penguji 2 : Dr. Ir. Bambang Prihandoko, MT. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, karena atas berkat dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini di buat dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan dengan harapan penulisan ini dapat membantu penelitian dan perkembangan lain tentang sumber energi alternatif, khususnya pada bidang *fuell cell* di Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, skripsi ini sangat sulit untuk diselesaikan. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

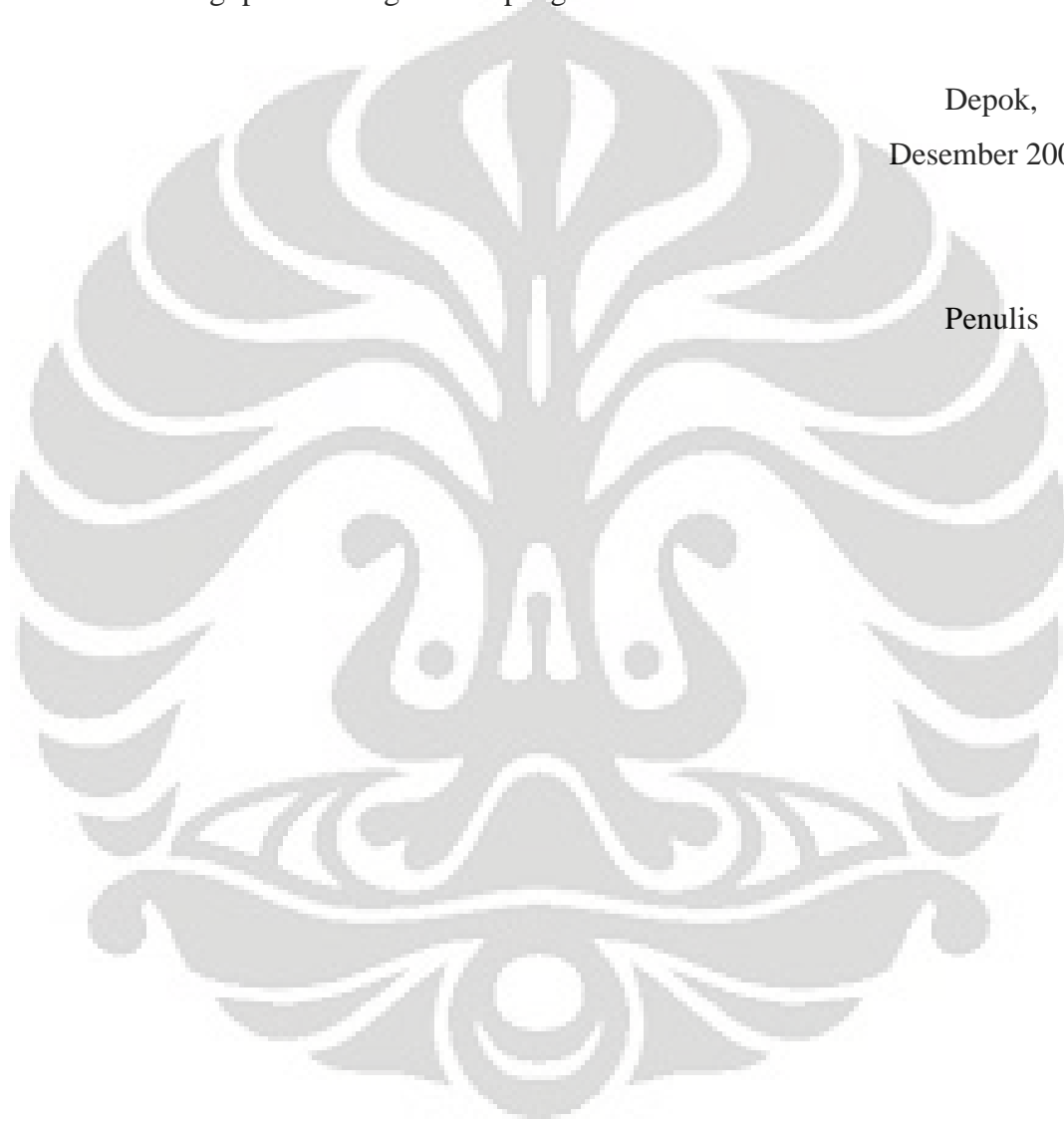
1. Ir. Yunita Sadeli, Msc, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, stamina, dan pikiran untuk mengarahkan dan membimbing penulis dalam penyusunan skripsi ini
2. Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M. Phil.Eng, selaku dosen penguji dan Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T dari Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
3. Kedua orang tua penulis Bapak Syaifullah dan Ibu Susilawati serta kakak dan adik penulis Mona Pratiwi Silvi, Ade Syafitri, dan Syifa Rosyadah yang telah memberikan semangat dan bantuan baik dukungan moral maupun material.
4. *The shadow of my heart*, Zahrul Umam, atas doa dan cinta kasih yang selalu menjadikan kekuatan.
5. Faridatur rizky, Rausyan Vitri, Farah Fauziah, Nike Lestari, dan Kenya Diestha LC atas canda tawa dan semangat yang selalu diberikan.
6. Beringin Saputera, Rio Kurniawan, dan Gabriel Sembiring selaku rekan penulis dalam penelitian ini .
7. Bang Mamat, Pak Eko, Mba Nur dan seluruh karyawan Departemen Teknik Metalurgi dan Material.

8. Mas Tomi, Pak Andi, Pak Subhan, Pak Joko dan seluruh Tim dari Fisika LIPI yang tidak bias disebutkan satu persatu.

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

Depok,
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 : Dania Febriyani
NPM : 0606074703
Program Studi : Teknik Metalurgi & Material
Departemen : Teknik 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 EAF sebagai Material Pelat Bipolar pada PEMFC

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : Desember 2009

Yang menyatakan

(Dania Febriyani)

ABSTRAK

Nama : Dania Febriyani
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Penambahan 0-10 wt. % *Carbon Black* terhadap Karakterisasi Komposit *Epoxy*/Grafit EAF sebagai Material Pelat Bipolar pada PEMFC

Fuel cell merupakan salah satu energi alternatif yang dipilih karena sangat efisien dan ramah lingkungan. Namun *fuel cell* memiliki harga yang cukup tinggi akibat material penyusun yang menyebabkan massanya menjadi berat dan proses manufaktur yang rumit. Pelat bipolar sangat berkontribusi pada sifat PEM *fuel cell*, sehingga dibutuhkan pelat bipolar yang ringan, mudah diproses, dan murah.

Penelitian ini mengembangkan komposit pelat bipolar menggunakan matriks *epoxy*, penguat grafit EAF (grafit limbah hasil dapur listrik peleburan besi baja), dan variasi komposisi *carbon black* sebagai *conducting filler* sebesar 0, 2.5, 5.0, 7.5, dan 10 wt. % untuk mendapatkan sifat konduktivitas dan mekanis yang baik. Sifat-sifat dari komposit yang dihasilkan diuji dengan pengujian konduktivitas, densitas, porositas, dan fleksural.

Hasil pengujian didapatkan nilai karakteristik optimum adalah terdapat pada komposisi 5 wt. % *conducting filler carbon black* karena memiliki nilai konduktivitas listrik tertinggi sebesar 0.26 S.cm^{-1} , densitas sebesar 1.81 gr.cm^{-3} , porositas sebesar 0.77 % dan nilai fleksural yang baik sebesar 16.75 MPa.

Kata kunci:

PEM *fuel cell*, Pelat bipolar, *epoxy resin*, grafit EAF, *carbon black*, densitas, porositas, konduktivitas listrik, fleksural.

ABSTRACT

Name : Dania Febriyani
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : The Effect of 0-10 wt.% Addition of Carbon Black to The Characteristics of EAF Graphite/Epoxy Composite as Bipolar Plate Material of PEMFC

Fuel cell is the one of alternative energies because it had high efficiency and eco-friendly energy. The disadvantage of fuel cells are its heavyness and its low processability, which leads to its high price. Bipolar plate is one of key components of fuel cell. Therefore, we need a lightweight, easy-to-process, and cheap bipolar plates.

In this study, we develop a bipolar plate composite by using epoxy, EAF graphite reinforcement, and carbon black as a conducting filler and varying its composition 0, 2.5, 5, 7.5, and 19 wt.% to develop good conductivity and mechanical properties. Composite properties are evaluated by using density tests, porosity tests, conductivity tests and flexural tests.

From the results, we can conclude that the third composition had the optimal properties with 44 % wt. conducting filler carbon black because it had the best conductivity properties in 0.26 S.cm^{-1} , density 1.81 gr.cm^{-3} , porosity 0.77% and good flexural strength in 16.75 MPa.

Key word :
PEM fuel cell, bipolar plate, EAF graphite, epoxy resin, carbon black, density, porosity, conductivity, flexural strength

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup & Batasan Masalah.....	4
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Sel Bahan Bakar (<i>Fuel Cell</i>)	5
2.1.1 PEMFC.....	8
2.1.1.1 Struktur PEMFC	9
2.1.1.2 Pelat Bipolar	11
2.2 Komposit.....	13
2.2.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Sifat Komposit.....	14
2.2.1.1 Komposisi	14

2.2.1.2 Arah Orientasi	15
2.2.1.3 Ikatan Antara Matriks dan Penguat	16
2.2.1.4 Daya Pembasahan	18
2.2.2 Komposit <i>Epoxy</i> -Grafit untuk Pelat Bipolar	19
2.3 <i>Epoxy Resin</i>	20
2.4 Grafrit EAF	22
2.5 <i>Carbon Black</i>	24
2.6 Metanol	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1 Diagram Alir Penelitian	26
3.2 Alat dan Bahan	28
3.2.1 Peralatan Penelitian	28
3.2.2 Bahan	28
3.2.2.1 <i>Epoxy Resin</i> dan <i>Epoxy Hardener</i>	29
3.2.2.2 Metanol	30
3.2.2.3 <i>Carbon Black</i>	30
3.2.2.4 Grafrit Limbah <i>Electric Arc Furnace</i> (EAF)	30
3.3 Prosedur Penelitian	31
3.3.1 Preparasi dan Fabrikasi Sampel	31
3.3.1.1 <i>Crushing</i> dan <i>Milling</i> Grafrit	31
3.3.1.2 Penimbangan	31
3.3.1.3 Pencampuran	32
3.3.1.4 Pencetakan	33
3.3.1.5 Pembuatan Spesimen Uji	33
3.3.2 Karakterisasi Pelat Bipolar	33
3.3.2.1 Pengujian <i>Sessile Drop</i>	33
3.3.2.2 Pengujian Densitas	34

3.3.2.3 Pengujian Porositas	35
3.3.2.4 Pengujian Konduktivitas Listrik.....	36
3.3.2.5 Pengujian Fleksural.....	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Hasil Pengujian <i>Sessile Drop</i>	39
4.2 Hasil Preparasi Sampel	40
4.2.1 Hasil <i>Crushing</i> dan <i>Milling</i>	40
4.2.2 Hasil Pencampuran.....	41
4.2.3 Hasil Pencetakan.....	42
4.2.4 Hasil Pembuatan Spesimen	43
4.3 Hasil Karakterisasi Pelat Bipolar.....	44
4.3.1 Pengujian Densitas	44
4.3.2 Pengujian Porositas	46
4.3.3 Pengujian Konduktivitas Listrik.....	48
4.3.4 Pengujian Fleksural	50
4.3 Perbandingan Sifat komposit	52
BAB V KESIMPULAN	54
DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Harga Minyak Dunia Tahun 1994-2008	1
Gambar 2.1.	Skema <i>Fuel Cell</i>	6
Gambar 2.2.	Skema Struktur PEMFC.....	9
Gambar 2.3.	Klasifikasi Material Pelat Bipolar pada PEMFC	13
Gambar 2.4.	Mikrostruktur Material Komposit.....	14
Gambar 2.5.	Arah Orientasi Penguat (a) <i>Random</i> , (b) <i>Directional</i> , (c) <i>Orthogonal</i>	16
Gambar 2.6.	Skema Ikatan Antarmuka.....	17
Gambar 2.7.	Skema Ikatan Antarfasa	17
Gambar 2.8.	Kesetimbangan Tiga Tegangan Permukaan <i>Sessile Drop</i>	18
Gambar 2.9.	Daya Pembasahan Berdasarkan Sudut Kontak (A) $>90^{\circ}$ <i>No Wetting</i> , (B) $=90^{\circ}$ <i>Poor Wetting</i> , (C) $<90^{\circ}$ <i>Good Wetting</i>	19
Gambar 2.10.	Struktur Ikatan antara <i>Epoxy Resin</i> dengan Hardenernya	21
Gambar 2.11.	Struktur Grafit	23
Gambar 2.12.	Skema Proses Peleburan Baja	24
Gambar 2.12.	Struktur Kimia Methanol (a) 2 Dimensi (b) 3 Dimensi	25
Gambar 3.1.	Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 3.2.	Proses Penimbangan	31
Gambar 3.3.	Proses Pencampuran	32
Gambar 3.4.	Hasil <i>Mixing</i> yang Telah Dimasukkan ke dalam Cetakan.....	33
Gambar 3.5.	Diagram Pengukuran Dimensi untuk (a) $\theta > 90^{\circ}$ (keadaan <i>non wetting</i>) dan $\theta < 90^{\circ}$ (keadaan <i>wetting</i>)	34
Gambar 3.6.	Skema Pengujian Konduktivitas Listrik	36
Gambar 3.7.	Skema Pengujian Fleksural.....	37

Gambar 3.8.	Peletakan Spesimen Uji Fleksural	38
Gambar 4.1.	Hasil Pengujian <i>Sesal Drop</i> (a) CB 0 wt. %, (b) CB 2,5 wt. %, (c) CB 5 wt. %, (d) CB 7.5 wt. %, dan (e) CB 10 wt. %	39
Gambar 4.2.	Grafit (a) Sebelum di <i>Crushing</i> dan <i>Milling</i> (b) setelah di <i>Crushing</i> dan <i>Milling</i>	41
Gambar 4.3.	Hasil Pencampuran (a) Sebelum Mixing di atas Hot Plate dan (b) Setelah Mixing di atas Hot Plate	41
Gambar 4.4.	Pelat Bipolar Hasil Pencetakan (a) CB 0 wt. %, (b) CB 2.5 wt. %, (c) CB 5 wt. %, (d) CB 7.5 wt. %, (e) CB 10 wt. %	43
Gambar 4.5.	Spesimen Uji (a) Konduktivitas, Densitas, Porositas dan (b) Fleksural.....	44
Gambar 4.6.	Grafik Pengaruh Penambahan CB terhadap Densitas Pelat Bipolar.....	45
Gambar 4.7.	Grafik Pengaruh Penambahan CB terhadap Porositas Pelat Bipolar.....	47
Gambar 4.8.	Grafik Pengaruh Penambahan CB terhadap Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar	49
Gambar 4.9.	Grafik Pengaruh Penambahan CB terhadap Kekuatan Fleksural Pelat Bipolar	51

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Kelebihan dan Kelemahan <i>Fuel Cell</i>	7
Tabel 2.2.	Komponen Utama PMFC.....	10
Tabel 2.3.	Karakteristik untuk Pelat Bipolar Ideal.....	12
Tabel 2.4.	Keunggulan dan Kelemahan <i>Epoxy Resin</i>	22
Tabel 3.1.	Alat Preparasi	28
Tabel 3.2.	Alat Karakterisasi.....	28
Tabel 3.3.	Komposisi Sampel Pelat Bipolar	29
Tabel 4.1.	Data Uji <i>Sessile Drop</i>	40
Tabel 4.2.	Data Uji Densitas	44
Tabel 4.3.	Data Uji Porositas	46
Tabel 4.4.	Data Uji Konduktivitas Listrik.....	48
Tabel 4.5.	Data Uji Fleksural	50
Tabel 4.6.	Perbandingan Sifat Komposit.....	52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Gambar Alat Preparasi Sampel dan Karakterisasi	59
Lampiran 2	Spesifikasi <i>Epoxy Resin</i>	62
Lampiran 3	Spesifikasi <i>Epoxy Hardener</i>	63
Lampiran 4	Spesifikasi Grafit EAF PT. Krakatau Steel.....	64
Lampiran 5	Spesifikasi Metanol MERCK	66
Lampiran 6	Contoh Perhitungan Sudut Kontak.....	67
Lampiran 7	Tabel dari Bashforth dan Adams (1883)	70
Lampiran 8	Hasil Pengujian Porositas.....	73
Lampiran 9	Hasil Pengujian Porositas.....	74
Lampiran 10	Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik.....	75
Lampiran 11	Hasil Pengujian Fleksural.....	76
Lampiran 12	Tabel Densitas Air.....	77

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan peradaban manusia, tingkat kebutuhan energi juga akan semakin meningkat. Energi yang digunakan biasanya berasal dari energi konvensional yang tidak dapat diperbaharui. Karena tingkat kebutuhan energi yang semakin tinggi maka cadangan energi tersebut menjadi menipis, aktifitas perekonomian di berbagai belahan dunia pun menjadi berpengaruh.

Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil setidaknya memiliki tiga ancaman serius yaitu menipisnya cadangan minyak bumi, kenaikan atau ketidakstabilan harga akibat laju permintaan yang lebih besar dari produksi minyak, dan polusi gas rumah kaca (terutama CO₂) akibat pembakaran hasil fosil. Hal ini menimbulkan ancaman serius bagi kehidupan makhluk hidup di bumi, sehingga pengembangan dan implementasi bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan perlu mendapatkan perhatian serius.



Gambar 1.1 Grafik Peningkatan Harga Minyak Dunia Tahun 1994-2008 [1]

Parameter keberhasilan bahan bakar alternatif ini adalah dapat diperbaharui (*renewable energy*), ramah lingkungan, dan biaya yang murah. Alternatif yang menarik datang dari *fuel cell* yang diharapkan dapat menghasilkan energi listrik dengan efisiensi tinggi dan gangguan lingkungan yang minimal. Keuntungan *fuel cell* yaitu efisiensi tinggi dapat mencapai 80 %, tidak bising, dan gas buang yang bersih bagi lingkungan.

Fuel cell menggunakan reaksi kimia, lebih baik daripada mesin pembakar, untuk memproduksi energi listrik istilah *fuel cell* sering dikhususkan untuk *hydrogen-oksigen fuel cell* . Prosesnya merupakan kebalikan dari elektrolisis. Pada elektrolisis, arus listrik digunakan untuk menguraikan air menjadi hidrogen dan oksigen. Dengan membalik proses ini, hidrogen dan oksigen direaksikan dalam *fuel cell* untuk memproduksi air dan arus listrik.

Jenis *fuel cell* yang lebih marak dikembangkan saat ini adalah *fuel cell* dengan berbahan dasar polimer yaitu *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC). PEMFC merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang sangat menjanjikan yang bisa digunakan untuk sumber energi transportasi ataupun rumah tangga. PEMFC ini memiliki efisiensi yang tinggi, kerapatan arus yang tinggi, temperatur aplikasi yang relatif rendah, waktu pakai yang panjang, dan suplai bahan bakar yang baik. Pengembangan *fuel cell* jenis ini menggunakan material dengan bahan membran polimer, katalis elektroda dan grafit pelat bipolar [2].

Pelat bipolar merupakan bagian dari struktur sistem *fuel cell* yang memiliki fungsi ganda, yaitu sebagai pengatur pendistribusian bahan bakar *fuel cell* (gas hidrogen-oksigen) dan sebagai pengumpul arus listrik yang dihasilkan sistem *fuel cell*. Fungsi lain dari pelat bipolar ini adalah sebagai struktur penguat (*integrity*) susunan *fuel cell*. Pelat bipolar adalah salah satu dari komponen *fuel cell* yang menghabiskan 38% dari harga total dan 80% dari berat total *fuel cell* [3]. Sehingga pengembangan PEMFC dengan mereduksi harga dan berat dari pelat bipolar tanpa menurunkan karakteristik dan efisiensinya masih terus dilakukan.

Untuk menunjang inovasi dari kedua parameter tersebut, maka salah satu usaha adalah mensubstitusi komponen pelat bipolar dari berat menjadi ringan dan

dengan harga proses yang relatif murah. Pilihan utama dari usaha tersebut adalah menggantikan material pelat bipolar dari logam dengan komposit bermatriks polimer.

