



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH VARIASI UKURAN PARTIKEL *CARBON BLACK*
5% PADA KARAKTER KOMPOSIT PELAT BIPOLAR PEMFC
BERMatriks GRAFIT EAF 53 MIKRON**

SKRIPSI

FAJAR ANGGA NUGRAHA

0706268461

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JANUARI 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH VARIASI UKURAN PARTIKEL *CARBON BLACK*
5% PADA KARAKTER KOMPOSIT PELAT BIPOLAR PEMFC
BERMATRIKS GRAFIT EAF 53 MIKRON**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

FAJAR ANGGA NUGRAHA

0706268461

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JANUARI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Fajar Angga Nugraha

NPM : 0706268461

Tanda Tangan :



Tanggal : 06 Januari 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Fajar Angga Nugraha
NPM : 0706268461
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Variasi Ukuran Partikel *Carbon Black* 5%
Pada Karakter Komposit Pelat Bipolar PEMFC
Bermatriks Grafit EAF 53 mikron

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

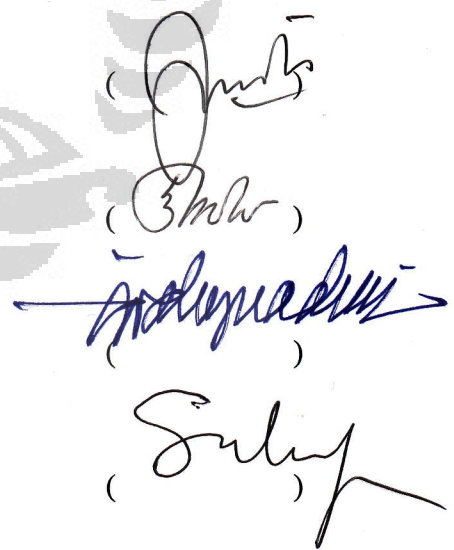
DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Ir. Yunita Sadeli, M.Sc.
Pembimbing 2 : Dr. Ir. Bambang Prihandoko, MT
Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi, DEA

Penguji 2 : Dr. Ir. Sutopo M.Sc

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 06 Januari 2011



(*[Signature]*)
(*[Signature]*)
(*[Signature]*)
(*[Signature]*)

KATA PENGANTAR

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

1. Ir. Yunita Sadeli, M.Sc selaku dosen pembimbing dari Departemen Metalurgi dan Material yang telah rela meluangkan waktu, tenaga, pikiran serta bantuan lain baik dorongan moril maupun materil.
2. Bpk. Dr. Ir. Bambang Prihandoko, MT sebagai pembimbing dari Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang banyak membantu dan membimbing dalam penelitian ini.
3. Pak Hendra dan Pak Subhan dari Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang telah membantu serangkaian pengujian untuk keperluan skripsi ini.
4. Mama dan Papa yang selalu mendoakan dan memberi semangat meskipun tinggal jauh di kampung halaman serta Kak Anggun dan Dedek Nadia yang juga memotivasi untuk menyelesaikan skripsi ini hingga selesai. *My love for them will never die.*
5. Emillia Rahmariza yang selalu setia menemani dan memberi semangat dengan penuh kasih sayang untuk menyelesaikan skripsi. *You make my world so colourful.*
6. Christine Samosir, Dinda Putri, Henny Indrawati, Mutakin, Sukiman, dan Sutan selaku satu kelompok penelitian pelat bipolar PEMFC.
7. Andre, Ojik, Anggi, Dito, Roni, dan semua penghuni wisma kemuning “dekat laundry” yang telah memberikan inspirasi baik untuk menyelesaikan skripsi, referensi film, taktik bermain FM, dan ketaatan

beribadah sehingga memberikan iklim yang kondusif bagi saya untuk belajar dan mengisi waktu luang.