Pada penelitian ini yang akan dikembangkan polimer yang lebih ringan dan murah yaitu komposit polimer dengan menggunakan epoksi sebagai matriks dan grafit sebagai *reinforce* (penguatnya). Grafit yang digunakan berasal dari *Electric Arc Furnace* (EAF) atau elektroda limbah proses peleburan baja guna memanfaatkan limbah sisa hasil produksi. Sehingga dari hasil penelitian ini dihasilkan komposisi campuran komposit polimer yang memiliki konduktivitas yang tinggi, ringan, biaya rendah serta memiliki optimalisasi performa yang sangat baik sehingga secara keseluruhan dapat mereduksi biaya produksi PEMFC.

1.2 Perumusan Masalah

Cadangan sumber energi yang semakin menipis dan kebutuhan energi yang semakin meningkat, menjadikan tantangan bagi para ilmuwan untuk mencari energi baru yang bisa diperbaharui. *Fuel cell* merupakan teknologi penghasil energi terbarukan yang sangat menjanjikan untuk menjamin kelangsungan makhluk hidup dimasa yang akan datang.

Permasalahan yang muncul berasal dari berat dan volume *bipolar plate* yang sangat tinggi mempengaruhi harga *fuel cell* sehingga perlu adanya modifikasi untuk mereduksi faktor tersebut dan masih langkanya penggunaan energi ini.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian secara khusus, antara lain:

- a. Mengetahui karakteristik komposit polimer dengan *reinforcement* grafit yang berasal dari elektroda dapur listrik limbah hasil proses peleburan baja
- b. Mengetahui efek dan sifat tertentu yang dihasilkan dari penambahan *carbon black* terhadap pelat bipolar
- c. Mengembangkan komposit material untuk pelat bipolar PEMFC yang memiliki nilai ekonomis yang tinggi dan karakteristik yang optimum

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Pada penelitian ini, akan diformulasikan karakteristik pelat bipolar yang memenuhi tuntutan aplikasi dengan berat yang lebih ringan tanpa mengurangi performa yang diinginkan yaitu dengan menggunakan *epoxy* sebagai matriks yang diperkuat (*reinforce*) oleh material keramik yaitu grafit.

Selanjutnya dilakukan penambahan *carbon black* sebagai *conducting filler* untuk pencampuran agar terjadi peningkatan konduktivitas yang optimum. Pelat bipolar dibuat dengan metode *compression molding* menggunakan mesin *hot press* dengan tekanan 300 kg/cm^2 pada suhu 70°C selama 4 jam. Optimalisasi pemakaian *carbon black* sebagai variable komposit diharapkan menghasilkan properties yang maksimum. Karakterisasi material yang akan dipelajari adalah konduktivitas, densitas, porositas, dan fleksural untuk mengetahui *electrical properties* dan *mechanical properties* dari material pelat bipolar tersebut. Kesimpulan dari hasil penelitian ini diharapkan menghasilkan komposit bipolar dengan properties yang optimum.

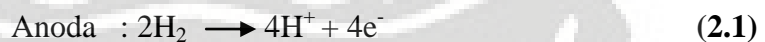
BAB II

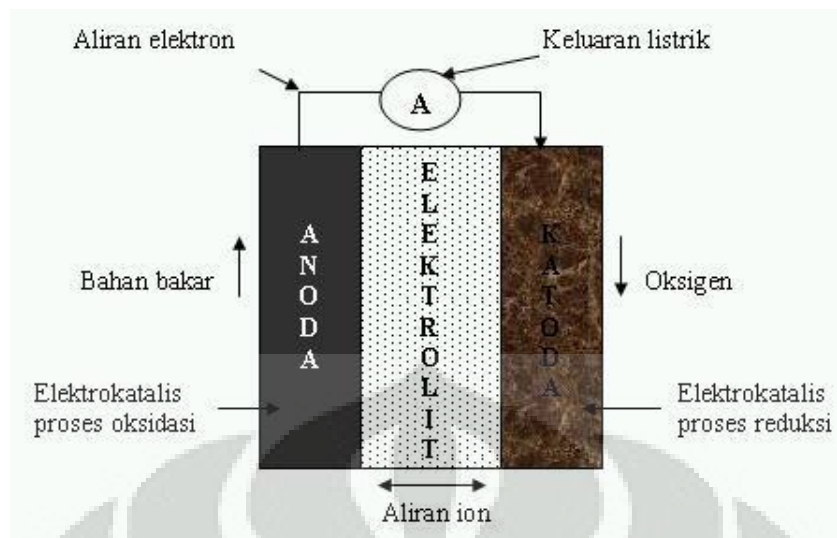
LANDASAN TEORI

2.1 Sel Bahan Bakar (*Fuel Cell*)

Fuel cell adalah alat yang mampu menghasilkan listrik arus searah. Alat ini terdiri dari dua buah elektroda, yaitu anoda dan katoda yang dipisahkan oleh sebuah membran polimer yang berfungsi sebagai elektrolit. Membran ini sangat tipis, ketebalannya hanya beberapa mikrometer saja. Hidrogen dialirkan ke dalam *fuel cell* yaitu ke bagian anoda, sedang oksigen atau udara dialirkan ke bagian katoda, dengan adanya membran, maka gas hidrogen tidak akan bercampur dengan oksigen. Membran dilapisi oleh platina tipis yang berfungsi sebagai katalisator yang mampu mereduksi atom hidrogen menjadi elektron dan proton. Proton mengalir melalui membran, sedangkan elektron tidak dapat menembus membran, sehingga elektron akan menumpuk pada anoda, pada katoda terjadi penumpukan ion bermuatan positif. Apabila anoda dan katoda dihubungkan dengan sebuah penghantar listrik, maka akan terjadi pengaliran elektron dari anoda ke katoda, sehingga terdapat arus listrik. Elektron yang mengalir ke katoda akan bereaksi dengan proton dan oksigen pada sisi katoda dan membentuk air.

Reaksi kimia yang terjadi pada *fuel cell* :





Gambar 2.1. Skema *Fuel Cell* [4]

Fuel cell berbeda dari baterai yang menyimpan energi listrik pada sistem yang tertutup. *Fuel cell* sangat bergantung pada pereaksi dan harus diisi ulang. Selain itu, elektroda dalam baterai bereaksi dan berubah sebagai baterai diisi atau dibuang, sedangkan elektroda pada *fuel cell* adalah katalistik dan relatif stabil.

Pada *fuel cell*, bahan gas oksigen didapat dari udara sedang gas hidrogen mempunyai kesulitan untuk disimpan dan ditransport karena molekul yang kecil sehingga sulit untuk dicairkan dan mudah terbakar. Usaha 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 ditransport. Gas hidrogen dapat juga diperoleh dari metanol setelah diuraikan menjadi gas CO dan hidrogen, kemudian gas CO dioksidasi menjadi CO₂ dan air [2].

Ion yang bermigrasi dapat sebagai hidrogen, oksigen atau hidroksida, sedangkan elektrolit dapat berupa membran polimer, garam karbonat cair, lapisan oksida keramik, larutan alkali dan asam fosfat. Elektroda biasanya terbuat dari logam platina atau nikel [5].

Fuel cell dibagi menjadi beberapa jenis berdasarkan material yang digunakan sebagai elektrolit yang mampu menghantarkan electron yaitu *Alkaline Fuel Cell* (AFC), *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC), *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC), *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC), *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC), dan *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC).

Konversi energi *fuel cell* biasanya lebih efisien dari pada jenis pengubah energi lainnya. Berikut adalah beberapa kelemahan dan keunggulan dari *fuel cell* yang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Kelebihan dan Kelemahan *Fuel Cell* [6]

Kelebihan	Kekurangan
<ol style="list-style-type: none"> 1. Efisiensi dapat mencapai 80% 2. Mampu menyuplai energi listrik dalam waktu yang lama 3. Dapat secara kontinu diisi bahan bakar (hidrogen) dan oksigen dari sumber luar, tidak seperti baterai yang hanya mampu mengandung material bahan bakar yang terbatas 4. ramah lingkungan karena tidak menimbulkan polutan 5. tidak bising 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Jika digunakan bahan bakar hidrogen, maka dibutuhkan tanki pengaman yang berdinding tebal dan memiliki katup pengaman. Selain itu diperlukan kompresor untuk memasukan ke dalam tanki. 2. Jika yang dibawa adalah hidrogen cair, maka akan timbul kesulitan karena harus dipertahankan pada temperatur - 253,15°C pada tekanan 10⁵Pa. 3. Jika digunakan metanol sebagai pengganti hidrogen, maka dibutuhkan reformer. Tetapi efisiensi menjadi menurun. 4. Temperatur yang cukup tinggi saat pengoperasian antara 60°- 120°C

2.1.1 PEMFC

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang memiliki bahan dasar berupa polimer dengan fungsi sebagai alat konversi kimia yang mengubah gas hidrogen dan oksigen menjadi sumber energi listrik, panas, dan air. PEMFC ini menghasilkan energi listrik dengan nilai efisiensi yang sangat tinggi yaitu >50% dan 100% bebas polusi [7].

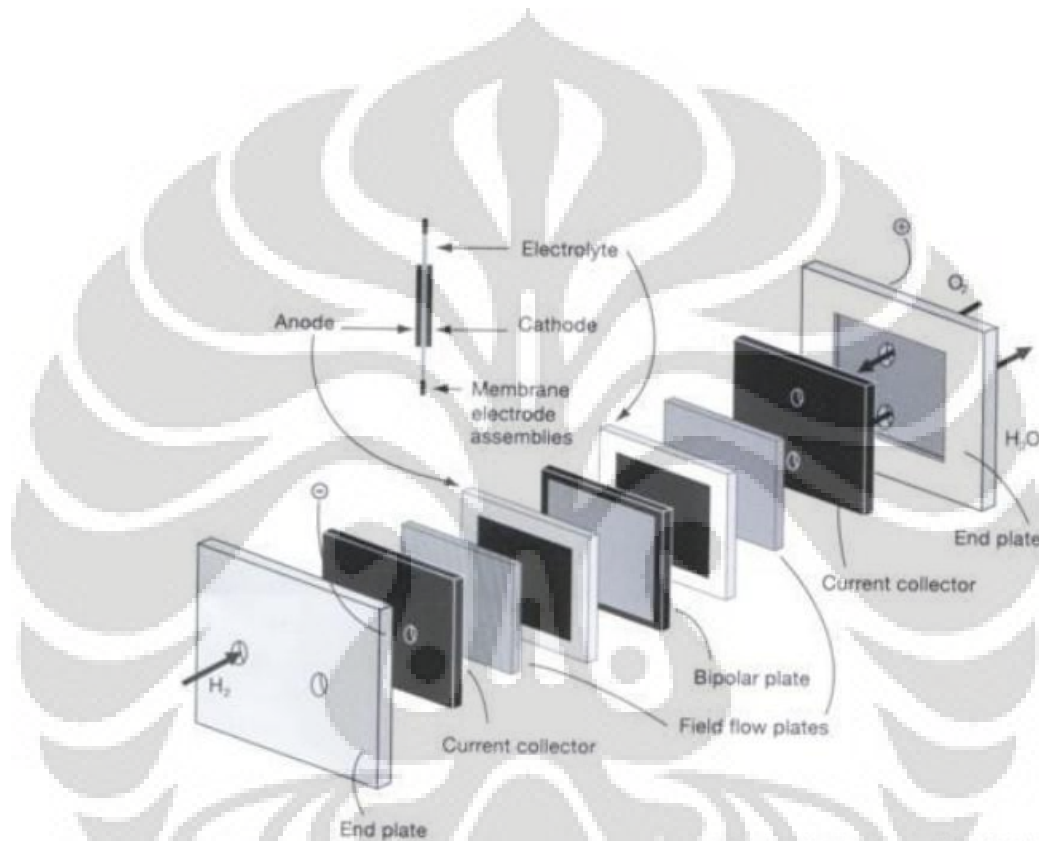
PEM *fuel cell* terdiri dari anoda, *membrane electrolyte assembly* (MEA) dan katoda yang diapit oleh dua pelat bipolar sehingga terbentuk seperti sandwich. Bagian yang sangat penting pada struktur PEMFC adalah pelat bipolar. Pelat ini merupakan penyumbang berat terbesar dari total berat *fuel cell* yaitu sekitar 80% dan 45% dari total harga *fuel cell*. Pelat bipolar di disain dengan berbagai macam fungsi yaitu sebagai berikut [8] :

1. mendistribusi bahan bakar dan oksigen ke dalam sel
2. memfasilitasi pengaturan air ke dalam sel
3. membatasi antar masing unit sel
4. membawa arus listrik dari sel
5. mengatur panas

Tegangan yang dihasilkan pada *single fuel cell* adalah 0.5 sampai 1.0 Volt [7]. Sehingga pada aplikasinya *fuel cell* dikombinasikan hingga terdiri dari beberapa *single fuel cell* menjadi sebuah tumpukan *fuel cell* yang membentuk struktur. Sehingga pelat bipolar menyuplai bahan bakar ke MEA pada setiap sel dan menghubungkan antar satu sel ke sel lainnya dalam satu struktur.

2.1.1.1 Struktur PEMFC

PEMFC memiliki beberapa komponen primer yang memegang peranan penting dalam menjalankan fungsi dari PEMFC itu sendiri, yaitu *membrane electrolyte assembly (MEA)*, pelat bipolar, *endplate*, dan pengumpul arus seperti terlihat pada Gambar 2.2. Karakter dan fungsi keempat komponen utama dari PEMFC ini dapat dilihat pada Tabel 2.2.



Gambar 2.2. Skema Struktur PEMFC [9]

Tabel 2.2. Komponen Utama PEMFC [10]

Komponen	Karakter dan Fungsi
<i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Terdiri dari dua elektroda (membran elektrolit dan <i>gas diffusion layer</i>). • Sebagai separator dua buah reaksi setengah sel sehingga memungkinkan transfer proton dari anoda ke katoda. • <i>Gas diffusion layers</i> mendistribusikan gas secara seimbang ke katalis pada membran sehingga memindahkan elektron dari area aktif ke pelat bipolar dan membantu penanganan air sebagai produk akhir.
Pelat Bipolar	<ul style="list-style-type: none"> • Mendistribusi bahan bakar dan oksigen ke dalam sel • Memfasilitasi pengaturan air ke dalam sel • Membatasi antar masing unit sel • Membawa arus listrik dari sel • Mengatur panas
<i>Endplate</i>	Memungkinkan penyusunan terintegrasi di dalam tumpukan PEMFC.
Pengumpul Arus	Mengumpulkan dan memindahkan arus dari tumpukan PEMFC ke sirkuit eksternal.

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

Adanya dua kutub pada pelat, membuat fungsi pelat bipolar menjadi lebih kompleks, yaitu [11]:

1. mampu untuk membawa elektron menuju sirkuit, termasuk mengumpulkan dan mengalirkan elektron dari anoda dan katoda serta menghubungkan komponen sel membentuk susunan sel bahan bakar yang menghasilkan suatu tegangan
2. menyediakan garis aliran untuk mengalirkan gas secara merata ke seluruh elektroda,
3. memisahkan oksidan dan gas bahan bakar, dan mengangkut gas H₂ menuju anoda dan gas O₂ menuju katoda yang kemudian menghasilkan air,
4. menyediakan kekuatan mekanik dan ketangguhan yang baik agar dapat menyokong membran dan elektroda,
5. menyediakan konduksi termal untuk mengatur temperatur bahan bakar dan melepaskan panas dari elektroda ke bagian pendingin.

Banyaknya fungsi pelat bipolar, menyebabkan material yang dibutuhkan untuk membentuk suatu pelat bipolar harus memenuhi kriteria sebagai berikut^[13] :

1. memiliki permeabilitas yang baik
2. memiliki kekuatan yang baik sehingga dapat menyokong komponen lainnya
3. dapat diproses dengan mudah

4. memiliki berat dan volum yang rendah sehingga dapat digunakan pada transportasi
5. memiliki ketahanan pada temperatur sekitar 80°C

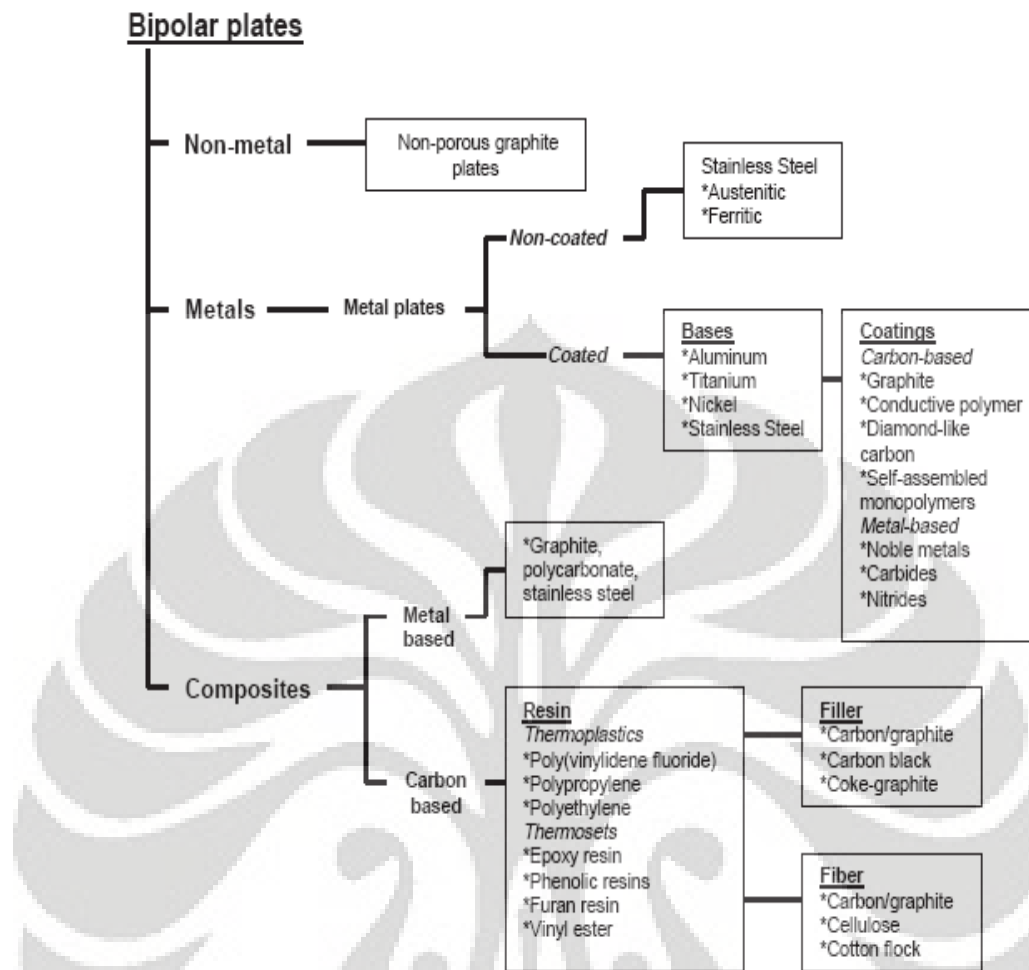
Dikarenakan fungsi pelat bipolar yang dapat mengalirkan arus listrik, maka material pelat harus mempunyai konduktivitas yang tinggi dan dapat mengalirkan gas. Sebaiknya material yang digunakan juga memiliki ketahanan korosi yang baik karena kondisi penggunaan dari pelat bipolar, yaitu pada keadaan asam ($\text{pH} < 5$) sehingga cenderung akan membentuk suatu lapisan oksida dan lapisan ini akan mengganggu katalis serta dapat meningkatkan ketahanan listrik dari pelat. Untuk memenuhi fungsi tersebut pelat bipolar yang ideal memiliki properties seperti yang terlihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Karakteristik untuk Pelat Bipolar Ideal [8]

Karakteristik	Nilai
Konduktivitas Panas	Setinggi mungkin
Resistivitas	$< 0.01 \Omega \text{ cm}^2$
Permeabilitas gas	$< 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{Scm}^2$
Kecepatan Korosi	$< 0.016 \text{ mA/cm}^2$
Kekuatan Tekan	$< 22 \text{ lb/in}^2$
Densitas	$< 5 \text{ gr/cm}^2$

Material-material untuk pelat bipolar pada umumnya diklasifikasi menjadi 3 yaitu :

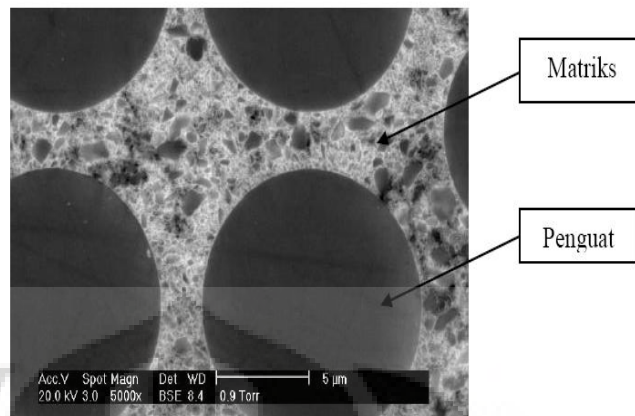
1. Bukan logam : grafit non poros/*electrographite*
2. Logam : *non coated* dan *coated*
3. Komposit : polimer-karbon dan polimer-logam



Gambar 2.3. Klasifikasi Material Pelat Bipolar pada PEMFC [8]

2.2 Komposit

Material komposit adalah gabungan 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. Namun, material penyusun masih dapat dibedakan secara makro. Suatu komposit terdiri dari dua konstituen, yaitu matriks dan penguat (*reinforcement*).



Gambar 2.4. Mikrostruktur Material Komposit[12]

Matriks berfungsi sebagai pengikat dari penguat, mendistribusikan beban antara penguat, memproteksi penguat dari lingkungan, dan melindungi permukaan abrasi mekanis. Pemilihan matriks dalam suatu komposit menjadi penting karena dalam suatu komposit dibutuhkan sifat mekanis yang baik, sifat mampu proses yang baik, dan juga memiliki resistansi yang baik terhadap bahan kimia dan panas. Di sisi lain, penguat digunakan dalam suatu komposit untuk meningkatkan sifat dari material komposit yang dihasilkan dan memiliki kemampuan untuk ditempatkan pada arah pembebanan untuk meningkatkan sifat mekanisnya.

2.2.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Sifat Komposit

2.2.1.1 Komposisi

Pada suatu campuran komposit, perlu dilakukan sebuah hipotesa awal mengenai sifat dari material komposit yang diinginkan sesuai dengan aplikasinya. Dari hipotesa tersebut, dapat diprediksi material bahan baku apa yang dapat digunakan sebagai konstituen penyusun material komposit yang diinginkan.

Komposisi penguat dan matrik komposit mempengaruhi karakteristik komposit tersebut. Semakin banyak komposisi material dalam komposit, maka

semakin besar material tersebut mendominasi sifat komposit. Sifat yang dipengaruhi oleh adanya komposisi tersebut berupa koefisien elongasi, rapat massa, *stress ratio*, *strain ratio*, *tensile strength*, nilai kekerasan, dll. Pengaruh komposisi terhadap sifat komposit ini diturunkan dengan menggunakan *rule of mixture* memprediksi sifat akhir komposit.

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

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

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

V = fraksi volume (composite(c), reinforce(f), matrix(m))

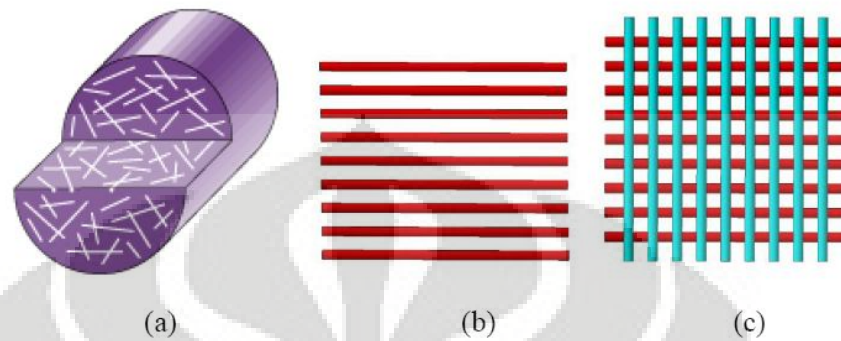
ρ = Densitas (composite(c), *reinforce*(f), matrix(m))

Sebagai contoh komposit dengan matriks polimer yang terdiri dari karbon grafit sebagai penguat, grafit pada dasarnya bersifat konduktif. Dengan penambahan matriks polimer *epoxy* meskipun komposisi tidak terlalu dominan akan tetapi memberikan pengaruh besar terhadap nilai konduktivitas grafit yang cenderung akan menyamai konduktivitas material polimer. Konduktivitas material polimer dapat ditingkatkan dengan menambahkan aditif. Dispersi partikel dari bahan pengisi aditif juga berpengaruh pada sifat konduktivitas. Namun di sisi lain, sering dihasilkan material komposit yang sifat-sifat mekaniknya lebih buruk dari material-material penyusunnya.

2.2.1.2 Arah Orientasi

Arah orientasi penguat juga sangat berpengaruh terhadap sifat material komposit. Pengaturan arah orientasi penguat ini juga dapat diatur untuk merekayasa sifat dari material komposit tersebut, seperti sifat mekanis dan

konduktivitasnya. Arah orientasi penguat yang searah dengan arah pembebanan akan mampu memberikan performa mekanis yang baik terhadap pembebanan tersebut. Jenis arah orientasi penguat dapat dilihat pada Gambar 2.5.

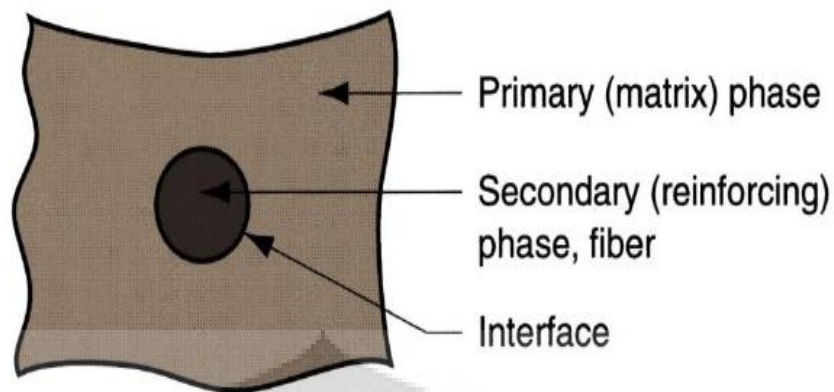


Gambar 2.5. Arah Orientasi Penguat (a) *Random*, (b) *Directional*, (c) *Orthogonal* [12]

2.2.1.3 Ikatan Antara Matriks dan Penguat

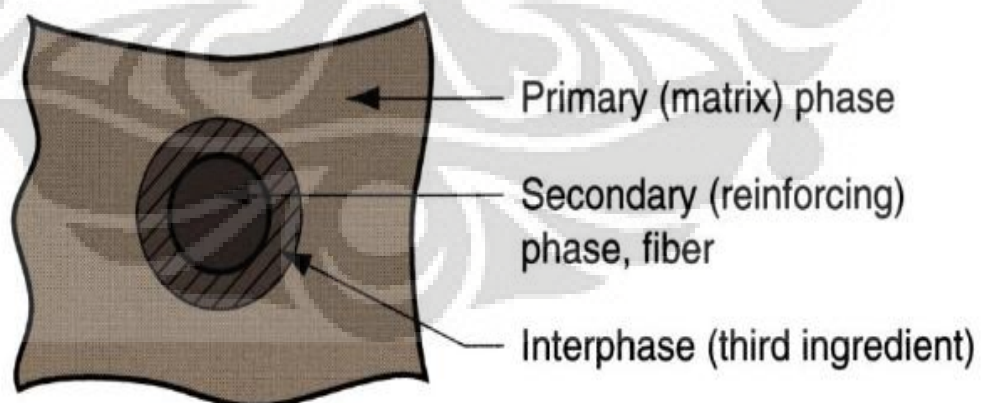
Pencampuran antara matriks dan penguat tidak akan sempurna tanpa adanya ikatan yang terbentuk diantara keduanya. Ikatan ini memiliki peranan yang sangat penting dalam penentuan sifat akhir dari komposit. Ikatan ini terbagi menjadi dua jenis yaitu ikatan antarmuka dan ikatan antarfasa.

Ikatan antarmuka berfungsi sebagai media transfer beban dari matriks dan penguat. Semakin luas bidang sentuh antara permukaan, semakin besar efek yang dihasilkan dari ikatan tersebut sehingga meningkatkan sifat ikatan dari material komposit yang diinginkan. Ikatan antarmuka ini mempengaruhi kekuatan, kekakuan, ketahanan fleksural, dan degradasi akibat lingkungan pada material komposit. Ikatan antarmuka mempunyai sifat fisik dan mekanik yang unik dan tidak merupakan sifat masing-masing matriks maupun penguatnya. Ikatan antarmuka biasanya diusahakan ‘*zero thickness*’ dan mempunyai ikatan yang sangat bagus. Skema ikatan antarmuka dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Skema Ikatan Antarmuka [12]

Sedangkan ikatan antarfasa adalah sebuah ikatan dimana terbentuk sebuah lapisan fasa ketiga dalam suatu ikatan antarmuka. Antarfasa dapat terbentuk apabila ikatan antarmuka dari konstituen penyusun sangat baik dan mampu berdifusi untuk menciptakan fasa ketiga. Selain itu, dapat digunakan juga sebuah aditif untuk menciptakan ikatan antarfasa ini. Fasa ketiga ini memiliki sifat gabungan dari kedua fasa pembentuknya sehingga sangat berpengaruh terhadap sifat komposit yang terbentuk. Skema ikatan antarfasa dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Skema Ikatan Antarfasa [12]

2.2.1.4 Daya Pembasahan

Daya pembasahan akan mempengaruhi ikatan antarmuka. Sempurna atau tidaknya ikatan antarmuka yang terjadi ditentukan oleh sudut kontak yang terbentuk antara matriks dan penguatnya. *Wettability* dari permukaan padat terhadap permukaan cair dapat diketahui berdasarkan persamaan Young :

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

Work of adhesion (W_A) dari tetesan cairan pada substrat dinyatakan oleh persamaan Dupré's:

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

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

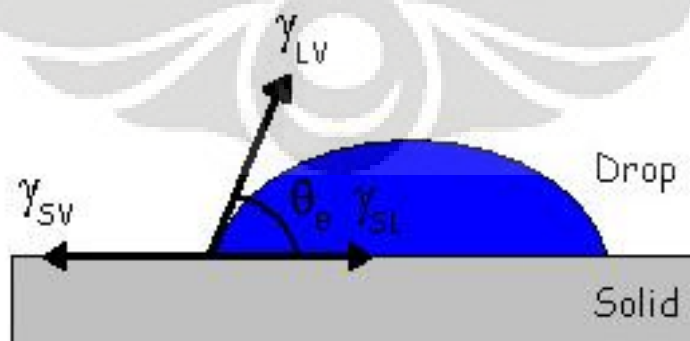
$$W_A = \gamma_{LV} (1 + \cos\theta) \quad (2.7)$$

Keterangan : γ_{SV} = energi bebas per unit area pada permukaan padat dan gas

γ_{LV} = tegangan permukaan antara permukaan cair dan gas

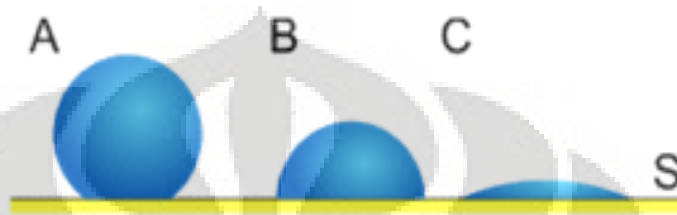
γ_{SL} = energi interfacial

θ = sudut kontak



Gambar 2.8. Keseimbangan Tiga Tegangan Permukaan *Sessile Drop* [13]

Sudut kontak menentukan baik tidaknya kekuatan antarmuka yang terbentuk. Apabila sudut kontak di bawah 90° , maka kemampuan dari ikatan antarmuka tersebut baik, sedangkan pembasahan tidak akan terjadi apabila sudut kontak lebih dari 90° . Skema dari sudut kontak permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Daya pembasahan berdasarkan sudut kontak (A) $>90^{\circ}$ *no wetting*, (B) $=90^{\circ}$ *poor wetting*, (C) $<90^{\circ}$ *good wetting*

2.2.2 Komposit Epoxy-Grafit untuk Pelat Bipolar

Pada penelitian ini, pembuatan pelat bipolar menggunakan material komposit dengan *epoxy* sebagai matriks dan grafit sebagai penguat. Mengingat berat dan harga *fuel cell* merupakan bagian besar dari pengaruh pelat bipolar yang pada umumnya terbuat dari material logam, maka pemilihan material komposit ini sangat tepat untuk dapat mereduksi berat dan harga dari *fuel cell* itu sendiri.

Epoxy merupakan material termoset yang memiliki *thermal stability* dan *chemical resistance* yang baik namun memiliki regangan dan kekuatan impak yang rendah [12]. Oleh karena itu, *epoxy* dapat digunakan sebagai matriks dan ditambahkan penguat karbon untuk meningkatkan sifat mekanis dan konduktivitasnya. Pada fabrikasinya dapat digunakan metode *compression molding* atau *injection molding* yang dapat mengurangi biaya produksi pelat bipolar dengan drastis.

Namun, material komposit ini memiliki kesulitan dalam memenuhi target resistansi, ketebalan dari pelat, serta sifat mekanis. Hal ini disebabkan oleh kebanyakan material polimer memiliki konduktivitas listrik yang rendah. Ini berarti dibutuhkan komposisi penguat karbon yang lebih tinggi untuk memenuhi

target nilai konduktivitas yang diinginkan untuk pelat bipolar. Sebagai kompensasi dari komposisi penguat karbon yang tinggi, maka sifat mekanis dari pelat bipolar tersebut akan lebih rendah. Oleh karena itu, dibutuhkan persentase matriks polimer termoset dengan penguat karbon yang optimum agar dapat memenuhi target nilai konduktivitas listrik yang diinginkan, tetapi juga mampu memberikan performa mekanis yang baik dalam aplikasinya. Komposit polimer-karbon dapat diperoleh dengan mencampurkan matriks polimer yang berfungsi sebagai pengikat dengan penguat karbon. Sirkulasi arus yang baik dapat diperoleh dengan perembesan penguat karbon ke dalam resin polimer menciptakan jalur-jalur konduktif di sepanjang material. Adapun sifat – sifat yang dihasilkan dari pelat bipolar komposit, antara lain :

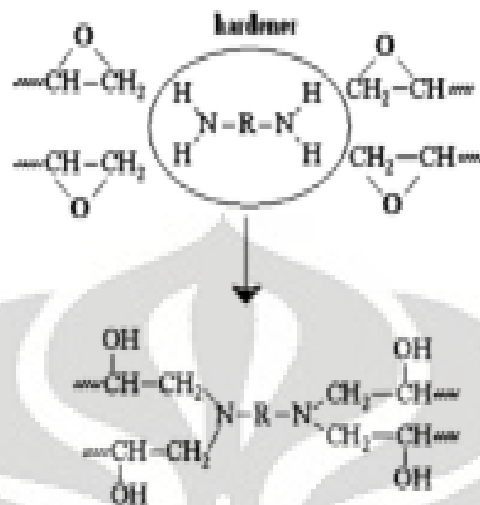
- a) Memiliki kekuatan yang cukup baik dibanding dengan material kandidat lain selain logam
- b) Memiliki berat yang lebih ringan
- c) Nilai konduktivitas yang tinggi
- d) Resistansi kontak permukaan yang sangat kecil
- e) *Gas impermeability*
- f) Harga material dan proses relatif kecil
- g) Memungkinkan untuk dibuat *prototype* berbagai dimensi
- h) Tahan korosi

2.3 *Epoxy Resin*

Epoxy merupakan polimer jenis *thermosetting* yang digunakan sebagai matriks atau bahan pengikat yang dapat terjadi akibat proses penyettingan pada pemanasan beberapa temperatur dan tidak dapat dibentuk kembali pada pemanasan ulang. Secara umum, polimer jenis termoset terdiri dari dua penyusun yaitu susunan resin dan *curing agent* yang akan membuat proses polimerisasi terjadi pada temperatur ruang.

Karena sifat adhesi yang baik terhadap aramid dan karbon maka *epoxy* sering digunakan sebagai matriks untuk fiber komposit. Karakterisasi lain adalah memiliki stabilitas dimensi yang tinggi, mudah dalam pemrosesan, dan biaya material rendah.

Lebih dari dua dekade yang lalu *epoxy* telah dipercaya sebagai material luar angkasa[14].



Gambar 2.10. Struktur Ikatan antara *Epoxy Resin* dengan *Hardener* [3]

Epoxy resin memiliki beberapa keunggulan dan kelemahan seperti yang terlihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Keunggulan dan Kelemahan *Epoxy Resin* [15]

Keunggulan	Kelemahan
<ol style="list-style-type: none"> 1. Mampu mengikat dengan gaya adhesi antara karbon dengan resin secara baik 2. Mampu mengikat dengan gaya adhesi antara karbon dengan resin secara baik 3. Kemungkinan terjadinya penyusutan selama polimerisasi sangat kecil 4. Ketahanan terhadap reaksi kimia sangat baik. 5. Kekuatan tinggi dan fleksibilitas yang rendah 6. Ketahanan terhadap creep dan fatigue bagus 7. Sifat elektriknya baik 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Berbahaya karena mengandung racun kimia 2. Daya penyerapan terhadap air sangat tinggi 3. Sulit untuk menggabungkan antara kekuatan dan ketahanan terhadap suhu tinggi 4. Polimerisasinya lambat

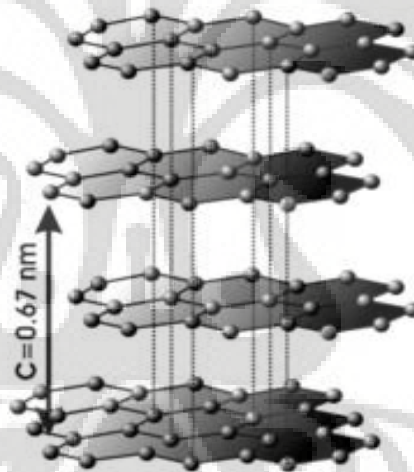
2.4 Grafit EAF

Grafit adalah mineral yang dapat berasal dari batuan beku, sedimen, dan metamorf. Secara kimia, grafit sama dengan intan karena keduanya berkomposisi karbon, yang membedakannya adalah sifat fisik. Intan dikenal sangat keras, langka, dan transparan, sedangkan grafit agak lunak, mudah ditemukan, dan opak.

Grafit berstruktur lapisan yang terdiri atas cincin atom karbon beranggotakan 6 yang mirip cincin benzen yang terkondensasi tanpa atom hidrogen. Jarak karbon-karbon dalam lapisan adalah 142 pm dan ikatannya memiliki karakter ikatan rangkap analog dengan senyawa aromatik. Karena jarak antar lapisan adalah 335 pm dan lapis-lapis tersebut diikat oleh ikatan yang relatif lemah yakni gaya van der Waals, lapisan-lapisan ini dengan mudah akan saling

menggelincir bila dikenai gaya. Hal inilah yang merupakan asal mula sifat pelumasan grafit. Berbagai molekul, seperti logam alkali, halogen, halida logam, dan senyawa organik dapat menginterkalasi lapisan grafit dan membentuk senyawa interkalasi. Grafit memiliki sifat semi-logam, konduktivitasnya 3-10 Ωcm (paralel dengan lapisan dan hantarnya sekitar 100 kali lebih kecil dalam arah tegak lurus lapisan) [16].

Grafit memiliki sifat yang unik, dimana sifatnya merupakan gabungan sifat material logam dan nonlogam. Grafit bersifat fleksibel, tetapi tidak elastis, grafit juga memiliki konduktivitas termal dan listrik yang baik, serta dapat bersifat refraktori dan tidak mudah bereaksi secara kimia. Grafit memiliki kemampuan adsorpsi yang rendah terhadap x-ray dan neutron, sehingga dapat digunakan dalam aplikasi nuklir.