8. Bang Mamat, Pak Udin, dan semua karyawan Departemen Metalurgi dan Material yang telah membantu saya selama penelitian .
9. Teman-teman metalurgi angkatan 2007 yang selalu memberi semangat serta masukan, semoga mereka yang sedang melakukan penelitian diberi kemudahan. Solid, tanggung jawab, cinta jurusan (STC).
10. Pihak-pihak lain yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Saya menyadari bahwa skripsi ini bukanlah tulisan yang sempurna , sehingga diharapkan kritik dan saran yang membangun agar bisa menjadi lebih baik kedepannya. Akhir kata semoga apa yang sudah diberikan dan dihasilkan dari skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan di Indonesia.

Depok, 06 Januari 2011

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Fajar Angga Nugraha
NPM : 0706268461
Program Studi : Metalurgi & Material
Departemen : Metalurgi & Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 06 januari 2011

Yang menyatakan



(Fajar Angga Nugraha)

ABSTRAK

Nama : Fajar Angga Nugraha
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Variasi Ukuran Partikel *Carbon Black* 5% pada Karakter Komposit Pelat Bipolar PEMFC Bermatriks Grafit EAF 53 Mikron

Pelat bipolar memiliki berat 60-80% dari berat total sel tunam dan berfungsi sebagai penghantar elektron serta menopang komponen sel tunam lainnya sehingga pelat bipolar diharapkan mempunyai konduktivitas dan sifat mekanis yang baik. Pelat bipolar dibuat dengan mencampurkan limbah grafit *electric arc furnace* (EAF), *carbon black*, dan resin epoksi sehingga tercipta suatu pelat dari karbon-karbon komposit. Grafit bertindak sebagai matriks sedangkan *carbon black* sebagai *filler* dan resin epoksi berfungsi sebagai *binder*.

Grafit yang digunakan mempunyai ukuran partikel 53 μm , sedangkan untuk *carbon black* digunakan kombinasi antara ukuran partikel 44 μm dan 37 μm dengan perbandingan 100:0; 90:10; 80:20; 70:30. Pelat bipolar dicetak dengan metode *compression moulding* pada tekanan 450 kg/cm^2 dan temperatur 70 $^{\circ}\text{C}$ selama empat jam.

Penambahan *carbon black* 37 μm ke dalam campuran *carbon black* 44 μm dan grafit 53 μm terbukti mampu meningkatkan konduktivitas dan menurunkan porositas. Konduktivitas paling tinggi terdapat pada pelat bipolar dengan penambahan *carbon black* 37 μm 30% sebesar $15,7 \times 10^{-4}$ S/cm dan porositas paling rendah terdapat pada pelat bipolar dengan penambahan *carbon black* 37 μm 20% yang menghasilkan porositas sebesar 0.71%. Namun untuk kekuatan fleksural, semakin banyak penambahan *carbon black* 37 μm kekuatan fleksural semakin menurun. Kekuatan fleksural optimum terdapat pada *carbon black* 37 μm 0% dengan kekuatan sebesar 20,85 MPa. Penambahan *carbon black* 37 μm 30% meningkatkan densitas pelat hingga 1.73 g/cm^3 .

Kata Kunci: sel tunam, karbon-karbon komposit, pelat bipolar, *carbon black* konduktivitas, fleksural, densitas, porositas

ABSTRACT

Nama : Fajar Angga Nugraha
Program Studi : Metallurgy and Materials Engineering
Judul : Effect of particle size variation 5% carbon black for bipolar plate characterization with 53 micron EAF graphite matrix

The weight of bipolar plate has 60-80% of total fuel cell stack weight and also as the support of all the component in fuel stack, with the reason of that bipolar plate should has good conductivity dan better mechanical properties.

Bipolar plate is made from the mixture of graphite, carbon black, and epoxy resin. The mixture is called carbon-carbon composite. The matrix is the graphite, carbon black as the reinforcement and resin epoxy as a binder. The size of graphite is 53 μm and carbon black are the combination of 44 μm and 37 μm particle size with the comparison 100:0; 90:10; 80:20; 70:30. Bipolar plate is made with compression moulding method, the pressure is 450 Kg/cm^2 and 70⁰C temperature for four hours.