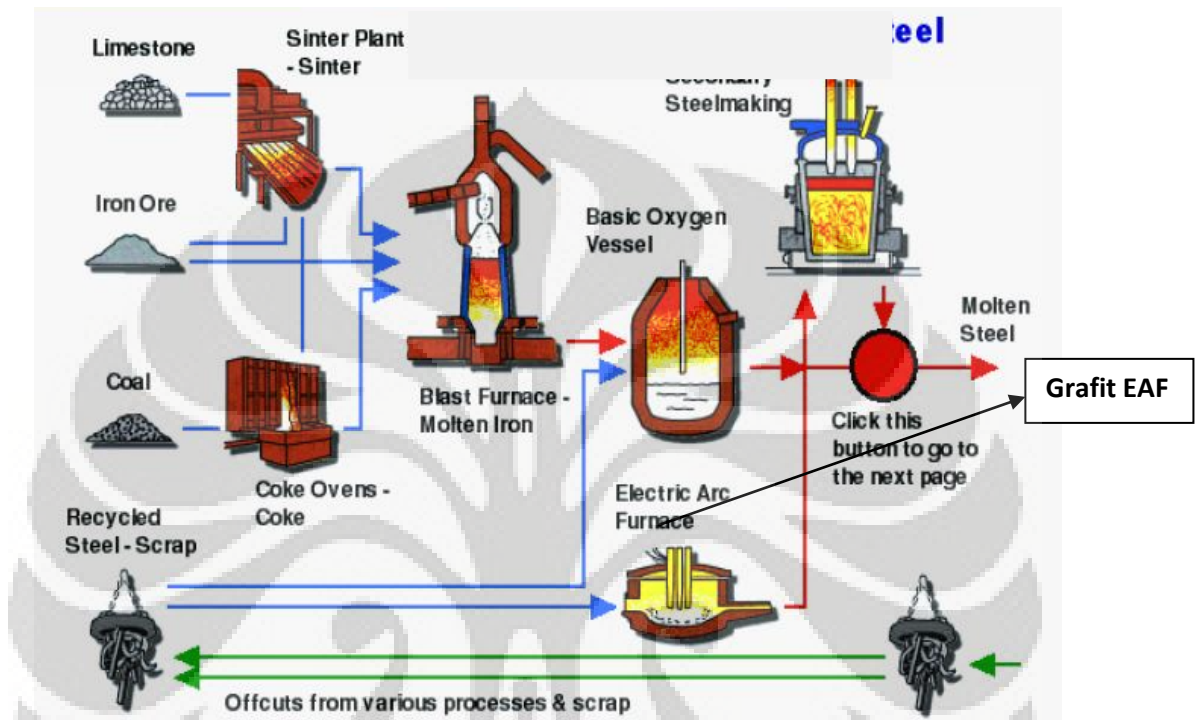


Gambar 2.11. Struktur Grafit [17]

Pada penelitian ini menggunakan grafit limbah hasil proses peleburan baja (grafit EAF) berupa elektroda. Elektroda yang digunakan adalah grafit dan karbon. Pertimbangan penggunaan karbon atau grafit adalah karena tidak lumer, menghantarkan listrik, sifat tidak larut, kemurnian kimia, kekuatan mekanis dan tahan terhadap kejutan thermal. Secara kimia, karbon dan grafit adalah sama, tetapi secara fisis dan elektris banyak perbedaannya. Karbon adalah berongga sedangkan grafit tidak. Grafit diperoleh dengan cara memanaskan karbon pada temperatur tinggi.

Universitas Indonesia

Resistivitas grafit adalah 0,25 resistivitas karbon sehingga kemampuan hantar arus grafit lebih besar dari karbon biasa. Pada aplikasinya dengan penggunaan grafit EAF ini, dapat mengurangi biaya produksi dari pelat bipolar dan sebagai upaya pemanfaatan limbah.



Gambar 2.12. Skema Proses Peleburan Baja [18]

2.5 Carbon Black

Carbon black adalah bahan yang dihasilkan oleh pembakaran tidak sempurna dari produk berat minyak bumi. *Carbon black* memiliki struktur molekul amorphous dan memiliki rasio luas permukaan dan volume yang tinggi, meskipun rasionya masih lebih rendah dibandingkan dengan karbon aktif. *Carbon black* biasanya digunakan sebagai pigmen dan penguat pada karet atau produk plastik.

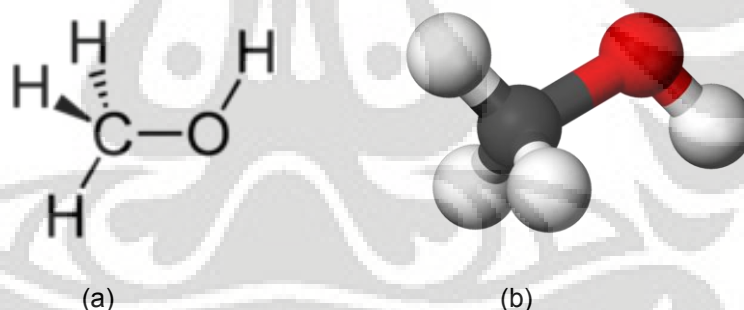
Pada aplikasinya sebagai pelat bipolar, *carbon black* dengan luas permukaan yang tinggi dapat mengumpulkan arus listrik pada konsentrasi yang lebih rendah dan mampu membentuk jaringan karbon konduktif. Namun karena

strukturnya yang berbentuk rongga dapat menurunkan sifat mekanis dari pelat bipolar. Sehingga dengan penambahan carbon black pada termoset seperti *epoxy* diharapkan dapat menciptakan sebuah material komposit pelat bipolar yang memiliki kekuatan dan konduktivitas listrik yang baik.

2.6 Metanol

Metanol yang juga dikenal sebagai metil alkohol memiliki rumus kimia CH_3OH (sering disingkat dengan MeOH). Metanol bersifat racun, jika diminum sebanyak 10 ml maka akan menyebabkan kebutaan dan 100 ml akan menyebabkan kematian. Metanol merupakan alkohol yang paling sederhana, sangat ringan, mudah menguap, tidak berwarna, dan mudah terbakar.

Metanol diproduksi secara alami pada metabolisme anaerobik dari berbagai jenis bakteri yang berada di lingkungan. Akibatnya, ada sebagian kecil dari uap metanol di atmosfer. Namun selama beberapa hari, uap methanol tersebut akan teroksidasi dengan bantuan sinar matahari menjadi karbondioksida dan air.



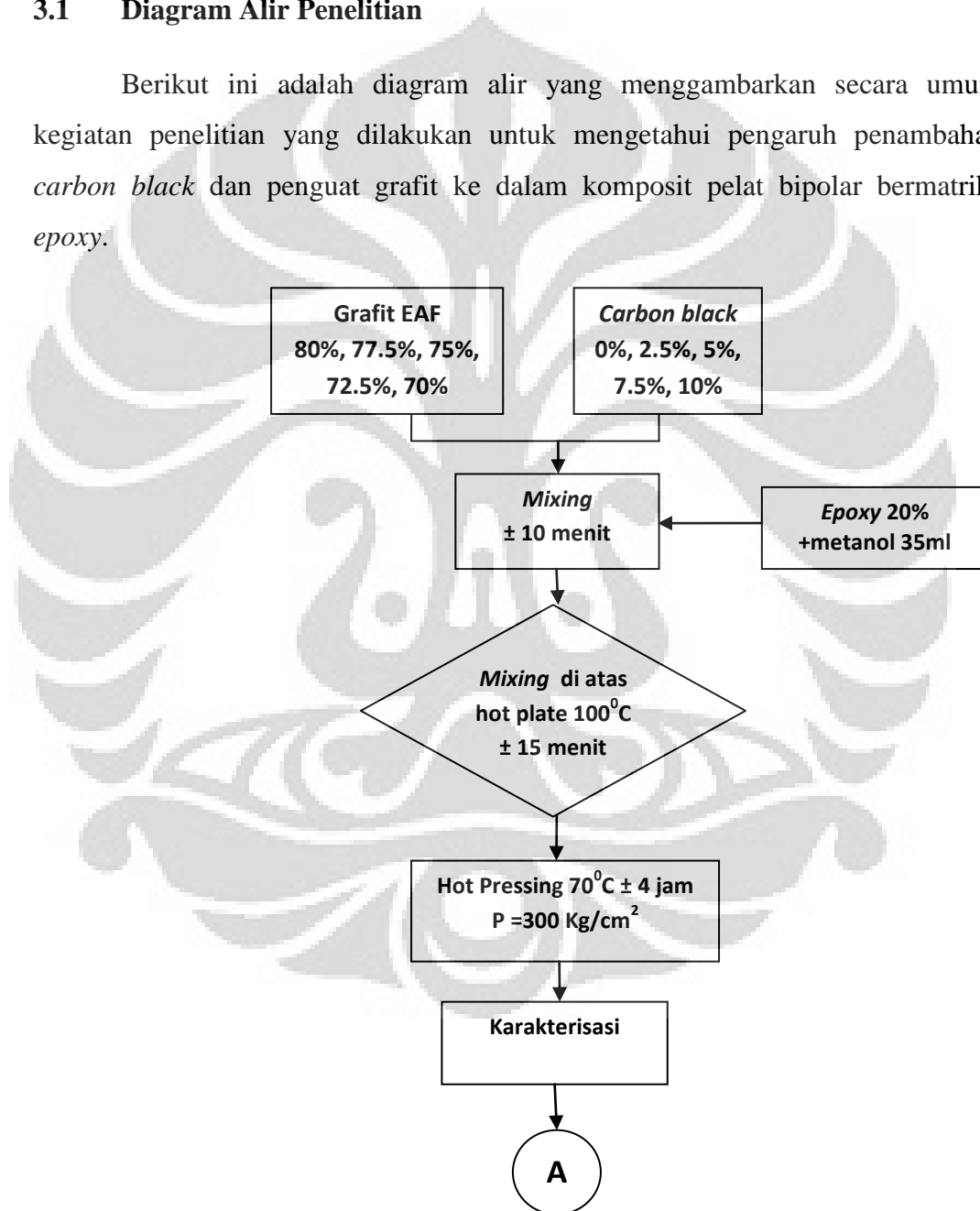
Gambar 2.13. Struktur Kimia Metanol (a) 2 Dimensi (b) 3 Dimensi [19]

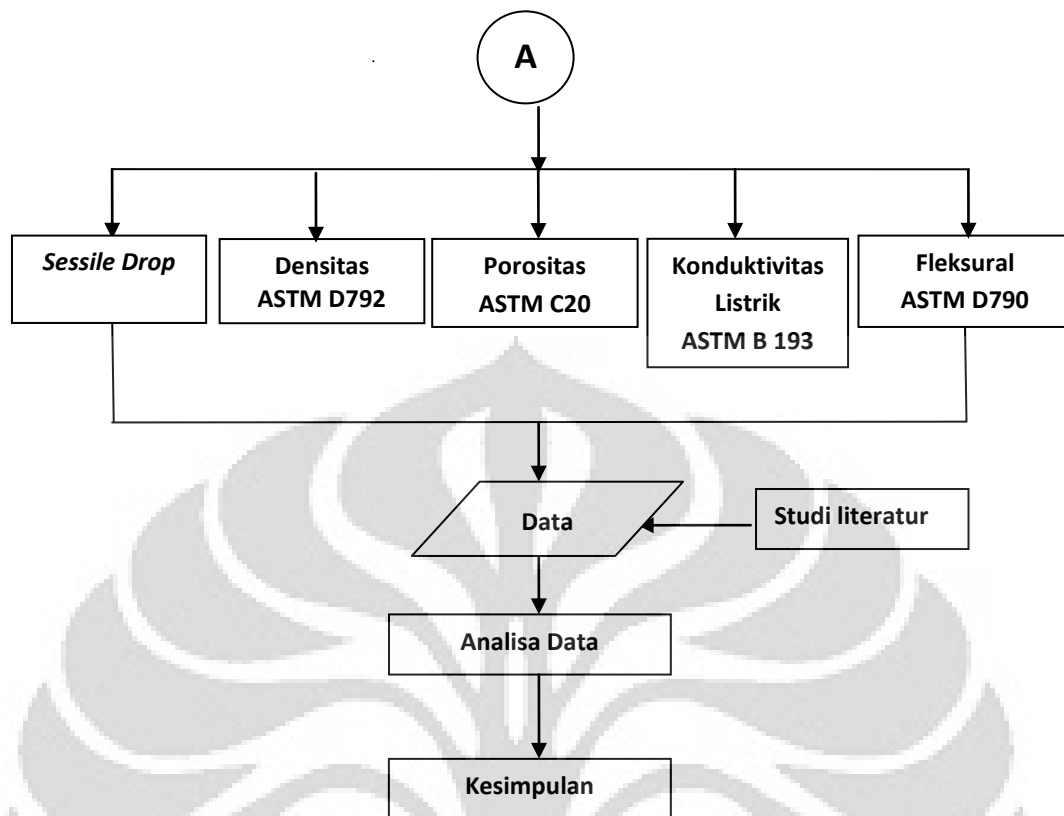
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini adalah diagram alir yang menggambarkan secara umum kegiatan penelitian yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan *carbon black* dan penguat grafit ke dalam komposit pelat bipolar bermatriks *epoxy*.





Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Peralatan Penelitian

Berikut ini adalah peralatan yang digunakan pada preparasi dan karakterisasi pelat bipolar.

Tabel 3.1. Alat preparasi

• Spatula	• <i>Planetary ball mill</i>
• Oven	• <i>Mixer</i>
• <i>Hot plate</i>	• <i>Hot press pressure machine</i>
• Beaker glass 1L	• Timbangan Digital
• <i>Die stainless steel 150 x 150 x ±4.7mm</i>	• Mesin pengguncang

Tabel 3.2. Alat Karakterisasi

• Alat Uji Konduktivitas (<i>four point probe detector</i>)	• Alat Uji Flexural (Bending 3 titik – ASTM D 790)
• Alat Uji Porositas (ASTM C 20)	• Alat Uji Densitas (ASTM D 792)

3.2.2 Bahan

Pada penelitian ini, digunakan *epoxy* sebagai matriks, grafit EAF sebagai penguat, dan *carbon black* sebagai *conducting filler*. Adapun jumlah dari massa bahan baku yang digunakan sesuai dengan persentase tiap bahan pada masing-masing komposisi dan jumlah spesimen yang dibutuhkan untuk pengujian. Komposisi sampel dapat dilihat pada Tabel 3.3, untuk setiap komposisi dibutuhkan 180 gram sampel.

Tabel 3.3. Komposisi Sampel Pelat Bipolar

Bahan	Satuan	Kode formulasi sampel				
		1	2	3	4	5
<i>Resin Epoxy</i>	wt. %	10	10	10	10	10
	gr	18	18	18	18	18
<i>Resin Hardener</i>	wt. %	10	10	10	10	10
	gr	18	18	18	18	18
Grafit Limbah EAF	wt. %	80	77.5	75	72.5	70
	gr	144	140.4	136.8	133.2	129.6
<i>Carbon black</i>	wt. %	0	2.5	5	7.5	10
	gr	0	3.6	7.2	10.8	14.4

3.2.2.1 Epoxy Resin dan Epoxy Hardener

Dalam penelitian ini, polimer termoset berupa *epoxy* digunakan sebagai matriks pada sistem pelat bipolar dengan merek dagang Eposchon (Bhispenol A-epichlorohydrin). Pemilihan *epoxy* sebagai matriks mengacu kepada penelitian terdahulu.

Polimer *epoxy* memerlukan sebuah *coupling agent* sebagai stimulant terjadinya proses polimerisasi dengan baik pada suhu ruang. Oleh karena itu digunakan *epoxy hardener* dengan merek dagang Eposchon (Polyaminoamide). Dari total jumlah 20% jumlah polimer yang dibutuhkan terdiri dari *epoxy resin* dan *epoxy hardener* dengan perbandingan 1:1. dan spesifikasi *epoxy resin* dapat dilihat pada Lampiran 2 dan spesifikasi *epoxy hardener* dapat dilihat pada Lampiran 3.

3.2.2.2 Metanol

Dalam penelitian ini menggunakan pengencer polimer *epoxy* untuk mempermudah pencampuran antara matriks dengan penguat berupa metanol 0.1 M dengan merek dagang MERCK. Metanol digunakan karena sifatnya 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 *hot press*.

3.2.2.3 Carbon black

Pada penelitian ini, *carbon black* (CB) digunakan sebagai material semi konduktif. *Carbon black* dengan permukaan yang luas akan mampu menghantarkan arus listrik dan membentuk jaringan karbon yang konduktif. Namun, struktur *carbon black* yang berporos akan mengurangi sifat mekanis dari komposit. *Carbon black* yang dipakai pada penelitian ini dihasilkan dari karbon arang yang berfungsi sebagai *conducting filler* dengan ukuran partikel sebesar 140 mesh atau $< 105 \mu\text{m}$. Penambahan *carbon black* pada penelitian ini sebesar 0, 2.5, 5, 7.5, dan 10 wt. %.

3.2.2.4 Grafit Limbah *Electric Arc Furnace* (EAF)

Grafit limbah *Elektroda Arc Furnace* yang digunakan pada penelitian ini berasal dari PT. Krakatau Steel, Cilegon yang memiliki ukuran partikel 325 mesh atau $< 44 \mu\text{m}$. Persentase jumlah grafit EAF 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 EAF yang dibutuhkan dapat dilihat pada Tabel 3.3 dan spesifikasinya pada Lampiran 4.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Preparasi dan Fabrikasi Sampel

3.3.1.1 *Crushing* dan *Milling* Grafit

Grafit limbah elektroda dapur listrik peleburan besi baja yang berbentuk bongkahan dihancurkan, kemudian untuk mendapatkan ukuran yang lebih homogen maka dilakukan *milling* dengan menggunakan *planetary ball mill* yang menghasilkan ukuran partikel lebih kecil hingga mencapai ukuran 325 mesh ($<44 \mu\text{m}$). Setelah itu dilakukan pengayakan dengan mesin rot tap untuk mendapatkan ukuran yang homogen yaitu $< 44 \mu\text{m}$. Variabel *ball mill* yang digunakan adalah:

- Waktu *milling* : 2 x 25 jam
- Perbandingan antara jumlah total berat serbuk (*carbon black*) : berat bola alumina = (1 : 10)

3.3.1.2 Penimbangan

Pelat Bipolar dibuat dengan cara mencampurkan *epoxy*, *carbon black*, dan grafit EAF dengan menggunakan mixer kemudian di press dengan menggunakan hot press. Komposisi dari masing-masing pelat bipolar disesuaikan dengan komposisi yang telah disusun terlebih dahulu (Tabel 3.7.), agar didapatkan hasil yang sesuai dengan formula maka dilakukan proses penimbangan. Hasil penimbangan dimasukkan di dalam *beaker glass* untuk proses selanjutnya.



Gambar 3.2. Proses Penimbangan

3.3.1.3 Pencampuran

Proses pencampuran ini dilakukan untuk mencampurkan semua bahan yang digunakan sesuai formula agar didapatkan campuran yang homogen. Langkah-langkah yang dilakukan pada proses ini adalah sebagai berikut :

1. Masukkan grafit EAF dan *carbon black* ke dalam beaker glass 1 L, kemudian aduk dengan menggunakan sendok hingga rata
2. *Epoxy resin* dan *epoxy hardener* diencerkan dengan metanol masing-masing sebanyak 35 ml di dalam beaker glass yang berbeda
3. Masukkan *epoxy resin* yang telah tercampur rata dengan metanol ke dalam beaker glass 1 L yang telah berisi grafit EAF dan *carbon black*, kemudian *mixing* selama ± 5 menit
4. Masukkan *epoxy hardener* ke dalam bakalan, kemudian *mixing* selama ± 5 menit
5. *Mixing* diatas hot plate ($T=100^{\circ}\text{C}$) selama ± 15 menit



Gambar 3.3. Proses Pencampuran

3.3.1.4 Pencetakan

Pencetakan dilakukan dengan menggunakan cetakan yang terbuat dari stainless steel dengan ukuran cetakan 150 x 150 x ± 4.7 mm. Proses ini dilakukan dengan memasukkan hasil *mixing* ke dalam cetakan kemudian dimasukkan ke dalam mesin *Hot Press* dengan pengaturan suhu sebesar 70°C , $P = 300\text{kg/cm}^2$, dan waktu selama 4 jam.