The increasing of 37 μm carbon black in the combination of 44 μm carbon black and 53 μm graphite can increase the conductivity and reduce porosity. The sampel with 30% carbon black 37 μ has highest conductivity ($15,7 \times 10^{-4} \text{ S}/\text{cm}$) and the best porosity (0.71%) is sampel with 20% increasing of 37 μm carbon black. But the flexural strength decrease with the increase 37 μ carbon black and cannot reach the DOE standard. The increase of 37 μm carbon black also raise the density of sample until 1,73 g/cm^3 with increasing 30% of 37 μm carbon black.

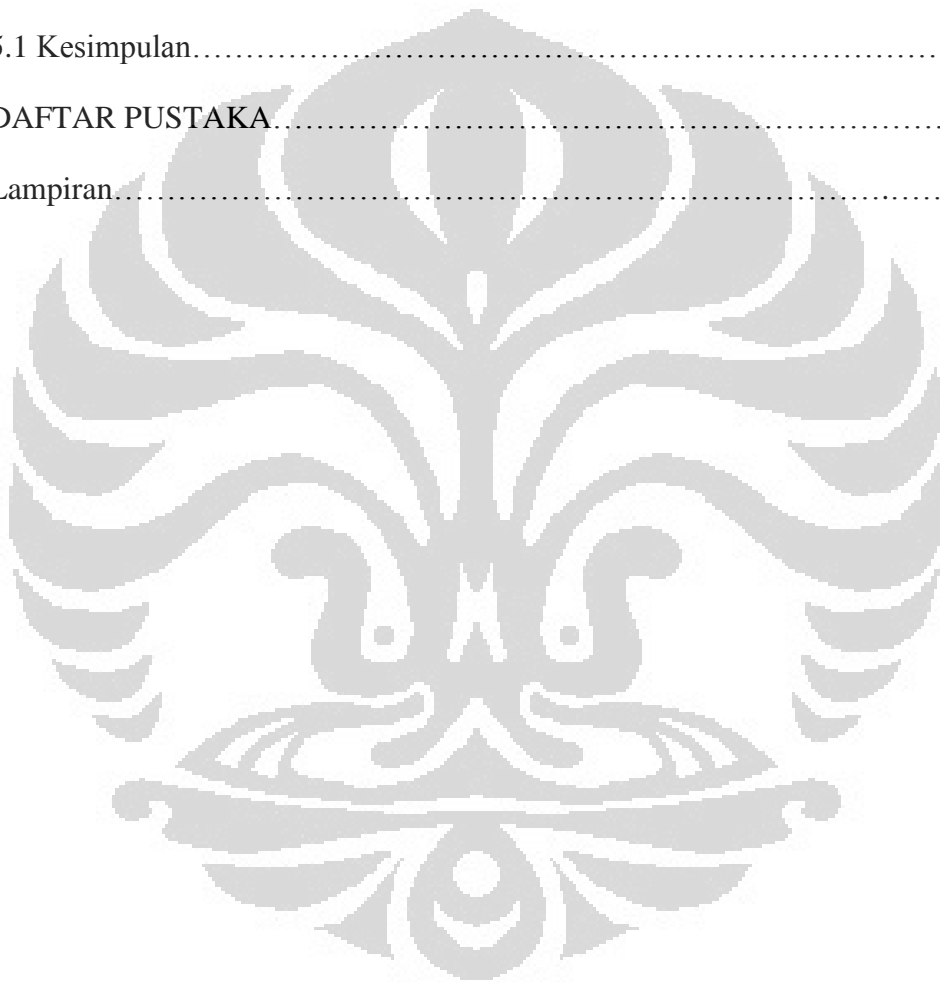
Keywords: Fuel Cell, carbon-carbon composite, bipolar plates, carbon black, electrical conductivity, flexural strength, density,porosity.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TEORI PENUNJANG.....	6
2.1 Sel Tunam.....	6
2.2 Jenis Sel Tunam.....	7
2.3 PEMFC.....	8
2.4 Pelat Bipolar.....	10
2.4.1 grafit.....	15

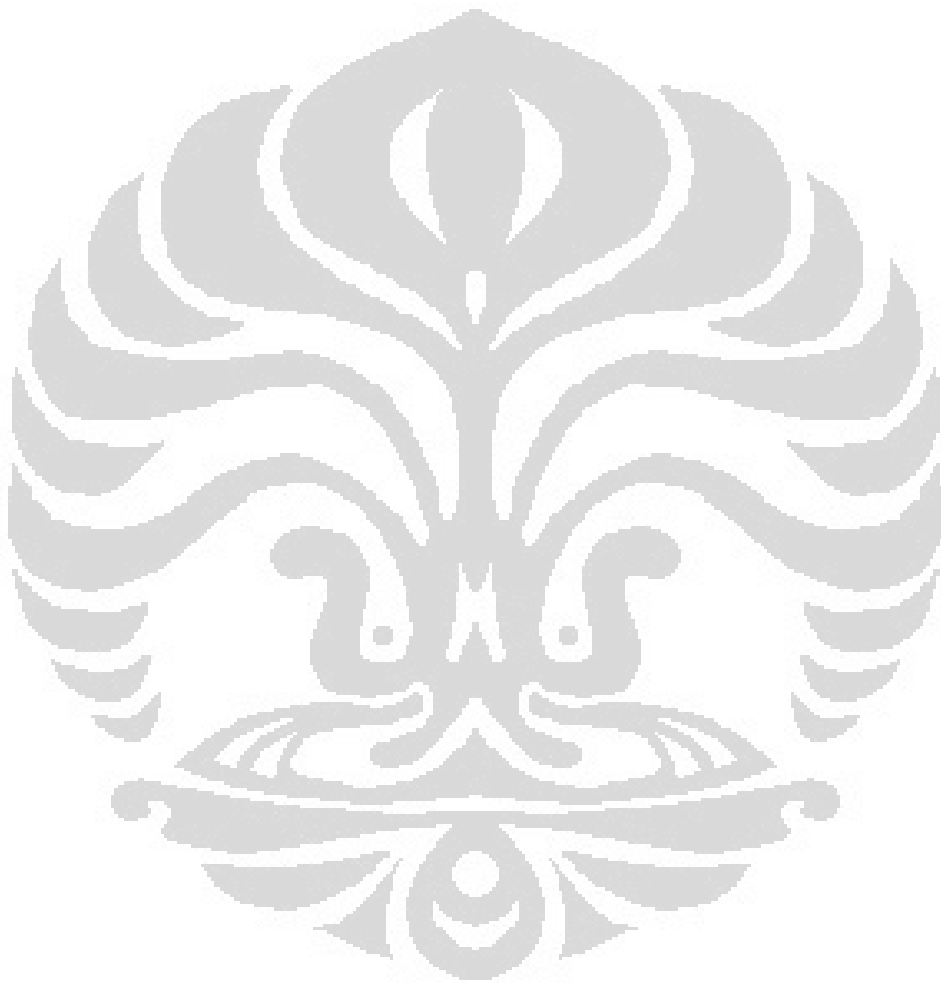
2.4.2 Carbon Black.....	19
2.4.3 Epoksi.....	21
2.5 Komposit.....	23
2.5.1 Karbon-Karbon Komposit.....	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	31
3.2 Alat dan Bahan.....	32
3.2.1 Grafit Limbah EAF.....	33
3.2.2 <i>Carbon Black</i>	34
3.2.3 Resin Epoksi.....	34
3.2.4 Metanol.....	35
3.3 Proses Pembuatan Pelat.....	36
3.3.1 <i>Crushing</i> dan <i>Milling</i> Grafit.....	36
3.3.2 <i>Sieving</i>	36
3.3.3 <i>Mixing</i>	37
3.3.4 Pencetakan Pelat.....	37
3.3.5 Pembuatan Spesimen Uji.....	38
3.4 Karakterisasi Pembuatan Pelat Bipolar.....	38
3.4.1 Pengujian Konduktivitas.....	38
3.4.2 Pengujian Densitas.....	40
3.4.3 Pengujian Porositas.....	41
3.4.4 Pengujian Fleksural.....	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1 Pengamatan Visual Pelat Bipolar Hasil Pencetakan.....	45
4.2 Karkterisasi Pelat Bipolar.....	47