Gambar 3.4. Hasil *Mixing* yang Telah Dimasukkan ke dalam Cetakan

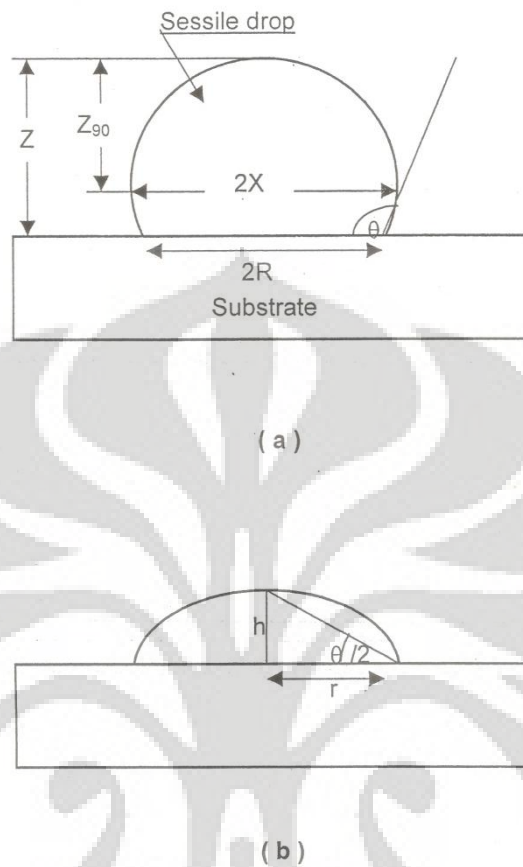
3.3.1.5 Pembuatan Spesimen Uji

Pembuatan spesimen uji disesuaikan dengan standar ASTM yang digunakan pada pengujian karakterisasi

3.3.2 Karakterisasi Pelat Bipolar

3.3.2.1 Pengujian *Sessile Drop*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan ikatan antara matriks dengan penguat pada komposit pelat bipolar. Pengujian ini dilakukan dengan meneteskan cairan *epoxy resin* yang telah dicampurkan dengan *epoxy hardener* dengan perbandingan 1 : 1 ke permukaan pelat bipolar pada setiap komposisinya kemudian di foto. Hasil tetasan menghasilkan sudut kontak yang selanjutnya dapat dihitung besar sudutnya dengan mengambil titik seperti pada Gambar 3.5 dan contoh perhitungan seperti pada Lampiran 6.



Gambar 3.5. Diagram Pengukuran Dimensi untuk (a) $\theta > 90^\circ$ (keadaan *non wetting*) dan (b) $\theta < 90^\circ$ (keadaan *wetting*)

3.3.2.2 Pengujian Densitas

Pengujian ini mengacu pada ASTM D 792 [20] dengan prinsip pengujian yaitu membandingkan massa spesimen di udara dengan massa spesimen di dalam air, karena massa spesimen di dalam air akan berbeda jauh dengan massa spesimen di udara akibat adanya gaya archimedes.

Langkah-langkah pengujian densitas berdasarkan ASTM D 792 adalah sebagai berikut :

1. Timbang spesimen di udara

2. Timbang spesimen di dalam air (diusahakan tepat berada di tengah dari volum air dan tidak menyentuh bejana).
3. Catat suhu air dengan menggunakan termometer

Nilai densitas didapat dengan menggunakan rumus berikut :

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

Keterangan : ρ_{sampel} = Densitas spesimen (gr/cm^3)

A = Massa spesimen di udara (gr)

B = Massa spesimen di dalam air (gr)

ρ_{air} = Massa jenis air (gr/cm^3)

(catatan : massa jenis air untuk setiap temperatur tidak sama)

3.3.2.3 Pengujian Porositas

Pengujian ini mengacu pada prosedur ASTM C20 [21] dengan langkah pengujian sebagai berikut :

1. Keringkan spesimen di dalam oven dengan temperatur 100°C selama 1 jam untuk menghilangkan uap air yang ada di dalam spesimen
2. Timbang spesimen di udara
3. Rebus spesimen menggantung di dalam air dengan temperatur 100°C selama 2 jam
4. Setelah selesai, diamkan di dalam wadah yang sama selama 12 jam
5. Timbang spesimen di dalam air
6. Keringkan dengan menggunakan kain, kemudian timbang di udara.

Nilai porositas spesimen akan di dapatkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

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

Keterangan : D = Massa spesimen di udara setelah di oven (gr)

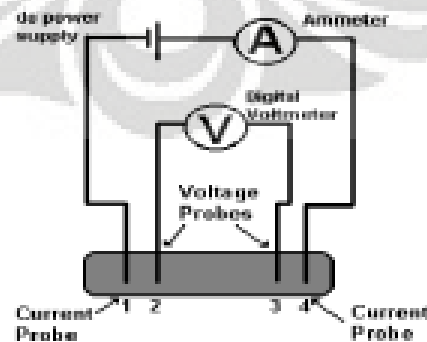
S = Massa di dalam air setelah direbus dan didiamkan selama 12 jam (gr)

S_w = Massa spesimen di udara (setelah dikeringkan) (gr)

3.3.2.4 Pengujian Konduktivitas Listrik

Sifat konduktivitas listrik yang tinggi merupakan syarat utama dari material komposit pelat bipolar. Oleh karena itu, dilakukan pengujian konduktivitas terhadap sampel untuk melihat besar arus listrik yang dapat dihantarkan oleh material komposit tersebut.

Pengujian ini menggunakan alat *four point probe detector* mengacu pada standar ASTM B 193 [22]. Prinsip pengujian ini yaitu dengan memasukkan nilai ketebalan dari spesimen yang akan diuji kemudian didapatkan nilai resistivitas dari spesimen tersebut. Skema dari alat ini dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.6. Skema Pengujian Konduktivitas Listrik
Universitas Indonesia

Data yang didapatkan berupa besar nilai resistivitas yang kemudian akan didapatkan nilai konduktivitas material dengan menggunakan rumus di bawah ini :

$$\sigma = 1 / \rho \quad (3.3)$$

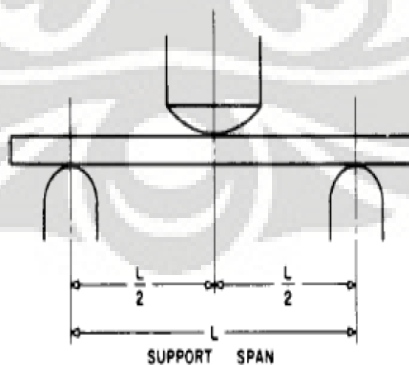
Keterangan : σ = Nilai konduktivitas material (Scm^{-1})

ρ = Nilai resistivitas material (Ωcm)

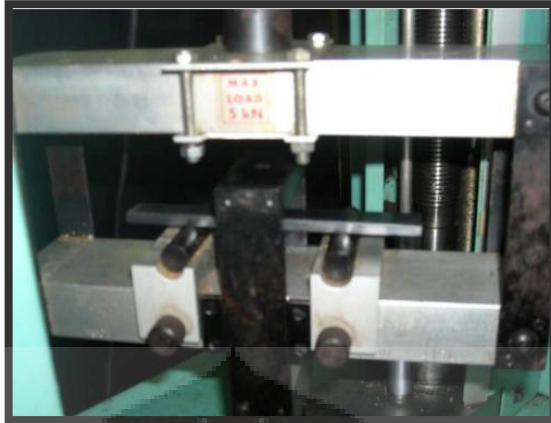
3.3.2.5 Pengujian Fleksural

Pengujian fleksural dilakukan untuk mengetahui ketahanan material komposit terhadap beban tekan, karena pada aplikasinya sebagai pelat bipolar, material ini akan terkena beban tekan dari gas ke segala arah.

Pengujian ini menggunakan mesin *universal testing machine* dan mengacu pada prosedur ASTM D790 [23] yang dilakukan dengan metode *three-point bending* yang memiliki tiga titik utama, yaitu dua titik tumpuan pada pinggir spesimen uji dan satu titik pembebanan pada bagian tengah spesimen seperti terlihat pada skema pengujian fleksural (Gambar 3.6.) . Selanjutnya, beban lentur dengan kecepatan konstan diberikan kepada spesimen hingga spesimen mengalami perpatahan.



Gambar 3.7. Skema Pengujian Fleksural



Gambar 3.8. Peletakan Spesimen Uji Fleksural

Data yang didapatkan dari pengujian ini yaitu berupa beban maksimum yang dapat diterima material hingga material tersebut mengalami awal perpatahan (*crack*). Beban ini kemudian dihitung dengan menggunakan rumus berikut untuk mendapatkan nilai tegangan atau kekuatan lentur dari material.

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

Keterangan : σ_f = tegangan / kekuatan fleksural (MPa)

P = beban maksimum (N)

L = panjang *support span* (mm)

b = lebar spesimen (mm)

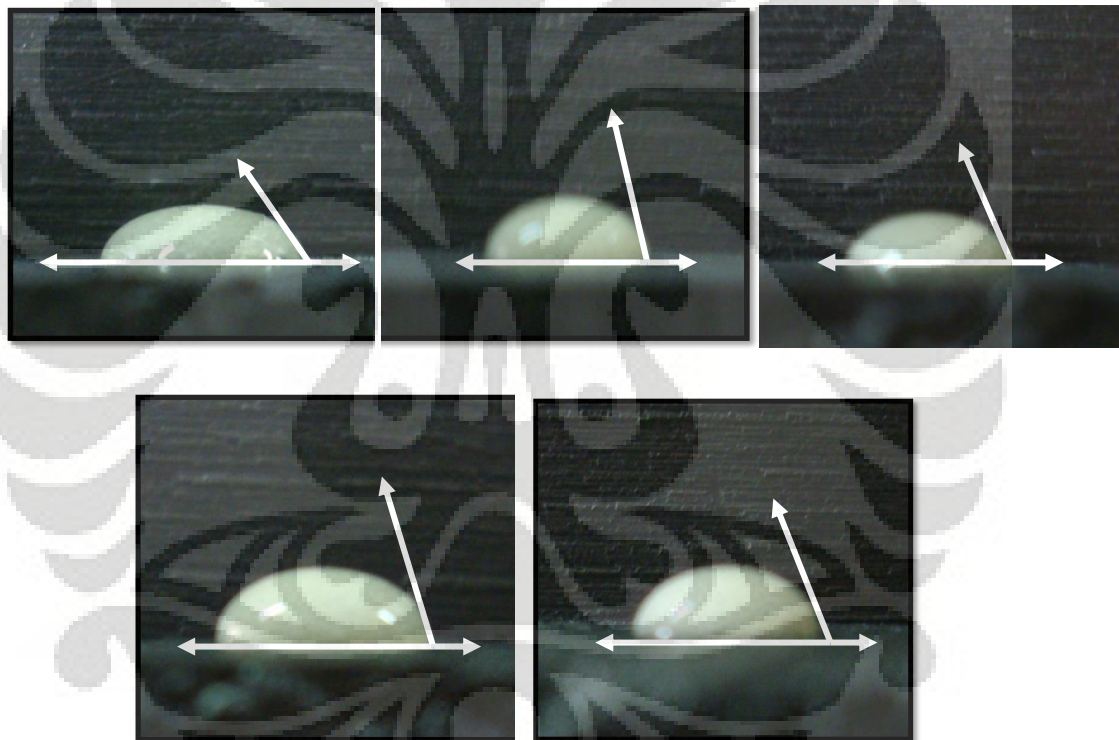
d = tebal spesimen (mm)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian *Sessile Drop*

Pengujian *sessile drop* dilakukan untuk mengetahui daya pembasahan suatu komposit. Hal ini akan mempengaruhi kuat tidaknya ikatan antara matriks dengan penguatnya seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 2.2.1.4. hasil dari pengamatan *sessile drop* dapat dilihat pada Gambar 4.1. berikut.



Gambar 4.1. Hasil Pengujian *Sesal Drop* (a) CB 0 wt. %, (b) CB 2,5 wt. %, (c) CB 5.0 wt. %, (d) CB 7.5 wt. %, dan (e) CB 10 wt. %

Berdasarkan hasil pengujian *sessile drop*, didapatkan besar sudut kontak pada setiap komposisi seperti terlihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Data Uji *Sessile Drop*

CB (wt%)	θ
0	46.00 ⁰
2.5	81.19 ⁰
5.0	59.36 ⁰
7.5	73.00 ⁰
10	79.11 ⁰

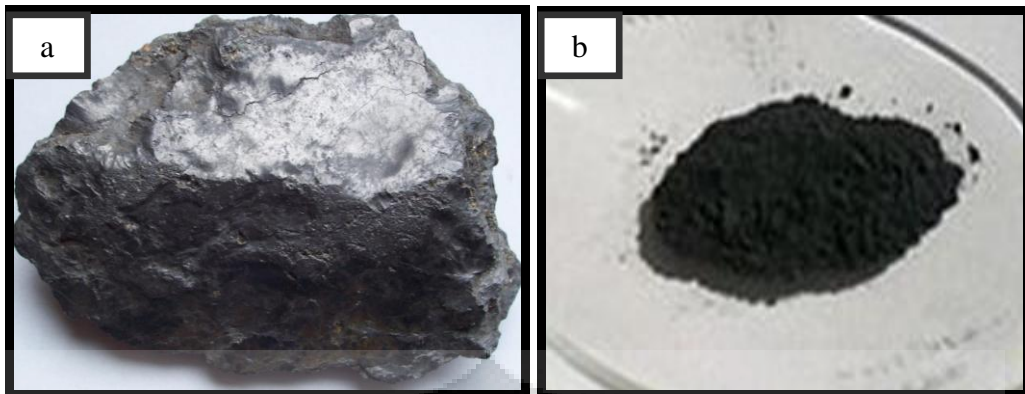
Tabel 4.1 menunjukkan bahwa sudut kontak terkecil terdapat pada komposisi CB 0 wt. %, hal ini menunjukkan bahwa ikatan terkuat antara matriks dengan penguatnya terdapat pada komposisi tersebut. Untuk meningkatkan daya pembasahan agar didapatkan ikatan antarmuka yang kuat maka ditambahkan *wetting agent* berupa metanol pada matriks sebagai pengencer untuk mempermudah pencampuran antara matriks dengan penguat sehingga akan terbentuk ikatan antarmuka yang kuat yang akan meningkatkan karakterisasi dari pelat bipolar.

4.2 Hasil Preparasi Sampel

Pada proses preparasi sampel ada tiga tahapan utama yaitu *crushing* dan *milling*, pencampuran, pencetakan, dan pembuatan spesimen uji. Setiap tahapan akan menentukan hasil dari preparasi sampel dan karakterisasi.

4.2.1 Hasil *Crushing* dan *Milling*

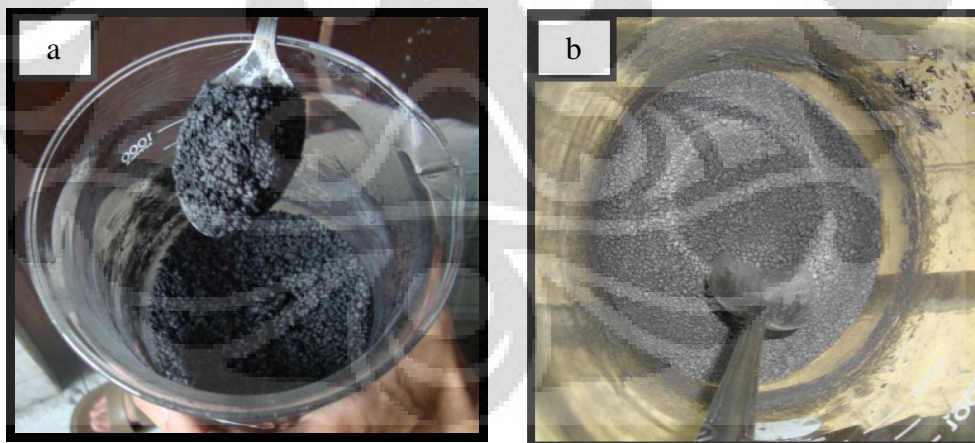
Pada proses *crushing* dan *milling*, grafit EAF yang masih berbentuk bongkahan dihancurkan hingga menjadi serbuk dengan ukuran partikel < 44 μm (325 mesh) seperti terlihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Grafit (a) Sebelum di *Crushing* dan *Milling* (b) setelah di *Crushing* dan *Milling*

4.2.2 Hasil Pencampuran

Setelah mendapatkan partikel grafit EAF dengan ukuran 325 mesh, tahapan selanjutnya adalah pencampuran antara matriks yaitu *epoxy* dan penguat berupa grafit EAF dan *carbon black*. Proses pencampuran ini merupakan proses yang paling menentukan karakterisasi dari pelat bipolar yang akan dihasilkan. Proses pencampuran ini akan didapatkan hasil yang berbentuk gumpalan seperti terlihat pada Gambar 4.3.



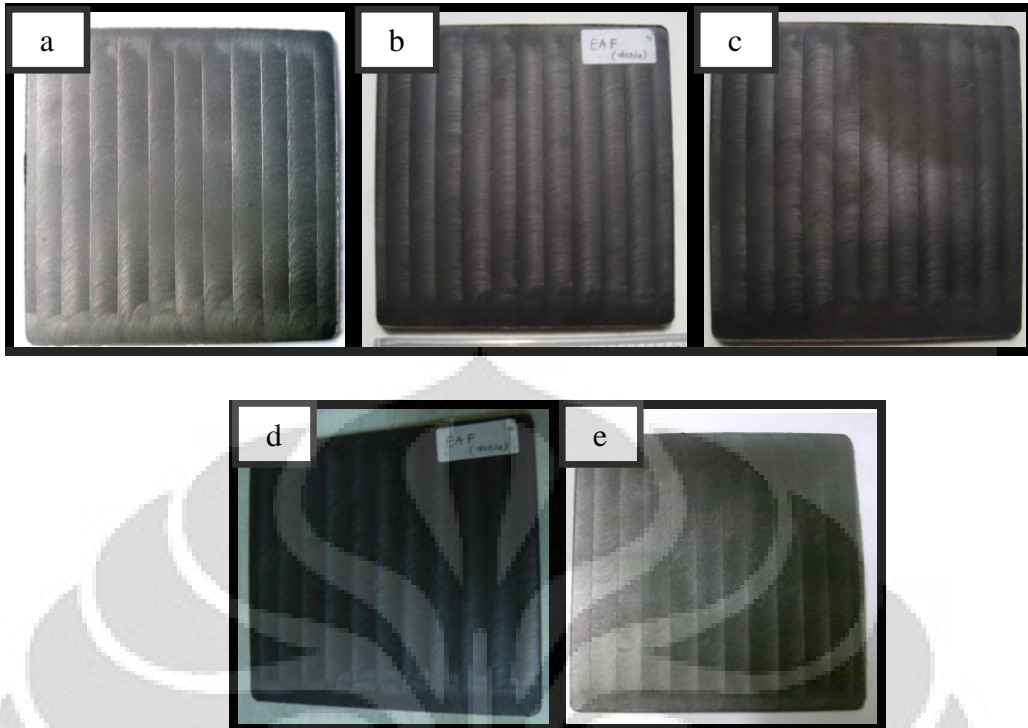
Gambar 4.3. Hasil Pencampuran (a) Sebelum *Mixing* di atas Hot Plate dan (b) Setelah *Mixing* di atas Hot Plate

Dari pengamatan visual dapat dilihat bahwa warna sampel adalah hitam keabuan. Hal ini disebabkan oleh warna polimer *epoxy* yang berwarna putih dan grafit EAF yang berwarna hitam keabuan dan warna *carbon black* yang berwarna hitam kecokelatan. Warna grafit EAF mendominasi warna dari hasil pencampuran. Hal ini disebabkan oleh perbandingan % berat dari grafit EAF pada setiap komposisi adalah yang paling besar sehingga warna grafit EAF mendominasi warna hasil pencampuran.

Hasil pencampuran tidak boleh terlalu basah karena akan berpengaruh pada hasil spesimen uji. Jika hasil pencampuran terlalu basah maka hasil spesimen uji akan cenderung retak.

4.2.3 Hasil Pencetakan

Setelah proses pencampuran selesai, maka tahapan selanjutnya adalah proses pencetakan. Pada proses ini dilakukan *hot pressing* yang merupakan salah satu metode *compression molding*. Masing-masing komposisi yang telah di campur homogen di cetak di dalam cetakan berukuran $150 \times 150 \times \pm 4.7$ mm pada mesin hot press.

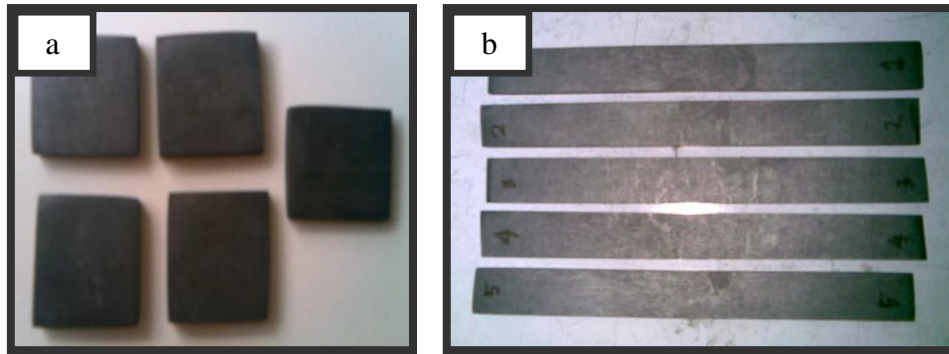


Gambar 4.4. Pelat Bipolar Hasil Pencetakan (a) CB 0 wt. %, (b) CB 2.5 wt. %, (c) CB 5 wt. %, (d) CB 7.5 wt. %, (e) CB 10 wt. %

Gambar 4.4. memperlihatkan secara visual dimensi pelat yang dihasilkan pada proses pencetakan terlihat baik dan tidak terdapat retak, hal ini disebabkan oleh proses setting *epoxy* yang optimum.