4.2.1 Pengujian Densitas.....	47
4.2.2 Pengujian Porositas.....	50
4.2.3 Pengujian Konduktivitas.....	52
4.2.4 Pengujian Fleksural.....	54
4.3 Perbandingan Sifat Pelat Bipolar	56
BAB V KESIMPULAN.....	58
5.1 Kesimpulan.....	58
DAFTAR PUSTAKA.....	60
Lampiran.....	63



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Operasi dasar Sel Bahan Bakar.....	7
Gambar 2.2	Prinsip kerja PEMFC.....	10
Gambar 2.3	Material Pelat Bipolar Pada Umumnya.....	11
Gambar 2.4	Proses pembuatan pelat bipolar berdasarkan jenis materialnya.....	15
Gambar 2.5	Struktur kristal Grafit	16
Gambar 2.6	Proses Peleburan Besi dan Baja.....	17
Gambar 2.7	Struktur Carbon Black.....	19
Gambar 2.8	Struktur reaksi <i>Curing</i> resin epoxy dengan hardener.....	22
Gambar 2.9	Parameter dari Fasa Terdispersi	25
Gambar 2.10	Hasil <i>wettability</i> komposit dengan <i>contact angle</i>	26
Gambar 2.10	Ikatan Antarmuka	27
Gambar 2.12	Ikatan Interfasa	28
Gambar 2.13	Perbandingan beberapa material kekuatan tinggi	29
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	30
Gambar 3.2	Skema mesin <i>four probe test</i>	39
Gambar 3.3	Mesin Veeco FPP 5000 - <i>four point probe test</i>	39
Gambar 3.4	Penimbangan sampel di udara (kiri) dan di air (kanan).....	41
Gambar 3.5	Sampel direbus pada 100°C.....	42
Gambar 3.6	Skema pengujian fleksural.....	43
Gambar 3.7	Proses Uji Fleksural.....	44
Gambar 4.1	Penampakan sampel setelah pencetakan 1 (100% 44 μ m), 3 (80% CB 44 μ m;20% CB 37 μ m, 4 (70% CB 44 μ m; 30% CB 37 μ m)	45
Gambar 4.2	Proses pencetakan sampel	47
Gambar 4.3	Grafik Hasil Pengujian Densitas.....	48
Gambar 4.4	Grafik Hasil Pengujian Porositas.....	50
Gambar 4.5	Grafik Hasil Pengujian Konduktivitas.....	53