4.1.4 Hasil Pembuatan Spesimen

Pelat bipolar yang dihasilkan pada proses pencetakan selanjutnya dipotong untuk pembuatan spesimen uji. Ukuran setiap spesimen berdasarkan standar pada masing-masing pengujian. Setelah proses pemotongan dilakukan pengampelasan pada masing-masing spesimen. Hal ini bertujuan agar permukaan spesimen berbentuk rata dan mulus sehingga tidak terdapat *stress concentration* yang dapat mempengaruhi hasil pengujian.



Gambar 4.5. Spesimen Uji (a) Konduktivitas, Densitas, Porositas dan (b) Fleksural

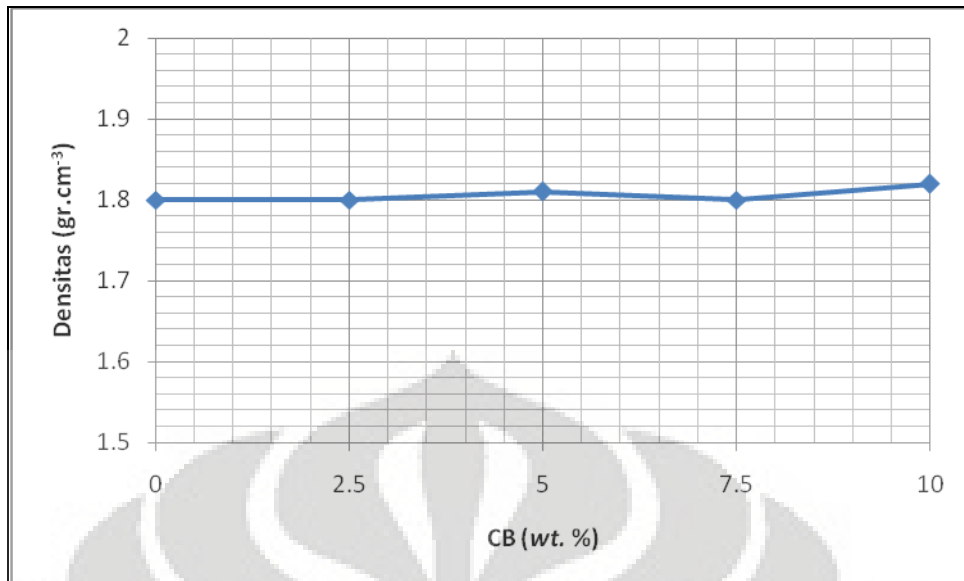
4.3 Hasil Karakterisasi Pelat Bipolar

4.3.1 Pengujian Densitas

Pengujian densitas dilakukan untuk mengetahui massa jenis dari pelat bipolar. Dengan massa jenis yang rendah, pelat bipolar akan mampu memenuhi tuntutan aplikasi dengan berat yang lebih ringan tanpa mengurangi performa yang diinginkan. Tabel 4.2 memperlihatkan data hasil pengujian densitas pada pelat bipolar dengan matriks *epoxy* dan penguat grafit EAF dengan penambahan dan tanpa penambahan CB yang selanjutnya dikonversi dalam bentuk grafik yang terlihat pada Gambar 4.6. Gambar 4.6. memperlihatkan pengaruh penambahan CB terhadap densitas pelat bipolar dengan kombinasi penambahan 2.5 wt. %.

Tabel 4.2. Data Uji Densitas

CB (wt%)	Densitas (grcm^{-3})
0	1.80
2.5	1.80
5.0	1.81
7.5	1.80
10	1.82



Gambar 4.6. Grafik Pengaruh Penambahan CB terhadap Densitas Pelat Bipolar

Bila dilihat pada Gambar 4.6. penambahan CB tidak berpengaruh terhadap nilai densitas suatu pelat bipolar. Hal ini dilihat dengan semakin meningkatnya kadar CB, nilai densitas yang diperoleh tidak berbeda jauh dengan nilai densitas sebelumnya. Penambahan CB pada komposisi 5 wt. % meningkatkan nilai densitas sebesar 0.56 % dari 1.8 gr.cm⁻³ menjadi 1.81 gr.cm⁻³. Kemudian peningkatan terbesar terjadi pada kadar CB 10 wt. % yaitu sebesar 1.11 % yaitu dari 1.8 gr.cm⁻³ menjadi 1.82 gr.cm⁻³. Secara umum terlihat bahwa peningkatan nilai densitas terlihat pada penambahan CB dengan komposisi 5 wt. % dan 10 wt. %.

Densitas polimer merupakan fungsi dari tekanan, temperatur, dan laju pendinginan [23]. *Specific volume* pada laju pendinginan lambat akan lebih rendah dibandingkan dengan pendinginan laju lebih tinggi. Dengan pendinginan yang lambat, molekul-molekul polimer akan memposisikan diri mereka lebih dekat satu sama lain. Hal ini akan mengurangi ruang kosong pada polimer. Di bawah temperatur gelas pergerakan panas molekul polimer akan menurun.

Secara umum peningkatan nilai densitas terhadap penambahan CB tidak berpengaruh karena peningkatan terbesar hanya mencapai 1.11 %. Pada penelitian

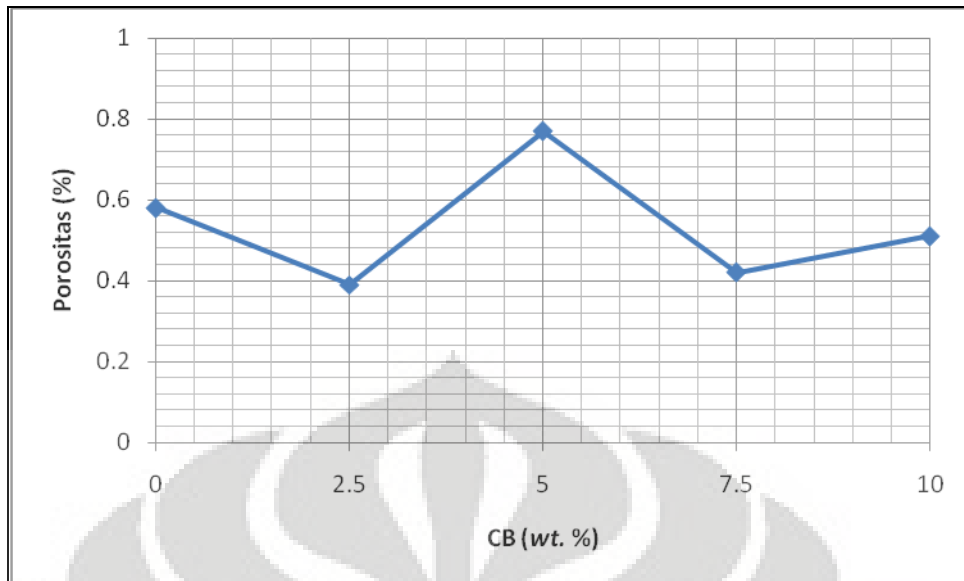
ini menggunakan tekanan sebesar 300 kg/cm^2 pada temperatur 70°C dan laju pendinginan yang sama untuk setiap sampelnya sehingga dengan adanya penambahan CB tidak menunjukkan adanya perubahan nilai densitas yang signifikan. Sebagai pelat bipolar yang ideal, nilai densitas yang diharapkan adalah $< 5 \text{ gr.cm}^{-3}$. Sehingga dalam hal ini nilai densitas komposit *epoxy*-grafit EAF telah memenuhi syarat ideal sebagai pelat bipolar [8].

4.3.2 Pengujian Porositas

Porositas merupakan salah satu parameter dalam menentukan kualitas performa suatu pelat bipolar. Diharapkan suatu pelat bipolar memiliki nilai porositas serendah mungkin agar tidak mengganggu reaksi yang terjadi pada rangkain *fuel cell*. Tabel 4.3 memperlihatkan data hasil pengujian porositas pada pelat bipolar dengan matriks *epoxy* dan penguat grafit EAF dengan penambahan dan tanpa penambahan CB yang selanjutnya dikonversi dalam bentuk grafik yang terlihat pada Gambar 4.7. Gambar 4.7. memperlihatkan pengaruh penambahan CB terhadap porositas pelat bipolar dengan kombinasi penambahan 2.5 wt. %.

Tabel 4.3. Data Uji Porositas

CB (wt%)	Porositas (%)
0.0	0.58
2.5	0.39
5.0	0.77
7.5	0.42
10	0.51



Gambar 4.7. Grafik Pengaruh Penambahan CB terhadap Porositas Pelat Bipolar

Gambar 4.7. memperlihatkan bahwa terjadi penurunan nilai porositas setelah penambahan CB. Pada komposisi penambahan 2.5 wt. % CB terjadi penurunan nilai densitas sebesar 32.76 % dari 0.58 % menjadi 0.39 % . Penambahan CB pada komposisi 5 wt. % meningkatkan nilai densitas sebesar 97.4 % dari 0.39% menjadi 0.77 % dibandingkan dengan penambahan CB sebelumnya. Kemudian terjadi penurunan nilai densitas kembali pada penambahan 7.5 wt. % CB sebesar 45.45 % dari 0.77 % menjadi 0.42 % . Setelah itu terjadi peningkatan kembali pada penambahan 10 wt. % CB sebesar 21.43 % bila dibandingkan dengan komposisi sebelumnya.

Porositas dapat terjadi karena proses penguapan metanol. Proses *compression molding* pada pencetakan pelat bipolar dengan temperatur 70 °C dan penekanan sebesar 300 kg.cm⁻² selama 4 jam akan menguapkan metanol yang digunakan untuk mengencerkan *epoxy*. Proses pengenceran *epoxy* yang tidak sempurna menyebabkan pencampuran antara *epoxy* dengan metanol tidak optimum. Akibatnya ketika metanol menguap, daerah yang seharusnya diisi oleh matriks *epoxy* menjadi kosong sehingga daerah tersebut menjadi berongga yang mengakibatkan terjadinya poros.

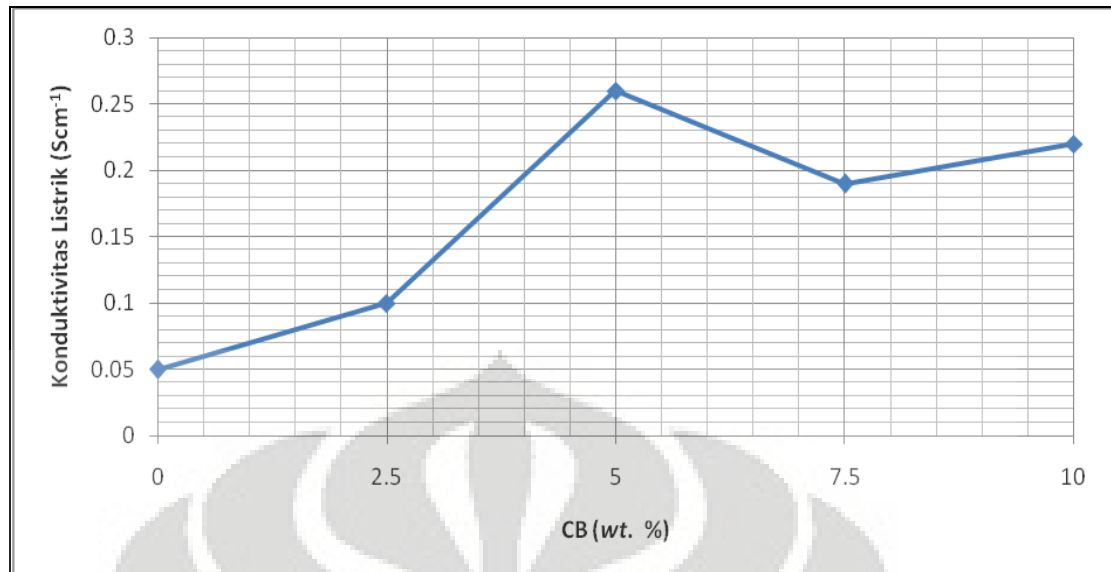
Secara umum terlihat bahwa pada semua variabel penambahan CB nilai porositas masih berada di bawah 1 % sehingga tidak berpengaruh terhadap reaksi yang terjadi di dalam *fuel cell* sehingga masih didapatkan efisiensi *fuel cell* yang tinggi.

4.3.3 Pengujian Konduktivitas Listrik

Pelat bipolar sangat memiliki peranan besar pada 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^{-1}) pelat bipolar yang dapat dilihat pada Tabel 4.4. dan selanjutnya dikonversi dalam bentuk grafik pada Gambar 4.8. untuk memperlihatkan pengaruh penambahan CB terhadap porositas pelat bipolar dengan kombinasi penambahan 2.5 wt. %.

Tabel 4.4. Data Uji Konduktivitas Listrik

CB (wt%)	Konduktivitas Listrik (S.cm^{-1})
0.0	0.05
2.5	0.10
5.0	0.26
7.5	0.19
10	0.22



Gambar 4.8. Grafik Pengaruh Penambahan CB terhadap Konduktivitas Listrik Pelat Bipolar

Pada Gambar 4.8. terlihat bahwa dengan semakin meningkatnya penambahan CB, maka nilai konduktivitas pelat bipolar pun akan semakin meningkat. Pada komposisi penambahan 2.5 wt. % CB, nilai konduktivitas meningkat sebesar 50 % dari 0.05 S.cm⁻¹ menjadi 0.1 S.cm⁻¹. Kemudian terjadi peningkatan lagi sebesar 160 % yang merupakan peningkatan terbesar yaitu dari 0.1 S.cm⁻¹ menjadi 0.26 S.cm⁻¹. Namun terjadi penurunan dengan penambahan CB sebesar 7.5 wt. % yaitu sebesar 26 % yaitu dari 0.26 S.cm⁻¹ menjadi 0.19 S.cm⁻¹. Setelah itu meningkat lagi dengan penambahan CB sebesar 10 wt. % sebesar 15.79 % dari 0.19 S.cm⁻¹ menjadi 0.22 S.cm⁻¹.

Pada prinsipnya dengan penambahan *carbon black* yang digunakan sebagai *conducting filler*, *carbon black* dengan luas permukaan yang tinggi dapat mengumpulkan arus listrik dan membentuk jaringan karbon konduktif. *Carbon black* berfungsi sebagai medium dari proses migrasi elektron di dalam grafit, sehingga arus yang mengalir didalamnya akan saling terdorong dan 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.

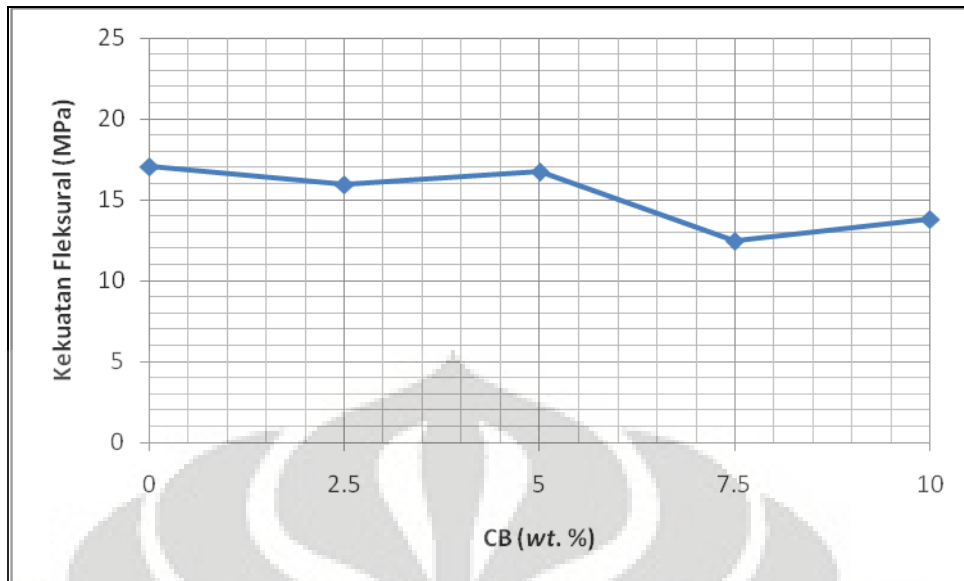
Secara umum, nilai konduktivitas yang didapatkan dari penelitian ini belum dapat memenuhi karakteristik sebagai pelat bipolar yang ideal yaitu sebesar $>100 \text{ S.cm}^{-1}$ [8]. Nilai konduktivitas dapat ditingkatkan dengan menyeragamkan ukuran partikel CB dengan grafit EAF ataupun dengan memperkecilnya. Dengan ukuran partikel CB yang kecil, persebaran partikel CB akan menjadi lebih merata sehingga fungsinya sebagai pengumpul arus dan medium dari proses migrasi elektron di dalam grafit menjadi lebih optimum.

4.3.4 Pengujian Fleksural

Pengujian fleksural dilakukan untuk mengetahui ketahanan material komposit terhadap beban tekan, karena pada aplikasinya sebagai pelat bipolar, material ini akan terkena beban tekan dari gas ke segala arah. Tabel 4.5. memperlihatkan data hasil pengujian fleksural yang selanjutnya ditegaskan pada Gambar 4.9. yang memperlihatkan grafik hasil pengujian densitas pada pelat bipolar dengan matriks *epoxy* dan penguat grafit EAF dengan penambahan dan tanpa penambahan CB. Dari gambar tersebut dapat dilihat pengaruh penambahan CB terhadap kekuatan fleksural pelat bipolar dengan kombinasi penambahan 2.5 wt. %.

Tabel 4.5. Data Uji Fleksural

CB (%)	Kekuatan Fleksural (Mpa)
0.0	17.06
2.5	15.95
5.0	16.75
7.5	12.46
10	13.79



Gambar 4.9. Grafik Pengaruh Penambahan CB terhadap Kekuatan Fleksural Pelat Bipolar

Pada Gambar 4.9. terlihat bahwa dengan penambahan CB akan menurunkan nilai fleksural pelat bipolar. Pada komposisi penambahan 2.5 wt. % CB, nilai fleksural menurun sebesar 6.5 % dari 17.06 MPa menjadi 15.95 MPa. Kemudian terjadi peningkatan lagi sebesar 5 % dari 15.95 MPa menjadi 16.75 MPa, namun tetap berada dibawah nilai fleksural pelat tanpa penambahan CB. Selanjutnya terjadi penurunan dengan penambahan CB sebesar 7.5 wt. % yaitu sebesar 25.61 % yaitu dari 16.75 MPa menjadi 12.46 MPa. Setelah itu meningkat lagi dengan penambahan CB sebesar 10 wt. % sebesar 10.67 % dari 12.46 MPa menjadi 13.79 MPa. Secara keseluruhan nilai fleksural menurun dengan adanya penambahan CB.

CB memiliki struktur yang berbentuk rongga yang dapat menurunkan sifat mekanis dari pelat bipolar sehingga dengan meningkatnya kadar CB pada pelat bipolar maka kekuatan pelat bipolar akan menurun. Namun faktor ikatan antarmuka antara matriks dengan penguat juga menjadi faktor dominan dalam penentuan kekuatan pelat bipolar. Semakin baik ikatan antara matriks dengan penguat maka kekuatan suatu komposit juga akan semakin tinggi.

Pada penambahan CB sebesar 5 wt. % didapatkan peningkatan terbesar terhadap nilai fleksural pelat bipolar. Bila dilihat kembali pada pengamatan *sessile drop*, daya pembasahan pada kadar CB 5 wt. % memiliki sudut kontak yang tidak jauh berbeda dengan kadar CB 0 wt. % atau tanpa penambahan CB, sehingga dapat disimpulkan bahwa ikatan antara matriks dengan penguat yang optimum terjadi pada dua pelat tersebut. Namun dalam hal ini, nilai fleksural pelat bipolar belum memenuhi standar ideal suatu pelat bipolar yaitu sebesar > 25 MPa [21].

4.4 Perbandingan Sifat komposit

Dari hasil penelitian komposit pelat bipolar dengan matriks *epoxy* dan penguat grafit EAF dengan penambahan *carbon black* sebagai *conducting filler*, maka dapat dilakukan suatu perbandingan antara sifat-sifat komposit pada setiap pelat yang dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.6 Perbandingan Sifat Komposit

Penambahan CB (wt. %)	Densitas (gr.cm ⁻³)	Porositas (%)	Konduktivitas Listrik (S.cm ⁻¹)	Kekuatan Fleksural (MPa)
0.0	1.80	0.58	0.05	17.06
2.5	1.80	0.39	0.10	15.95
5.0	1.81	0.77	0.26	16.75
7.5	1.80	0.42	0.19	12.46
10.0	1.83	0.51	0.22	13.79

Dari Tabel 4.6. dapat dilihat diambil kesimpulan bahwa sampel pelat bipolar yang memiliki nilai karakteristik yang optimum terdapat pada penambahan CB 5 wt. %. Pada komposisi penambahan CB 5 wt. % didapatkan nilai konduktivitas yang tertinggi dan nilai fleksural tertinggi kedua dengan perbandingan sebesar 1.81 % dengan nilai fleksural tertinggi pada sampel tanpa

penambahan CB dan untuk nilai densitas dan porositas pada semua sampel, memenuhi standar pelat bipolar ideal.



BAB V

KESIMPULAN

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

1. Komposit pelat bipolar dengan menggunakan 10 wt. % *conducting filler carbon black* memiliki nilai densitas tertinggi sebesar 1.82 gr.cm^{-3} . Nilai densitas ini memenuhi standar ideal pelat bipolar pada sistem PEMFC yaitu $< 5 \text{ gr.cm}^{-3}$.
2. Komposit pelat bipolar dengan menggunakan 5 wt. % *conducting filler carbon black* memiliki nilai porositas tertinggi sebesar 0.77 %. Nilai ini masih berada didalam nilai yang aman untuk digunakan sebagai pelat bipolar untuk sistem PEMFC yaitu $< 1 \%$.
3. Komposisi pelat bipolar dengan menggunakan 5 wt. % *conducting filler carbon black* memiliki nilai konduktivitas tertinggi yaitu sebesar 0.26 S.cm^{-1} . Nilai ini masih berada jauh di bawah standar ideal pelat bipolar yaitu $> 100 \text{ S.cm}^{-1}$.
4. Komposit pelat bipolar dengan menggunakan 0 wt. % *conducting filler carbon black* atau tanpa penambahan *carbon black* memiliki nilai kekuatan fleksural tertinggi sebesar 17.06 MPa. Namun nilai ini masih belum memenuhi target DOE yaitu diatas 25 MPa [24].
5. Hasil pengamatan *sessile drop* dilakukan untuk mengetahui sudut kontak permukaan yang akan mempengaruhi terhadap kekuatan ikatan antara matriks dengan penguat pada komposit pelat bipolar. Hasil pengamatan sesal drop didapatkan bahwa daya pembasahan terbaik terdapat pada penambahan *conducting filler carbon black* dengan komposisi 0 wt. % dan 5 wt. %.

6. Secara keseluruhan, komposit pelat bipolar yang memiliki nilai karakteristik optimum adalah terdapat pada komposisi 5 wt. % *conducting filler carbon black* karena memiliki nilai konduktivitas listrik yang paling tinggi dan nilai fleksural yang baik.

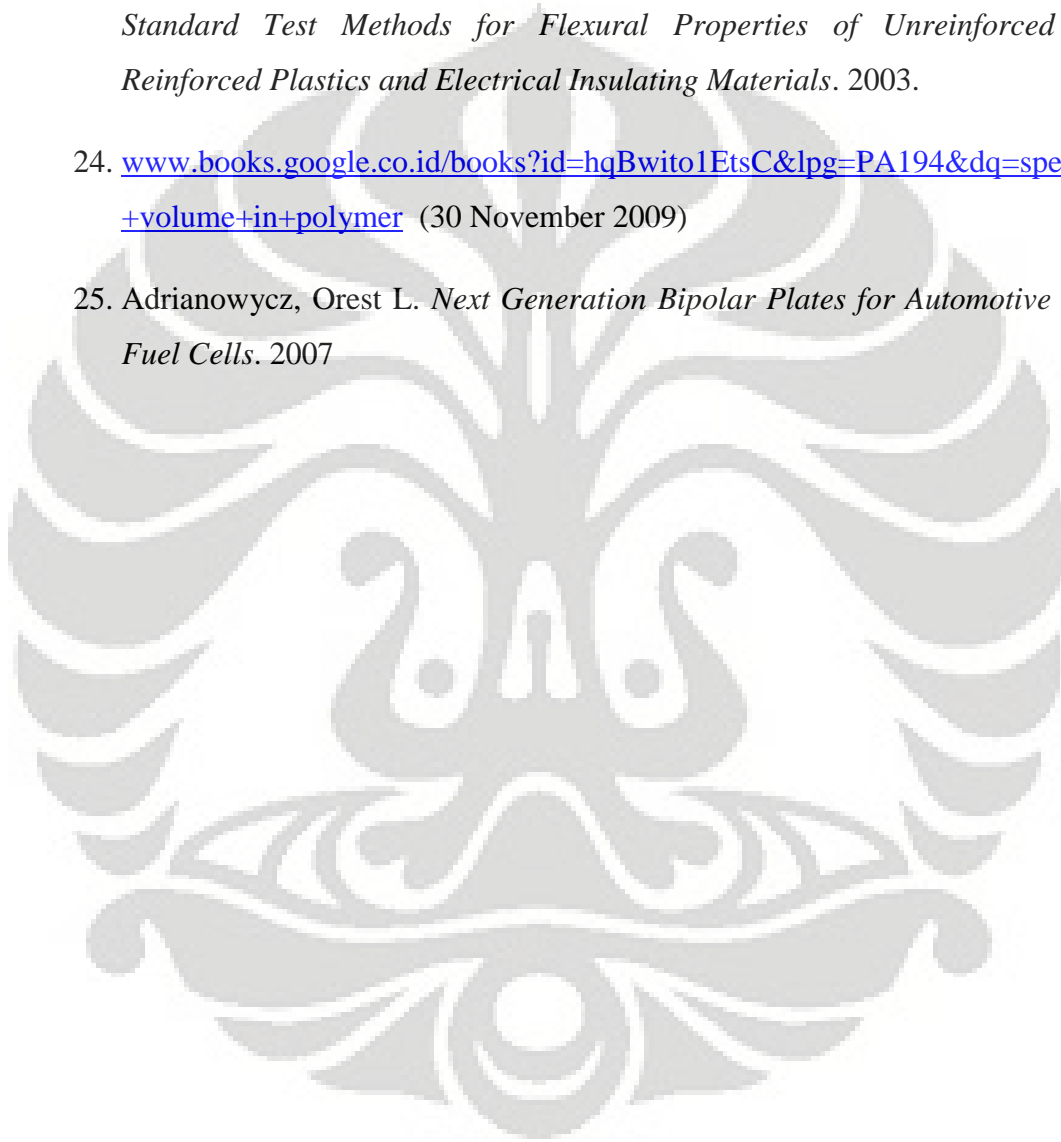


DAFTAR PUSTAKA




1. <http://capresindonesia.files.wordpress.com/2009/05/grafik-harga-minyak1.jpg>
(20 September 2009)
2. Rayment, Chris .*Introduction to Fuel Cell Technology*. Department of Aerospace and Mechanical Engineering. Notre Dame. 2003.
3. (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. 2007.
4. http://www.chem-is-try.org/artikel_kimia/kimia_fisika/sel-bahan-bakar-solusi-energi-masa-depan/ (22 September 2009)
5. Jacobson, Allan J. *Alternative Energy Technologies Fuel Cells*. University of Houston.
6. <http://mahasiswaanegarawan.wordpress.com/2007/08/18/sel-bahan-bakar-fuel-cell-sebuah-energi-alternatif-berkelanjutan-dan-ramah-lingkungan/>
(30 November 2009)
7. http://www.trtech.dk/technology_pemfc.html (28 November 2009)
8. Hermann, A, Chaudhuri,T, Sagnol, P. *Bipolar plates for PEM fuel cells: Areview*. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2005
9. H2 & Fuel Cell Science & Technology Education. *High Schools in New South Wales*. <http://www.fuelcells.org.au/Fuel-Cell-Education-NSW-Australia.htm>.
(23 November 2009)
10. Yuhua Wang. *Conductive Thermoplastic Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. 2006.
11. A. Boudghene Stambouli, E. Traversa. *Fuel cells, an alternative to standard sources of energy*. University of Roma, 'Tor Vergata', Department of





- Chemical Science and Technology, Via della Ricerca Scientifica-00133, Roma, Italy. 2001.
12. Syahrial, Anne Zulfia. *Diktat Kuliah Komposit*. Depok : Departemen Metalurgi & Material UI. 2009.
 13. <http://www.ksvltd.com/content/sitepix/sca.jpg> (22 November 2009)
 14. Jang, Borz. *Advanced Polymer Composite*. Astm International United States of America. 1994.
 15. Harper.A. Charles. *Modern Plastics Handbook 2000*. Mc Graw-Hill published company.hlm 2.62.USA. 2000.
 16. http://www.chem-is-try.org/materi_kimia/kimia-anorganik-universitas/kimia-unsur-non-logam/karbon-2/ (2 Desember 2009)
 17. <http://images.google.co.id/imgres?imgurl=http://mrsec.wisc.edu/Edetc/nanoquest/carbon/images/graphite.png&imgrefurl=http://mrsec.wisc.edu/Edetc/nanoquest/carbon/index.html&usg=k5ewUnMS-X51Zyne7Ygri5aftjU=&h=224&w=180&sz=35&hl=id&start=20&tbnid=o87mP8ixUSTdZM:&tbnh=108&tbnw=87&prev=/images%3Fq%3Dstruktur%2Bgrafit%26gbv%3D2%26hl%3Did%26sa%3DG> (2 Desember 2009)
 18. Suharno, Bambang. *Diktat Kuliah Proses Pembentukan Besi Baja*. Depok : Departemen Metalurgi dan Material UI. 2007.
 19. <http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol> (27 November 2009)
 20. American Standards for Testing Material international. *ASTM D792- Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. 2003.
 21. American Standards for Testing Material international. *ASTM C20- Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water*. 2003.

22. American Standards for Testing Materials International. *ASTM B193–Standard Test Methods for Resistivity of Electrical Conductor Materials*. 2003.
23. American Standards for Testing Materials International. *ASTM D790–Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. 2003.
24. www.books.google.co.id/books?id=hqBwito1EtsC&lpg=PA194&dq=specific+volume+in+polymer (30 November 2009)
25. Adrianowycz, Orest L. *Next Generation Bipolar Plates for Automotive PEM Fuel Cells*. 2007



Lampiran 1 Gambar Alat Preparasi Sampel dan Karakterisasi

Nama Alat	Foto Alat
Beaker glass	
Timbangan Digital	
Mesin Pengguncang	

Ball Mill	
Mixer	
Hot Plate	
Mesin Hot Press	

Conductivity Test




Flexural Test



Lampiran 2 Spesifikasi Epoxy Resin

EP



Technical Information

Bakelite® EPR 174

Unmodified, liquid standard epoxy resin based on Bisphenol-A

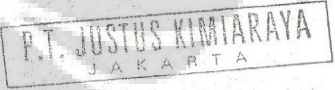
Properties	Unit	Value
Viscosity at 25 °C	mPa·s	13000 ± 2000
Epoxy equivalent	g/equiv	189 ± 5
Hydrolyzable chlorine content	%	< 0.05
Colour according to the Gardner scale		< 1

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

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

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

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



Lampiran 3 Spesifikasi Epoxy Hardener

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

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

SPECIFICATION :

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

TYPICAL PROPERTIES :

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

TYPICAL PROPERTIES IN A CURED COATING :

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

TYPICAL CURED RESIN PROPERTIES :

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

CHEMICAL RESISTANCE PROPERTIES :

(weight change after 10 days immersion, %)

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

P.T. Justus Kimiara
JAKARTA

Lampiran 4 Spesifikasi Grafit EAF PT. Krakatau Steel

WED, 29-JUL-09 12:20

DIV SSP II PTKS CLG

62 0254 371184

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

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

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

MANUFACTURE :

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

(lanjutan)

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

CILEGON -----

INVENTORY CONTROL SYSTEM

Item No : 00908011

DATE : 04.12.2007

GROUP/CLASS : 443019132

Nato-name : ELECTRODE,

Material Code	Material Unit	BOH	Min	Max
Name & Spesification	Group			

00908011	KG	9.000	50,000.000	150,000.000
----------	----	-------	------------	-------------

GRAPHITE,ELECTRODE-D406X1800MM-20-46KA

GRAPHITE ELECTRODE

GRADE: ULTRA HIGH POWER (UHP)

DIA.: 406 MM

LENGTH: 1800 MM

POROSITY:15 - 26%

BULK DENSITY:1.66-1.72 GR/CM3

RESISTANCE:5.0-6.0 OHM/M

THERMAL CONDUCTIVITY:120-300 W/MK

COMPRESIVE STRENGTH:260-262 KG/CM2

CURRENT CARRYING CAPACITY:20-46 KA

WEIGHT OF EACH SET POLE & NIPPLE:+/- 410KG

ASH CONTENT'S:0.5% MAX

AVERAGE LINEAR COEFICIENT OF THERMAL EXPANS:

(0.5-2.5)X0.000001/K

COMPLETE WITH ACCESSORIES :

- 3 EA NIPPLE TRANSPORT FOR 20 TON GRAPHITE ELECTRODE

- PRESET LONG NIPPLE

- 1 EACH ELASTIC CRANE SUSPENSION GEAR FOR ELECTRODE 16 IN

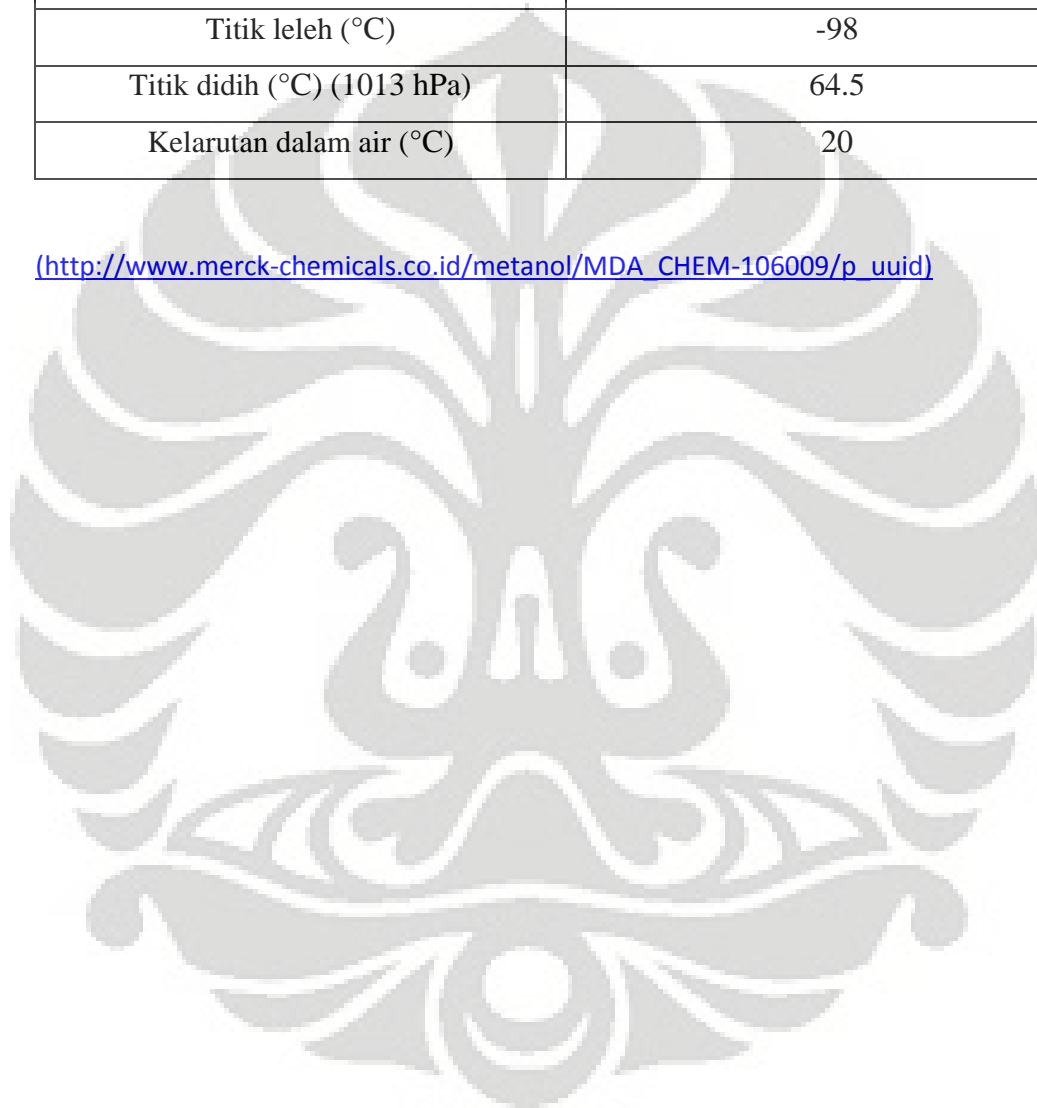
MANUFACTURE :

GENSUPP ELECTRODE-ARC-D406MMX1800MM-20-46KA

Lampiran 5 Spesifikasi Metanol MERCK

Sifat	Nilai
Formulasi kimia	CH ₃ OH
Massa molar (g/mol)	32.04
Densitas (g/cm ³) (20 °C)	0.792
Titik leleh (°C)	-98
Titik didih (°C) (1013 hPa)	64.5
Kelarutan dalam air (°C)	20

http://www.merck-chemicals.co.id/metanol/MDA_CHEM-106009/p_uuid



Lampiran 6 Contoh Perhitungan Sudut Kontak

a) $\theta > 90^0$ (keadaan *non wetting*)

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

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

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

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

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

Berdasarkan Bashford dan Adams (1883) Tabel I : $\beta = 0$

Dari Tabel V untuk $\beta = 0$;

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

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

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

Berdasarkan Tabel II untuk nilai dibawah ini :

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

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

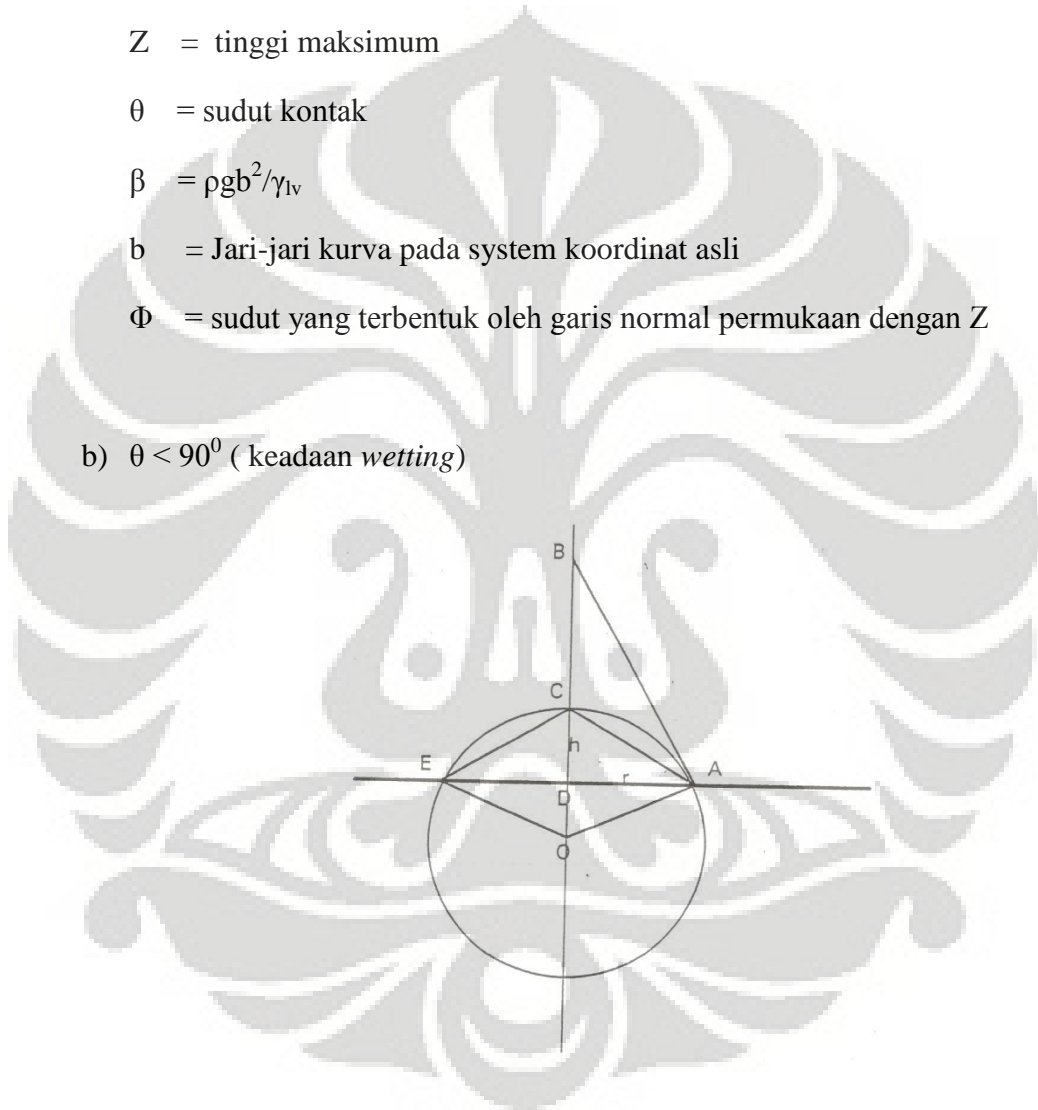
Untuk $\beta = 0$, lihat Tabel II untuk β mendekati 0.125

$$\theta = 154^0$$

$$\theta = 152^0$$

(lanjutan)

Keterangan :

 $2 X =$ diameter maksimum $2 R =$ diameter $Z =$ tinggi maksimum $\theta =$ sudut kontak $\beta = \rho g b^2 / \gamma_{lv}$ $b =$ Jari-jari kurva pada system koordinat asli $\Phi =$ sudut yang terbentuk oleh garis normal permukaan dengan Z b) $\theta < 90^\circ$ (keadaan *wetting*)

Bentuk dari *sessile drop* dapat digambar dalam bentuk bola yang akan menunjukkan daerah antara titik A, C, E dengan tinggi h dan jari-jari r .