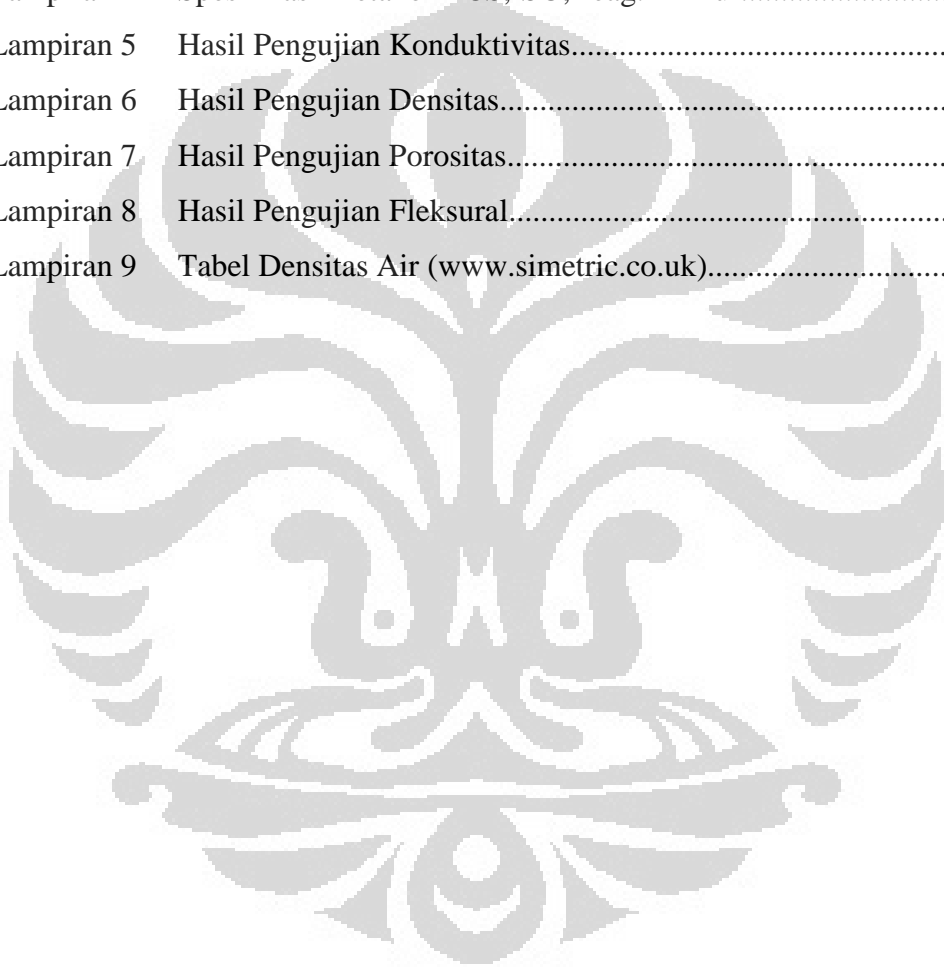


DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Jenis-Jenis Sel Tunam	8
Tabel 2.2	Target DOE Untuk Pelat Bipolar.....	12
Tabel 2.3	Sifat-sifat umum dari Grafit	18
Tabel 2.4	Pengaruh besar partikel terhadap sifat mekanis grafit.....	18
Tabel 2.5	Pengaruh bentuk partikel terhadap sifat mekanis grafit	19
Tabel 3.1	Komposisi dan pengkodean formulasi sampel.....	33
Tabel 3.2	Spesifikasi Grafit EAF.....	34
Tabel 3.3	Spesifikasi Resin Epoksi.....	35
Tabel 3.4	Spesifikasi <i>hardener</i>	35
Tabel 3.5	Spesifikasi metanol.....	36
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Densitas.....	48
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Porositas.....	50
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Konduktivitas.....	52
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Fleksural.....	54
Tabel 4.5	Perbandingan Sifat Bipolar.....	56

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Spesifikasi Epoxy resin.....	63
Lampiran 2	Spesifikasi Hardener Eposchon	64
Lampiran 3	Spesifikasi Grafit EAF.....	65
Lampiran 4	Spesifikasi Metanol ACS,ISO,Reag. Ph Eur.....	67
Lampiran 5	Hasil Pengujian Konduktivitas.....	68
Lampiran 6	Hasil Pengujian Densitas.....	69
Lampiran 7	Hasil Pengujian Porositas.....	70
Lampiran 8	Hasil Pengujian Fleksural.....	71
Lampiran 9	Tabel Densitas Air (www.simetric.co.uk).....	72



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keberadaan energi alternatif sangat diperlukan untuk mengantisipasi semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil. Seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dunia dan berimbas kepada meningkatnya permintaan akan bahan bakar maka beberapa negara gencar melakukan penelitian untuk menggantikan bahan bakar fosil. Namun masalah terus berdatangan seperti biaya yang cukup tinggi hingga performa bahan bakar yang masih belum bisa menyamai bahan bakar konvensional.