In $\Delta OAE \longrightarrow$ panjang $OE =$ panjang OA

panjang $OD \perp$ panjang AE

(lanjutan)

Sehingga panjang DE = panjang DA

In $\triangle CEA \longrightarrow$ panjang DE = panjang DA

panjang EA \perp panjang CD

Sehingga panjang CE = panjang CA

$\angle CED = \angle CAD$

Berdasarkan sifat tangen $\angle CED = \angle CAD$

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

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

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

Lampiran 7 Tabel dari Bashforth dan Adams (1883)

I

$\left(\frac{x}{z}\right) \phi = 90^\circ$										
β	'0	'1	'2	'3	'4	'5	'6	'7	'8	'9
0	1'00000	'02180	'04149	'05942	'07589	'09115	'10542	'11880	'13140	'14333
1	'15466	'16546	'17576	'18562	'19508	'20418	'21294	'22138	'22953	'23742
2	'24507	'25248	'25967	'26666	'27345	'28006	'28650	'29278	'29890	'30488
3	1'31072	'31643	'32201	'32748	'33283	'33807	'34320	'34824	'35318	'35803
4	'36278	'36745	'37204	'37656	'38100	'38535	'38963	'39386	'39802	'40211
5	'40615	'41012	'41403	'41789	'42169	'42544	'42914	'43278	'43638	'43993
6	1'44344	'44690	'45032	'45369	'45702	'46032	'46358	'46679	'46996	'47310
7	'47621	'47928	'48232	'48533	'48830	'49124	'49415	'49703	'49988	'50270
8	'50550	'50827	'51101	'51371	'51640	'51906	'52169	'52430	'52689	'52946
9	1'53200	'53452	'53702	'53949	'54194	'54437	'54678	'54917	'55154	'55389
10	'55621	'55851	'56080	'56307	'56533	'56758	'56981	'57202	'57421	'57638
11	'57852	'58065	'58277	'58488	'58698	'58906	'59112	'59317	'59520	'59722
12	1'59923	'60122	'60320	'60517	'60712	'60906	'61099	'61290	'61480	'61669
13	'61856	'62042	'62227	'62411	'62594	'62776	'62957	'63136	'63314	'63491
14	'63667	'63842	'64016	'64189	'64361	'64532	'64702	'64871	'65039	'65206
15	1'65372	'65537	'65701	'65864	'66027	'66189	'66350	'66510	'66669	'66827
16	'66984	'67140	'67296	'67451	'67605	'67758	'67910	'68062	'68213	'68363
17	'68512	'68661	'68809	'68956	'69102	'69248	'69393	'69537	'69681	'69824
18	1'69966	'70108	'70249	'70389	'70528	'70667	'70805	'70943	'71080	'71217
19	'71353	'71488	'71623	'71757	'71890	'72023	'72155	'72287	'72418	'72548
20	'72678	'72807	'72936	'73064	'73192	'73319	'73446	'73572	'73698	'73823
21	1'73947	'74071	'74194	'74317	'74440	'74562	'74684	'74805	'74926	'75046
22	'75165	'75284	'75403	'75521	'75639	'75756	'75873	'75989	'76105	'76221
23	'76336	'76451	'76565	'76679	'76792	'76905	'77017	'77129	'77241	'77352
24	1'77463	'77574	'77684	'77794	'77903	'78011	'78119	'78227	'78335	'78443
25	'78550	'78657	'78764	'78870	'78975	'79080	'79185	'79289	'79393	'79497
26	'79600	'79703	'79806	'79908	'80010	'80112	'80213	'80314	'80415	'80515
27	1'80615	'80715	'80814	'80913	'81012	'81110	'81208	'81306	'81404	'81501
28	'81598	'81695	'81791	'81887	'81983	'82078	'82173	'82268	'82362	'82456
29	'82550	'82643	'82736	'82829	'82922	'83015	'83107	'83199	'83291	'83383
30	1'83474	'83565	'83656	'83746	'83836	'83926	'84015	'84104	'84193	'84282
31	'84371	'84459	'84547	'84635	'84722	'84809	'84896	'84983	'85070	'85156
32	'85242	'85328	'85414	'85499	'85584	'85669	'85754	'85838	'85922	'86006
33	1'86090	'86173	'86256	'86339	'86422	'86505	'86587	'86669	'86751	'86833
34	'86915	'86996	'87077	'87158	'87239	'87320	'87400	'87480	'87560	'87640
35	'87719	'87798	'87877	'87956	'88035	'88113	'88191	'88269	'88347	'88425

(lanjutan)

II

ϕ	$\beta = 0.125$		0.25		0.50		0.75		1.0	
	$\frac{x}{b}$	$\frac{z}{b}$	$\frac{x}{b}$	$\frac{z}{b}$	$\frac{x}{b}$	$\frac{z}{b}$	$\frac{x}{b}$	$\frac{z}{b}$	$\frac{x}{b}$	$\frac{z}{b}$
5°	.08715	.00380	.08714	.00380	.08711	.00380	.08709	.00380	.08707	.00380
10	.17357	.01518	.17348	.01517	.17332	.01515	.17316	.01513	.17300	.01511
15	.25855	.03402	.25827	.03397	.25774	.03386	.25720	.03375	.25668	.03365
20	.34139	.06014	.34076	.05997	.33952	.05964	.33830	.05932	.33711	.05900
25	.42141	.09328	.42022	.09288	.41790	.09210	.41564	.09134	.41344	.09060
30	.49798	.13314	.49600	.13232	.49217	.13075	.48849	.12925	.48495	.12781
35	.57049	.17933	.56749	.17786	.56173	.17506	.55628	.17242	.55109	.16993
40	.63838	.23142	.63413	.22899	.62608	.22441	.61854	.22017	.61146	.21623
45	.70115	.28893	.69545	.28517	.68478	.27819	.67493	.27183	.66579	.26599
50	.75834	.35133	.75104	.34582	.73752	.33573	.72522	.32669	.71394	.31851
55	.80955	.41807	.80055	.41033	.78407	.39637	.76928	.38408	.75587	.37312
60	.85445	.48855	.84371	.47807	.82427	.45946	.80706	.44335	.79161	.42919
65	.89278	.56216	.88033	.54840	.85807	.52436	.83859	.50389	.82127	.48613
70	.92430	.63826	.91027	.62067	.88545	.59042	.86396	.56511	.84502	.54342
75	.94889	.71621	.93348	.69425	.90647	.65707	.88332	.62646	.86305	.60056
80	.96644	.79537	.94995	.76850	.92126	.72372	.89685	.68744	.87559	.65708
85	.97694	.87508	.95974	.84281	.92998	.78984	.90478	.74756	.88291	.71259
90	.98042	.95471	.96297	.91656	.93283	.85491	.90736	.80641	.88529	.76671
95	.97698	1.03363	.95981	.98920	.93007	.91845	.90488	.86358	.88302	.81909
100	.96677	1.11121	.95047	1.06015	.92197	.98002	.89763	.91870	.87640	.86944
105	.95001	1.18686	.93524	1.12889	.90886	1.03920	.88595	.97145	.86576	.91747
110	.92695	1.26000	.91443	1.19492	.89109	1.09562	.87018	1.02151	.85144	.96293
115	.89793	1.33008	.88841	1.25777	.86902	1.14892	.85067	1.06863	.83377	1.00561
120	.86333	1.39656	.85759	1.31699	.84306	1.19880	.82782	1.11255	.81312	1.04531
125	.82360	1.45895	.82243	1.37220	.81366	1.24498	.80201	1.15309	.78983	1.08189
130	.77923	1.51678	.78345	1.42301	.78127	1.28722	.77365	1.19006	.76428	1.11520
135	.73082	1.56962	.74122	1.46912	.74637	1.32531	.74318	1.22333	.73686	1.14514
140	.67902	1.61710	.69635	1.51026	.70949	1.35912	.71103	1.25280	.70794	1.17165
145	.62460	1.65888	.64953	1.54620	.67117	1.38855	.67765	1.27843	.67793	1.19409
150	.56842	1.69469	.60151	1.57681	.63197	1.41354	.64350	1.30020	.64720	1.21428
155	.51150	1.72434	.55310	1.60203	.59246	1.43412	.60904	1.31815	.61615	1.23045
160	.45497	1.74778	.50514	1.62192	.55321	1.45039	.57472	1.33238	.58516	1.24330
165	.40013	1.76511	.45850	1.63665	.51480	1.46252	.54096	1.34304	.55458	1.25296
170	.34830	1.77663	.41402	1.64653	.47773	1.47076	.50818	1.35032	.52476	1.25958
175	.30080	1.78298	.37245	1.65203	.44247	1.47542	.47672	1.35448	.49599	1.26338
180	.25864	1.78487	.33439	1.65372	.40941	1.47688	.44690	1.35579	.46853	1.26459

(lanjutan)

V

β	15°		30°		45°		60°		90°	
	$\frac{x}{b}$	$\frac{z}{b}$	$\frac{x}{b}$	$\frac{z}{b}$	$\frac{x}{b}$	$\frac{z}{b}$	$\frac{x}{b}$	$\frac{z}{b}$	$\frac{x}{b}$	$\frac{z}{b}$
+										
0°	'25882	'03407	'50000	'13397	'70711	'29289	'86603	'50000	1'00000	1'00000
0'1	'25860	'03403	'49838	'13330	'70232	'28972	'85673	'49078	'98421	'96321
0'2	'25838	'03399	'49679	'13264	'69770	'28666	'84794	'48217	'96976	'93113
0'3	'25816	'03395	'49522	'13200	'69324	'28372	'83962	'47412	'95648	'90285
0'4	'25795	'03390	'49368	'13137	'68894	'28090	'83174	'46657	'94422	'87764
0'5	'25774	'03386	'49217	'13075	'68478	'27819	'82427	'45946	'93283	'85491
0'6	'25752	'03381	'49068	'13015	'68075	'27558	'81715	'45275	'92217	'83423
0'7	'25730	'03377	'48922	'12955	'67684	'27306	'81035	'44640	'91215	'81529
0'8	'25710	'03373	'48777	'12896	'67305	'27062	'80384	'44038	'90271	'79786
0'9	'25689	'03369	'48635	'12838	'66937	'26827	'79760	'43465	'89377	'78173
1'0	'25668	'03365	'48495	'12781	'66579	'26599	'79161	'42919	'88529	'76671
1'1	'25647	'03360	'48357	'12725	'66231	'26378	'78585	'42397	'87722	'75268
1'2	'25626	'03356	'48221	'12670	'65892	'26164	'78031	'41898	'86953	'73954
1'3	'25606	'03352	'48087	'12616	'65562	'25957	'77496	'41420	'86218	'72719
1'4	'25585	'03348	'47955	'12563	'65241	'25756	'76979	'40962	'85513	'71554
1'5	'25564	'03344	'47826	'12511	'64928	'25560	'76478	'40522	'84838	'70453
1'6	'25543	'03340	'47698	'12460	'64622	'25370	'75994	'40098	'84189	'69410
1'7	'25523	'03336	'47571	'12409	'64323	'25185	'75526	'39690	'83564	'68418
1'8	'25503	'03332	'47447	'12360	'64032	'25004	'75072	'39297	'82963	'67475
1'9	'25482	'03328	'47324	'12311	'63747	'24829	'74631	'38918	'82383	'66576
2'0	'25462	'03324	'47203	'12262	'63469	'24658	'74203	'38552	'81822	'65717
2'1	'25442	'03321	'47084	'12214	'63196	'24491	'73787	'38198	'81280	'64895
2'2	'25422	'03317	'46965	'12167	'62929	'24328	'73382	'37855	'80755	'64109
2'3	'25402	'03313	'46848	'12121	'62668	'24169	'72988	'37522	'80247	'63353
2'4	'25383	'03309	'46733	'12075	'62412	'24014	'72605	'37200	'79754	'62628
2'5	'25363	'03305	'46619	'12030	'62161	'23863	'72231	'36888	'79275	'61931
2'6	'25343	'03302	'46507	'11986	'61915	'23715	'71866	'36585	'78810	'61260
2'7	'25324	'03298	'46396	'11942	'61674	'23570	'71510	'36290	'78358	'60613
2'8	'25304	'03294	'46286	'11899	'61437	'23429	'71162	'36004	'77919	'59989
2'9	'25285	'03290	'46178	'11856	'61205	'23290	'70823	'35726	'77491	'59386
3'0	'25265	'03286	'46071	'11814	'60978	'23155	'70492	'35454	'77074	'58803
3'1	'25246	'03282	'45966	'11773	'60754	'23022	'70168	'35189	'76667	'58240
3'2	'25227	'03279	'45861	'11732	'60534	'22892	'69851	'34932	'76270	'57694
3'3	'25208	'03275	'45757	'11692	'60318	'22765	'69540	'34681	'75883	'57165
3'4	'25189	'03271	'45655	'11652	'60106	'22640	'69236	'34437	'75506	'56652
3'5	'25170	'03268	'45553	'11613	'59898	'22517	'68939	'34199	'75137	'56154
3'6	'25150	'03264	'45453	'11573	'59693	'22397	'68647	'33966	'74776	'55672
3'7	'25132	'03260	'45355	'11535	'59491	'22279	'68361	'33739	'74423	'55202
3'8	'25113	'03256	'45257	'11497	'59292	'22163	'68080	'33517	'74078	'54745

Lampiran 8 Hasil Pengujian Densitas

		A (Udara) (gr)	B (Air) (gr)	A-B (gr)	ρ air (gr/cm ³)		Densitas (gr/cm ³)	Densitas rata2 (gr/cm ³)
CB 0%	I	2.93	1.29	1.64	0.996089	T = 28.5 ⁰ C	1.78	1.79
	II	3.29	1.47	1.82	0.996089		1.80	
	III	2.99	1.33	1.66	0.996089		1.80	
CB 2.5%	I	4.02	1.79	2.23	0.996232	T = 28.0 ⁰ C	1.80	1.80
	II	4.58	2.05	2.53	0.996232		1.80	
	III	4.15	1.85	2.29	0.996232		1.80	
CB 5%	I	3.85	1.73	2.12	0.995796	T = 29.5 ⁰ C	1.81	1.81
	II	3.65	1.64	2.01	0.995796		1.81	
	III	3.98	1.79	2.19	0.995796		1.81	
CB 7.5%	I	3.26	1.46	1.80	0.996089	T = 28.5 ⁰ C	1.80	1.80
	II	3.13	1.40	1.73	0.996089		1.80	
	III	3.58	1.60	1.97	0.996089		1.81	
CB 10%	I	4.36	1.98	2.38	0.996089	T = 28.5 ⁰ C	1.82	1.82
	II	4.78	2.18	2.60	0.996089		1.83	
	III	4.63	2.11	2.53	0.996089		1.82	

Lampiran 9 Hasil Pengujian Porositas

		D (gr)	S (gr)	Sw (gr)	Sw-D (gr)	D-S (gr)	Porositas (%)	Porositas rata2 (%)
CB 0%	I	2.90	1.30	2.91	0.01	1.60	0.57	0.58
	III	3.26	1.47	3.27	0.01	1.80	0.58	
	V	2.96	1.33	2.97	0.01	1.63	0.58	
CB 2.5%	I	4.00	1.81	4.01	0.01	2.20	0.39	0.39
	II	4.56	2.06	4.57	0.01	2.50	0.40	
	IV	4.37	1.99	4.38	0.01	2.38	0.39	
CB 5%	III	3.81	1.73	3.83	0.02	2.09	0.83	0.77
	IV	3.60	1.63	3.62	0.02	1.97	0.77	
	V	3.93	1.78	3.95	0.02	2.15	0.70	
CB 7.5%	I	3.22	1.46	3.22	0.01	1.76	0.35	0.42
	IV	3.09	1.40	3.10	0.01	1.69	0.43	
	V	3.54	1.61	3.54	0.01	1.93	0.47	
CB 10%	I	4.32	1.99	4.33	0.01	2.33	0.52	0.51
	III	4.73	2.17	4.74	0.01	2.56	0.55	
	V	4.60	2.12	4.61	0.01	2.48	0.47	

Lampiran 10 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik

	Epoxy (%)	CB (%)	Grafir EAF (%)	Resistivitas (Ωcm^{-1})	Konduktivitas (S _{cm})	Konduktivitas Rata2 (S _{cm})
I	20	0.0	80.0	17.41	0.06	0.05
II	20	0.0	80.0	18.48	0.05	
III	20	0.0	80.0	18.58	0.05	
I	20	2.5	77.5	9.22	0.11	0.10
II	20	2.5	77.5	10.84	0.09	
III	20	2.5	77.5	10.99	0.09	
I	20	5.0	75.0	3.10	0.32	0.26
II	20	5.0	75.0	4.12	0.24	
III	20	5.0	75.0	4.47	0.22	
I	20	7.5	72.5	4.88	0.20	0.19
II	20	7.5	72.5	5.21	0.19	
III	20	7.5	72.5	5.78	0.17	
I	20	10	70.0	3.56	0.28	0.22
II	20	10	70.0	5.02	0.20	
III	20	10	70.0	5.14	0.19	

Lampiran 11 Hasil Pengujian Fleksural

		b (mm)	d (mm)	L (mm)	P (N)	σ_f (MPa)	σ_f rata2 (MPa)
CB 0%	I	13.10	4.00	64	38.40	17.59	17.06
	II	12.90	4.60	64	48.00	16.88	
	III	12.60	4.60	64	46.40	16.71	
CB 2.5%	I	13.25	4.40	64	41.60	15.57	15.95
	II	13.50	4.55	64	46.40	15.94	
	III	13.60	3.90	64	35.20	16.34	
CB 5%	I	13.80	3.50	64	30.40	17.26	16.75
	II	13.60	4.15	64	35.20	14.43	
	III	13.90	3.45	64	32.00	18.57	
CB 7.5%	I	13.50	4.45	64	35.20	12.64	12.46
	II	13.10	4.15	64	43.20	12.25	
	III	13.35	4.50	64	32.00	12.50	
CB 10%	I	13.70	4.70	64	44.80	14.21	13.79
	II	13.20	4.40	64	35.20	13.22	
	III	13.10	4.30	64	35.20	13.95	

Lampiran 12 Tabel Densitas Air

	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