Sel tunam adalah salah satu bahan bakar alternatif yang saat ini masih dalam pengembangan di seluruh dunia dan diharapkan menjadi sumber energi yang dapat digunakan di masa depan. Sel tunam juga sumber energi yang ramah lingkungan sehingga menjadi salah satu solusi untuk peristiwa pemanasan global belakangan ini. Sistem kerja sel tunam membutuhkan hidrogen sebagai sumber energi yang akan menghasilkan energi listrik dan panas serta pembuangan yang menghasilkan air sehingga dapat dikatakan sangat ramah lingkungan. Sel tunam menggunakan reaksi kimia, lebih baik daripada mesin pembakaran, untuk memproduksi energi listrik. Proses yang terjadi di dalam sel tunam merupakan kebalikan dari elektrolisis. Pada elektrolisis, arus listrik digunakan untuk menguraikan air menjadi hidrogen dan oksigen.

Sel tunam dapat dikategorikan menjadi 6 jenis, 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)^[1].

Polymer electrolyte membrane fuel cell atau PEMFC awalnya dikembangkan perusahaan Amerika, *General Electric* (GE), dengan polimer membran sebagai elektrolitnya. PEMFC yang ditemukan oleh GE mampu menghasilkan sekitar 1 KW, dan memiliki keunggulan pada desain, lebih *compact*, bila dibandingkan sel tunam yang ditemukan oleh F.Bacon^[2], penemu sel tunam. Pengembangan sel tunam tipe

PEMFC saat ini adalah menggunakan material dengan bahan membran polimer, katalis elektroda dan pelat bipolar grafit.

Bagian paling penting dalam PEMFC adalah pelat bipolar yang berfungsi sebagai pemisah gas-gas yang terdapat di dalam sel, mengalirkan arus listrik, dan juga berperan sebagai penyokong struktur dari sel. Pentingnya pelat bipolar dalam sistem kerja PEMFC ini menyebabkan tidak semua material dapat dijadikan sebagai pelat tersebut. Pelat bipolar diharuskan mempunyai permeabilitas yang baik, kekuatan yang baik, memiliki berat dan volum yang rendah (pelat bipolar penyumbang berat terbesar, yaitu 60-80% dari berat total sel tunam), dan memiliki ketahanan pada temperatur sekitar 80⁰C. Material untuk bipolar ini juga diharapkan bebas dari korosi karena pelat ini bekerja pada lingkungan yang asam (PH 2-3)^[3]. Material untuk pelat bipolar harus memiliki konduktivitas yang tinggi karena fungsi pelat sebagai pengalir arus listrik.

Pada awal dikembangkannya PEMFC, material yang digunakan sebagai pelat bipolar adalah grafit dan *stainless steel*^[4]. Namun material tersebut mempunyai banyak kelemahan seperti grafit yang bersifat getas, mempunyai volum dan berat yang besar, dan biaya pembuatan yang mahal. *Stainless steel* mungkin merupakan logam yang tahan korosi dan cukup ringan, namun biaya produksi pelat akan meningkat jika menggunakan material ini padahal sel tunam diharapkan dapat digunakan oleh masyarakat luas di masa yang akan datang^[4]. Dengan alasan diatas maka saat ini dilakukan penelitian untuk menemukan pelat bipolar yang mempunyai sifat mekanis baik dan tidak memakan banyak biaya produksi serta ringan, hingga saat ini material yang diharapkan menjadi pengganti logam dan grafit adalah pelat yang terbuat dari komposit, khususnya karbon-karbon komposit. Karbon-karbon komposit memiliki banyak keunggulan yaitu ringan dan tidak semahal biaya produksi menggunakan logam. Namun dibalik keunggulan yang dimiliki karbon-karbon komposit dalam aplikasinya sebagai pelat bipolar, terdapat juga beberapa kekurangan yang dimilikinya, antara lain kesulitan material komposit dalam memenuhi target resistansi, ketebalan dari pelat, serta sifat mekanis. Kombinasi yang optimum antara matriks, penguat maupun filler sangat diperlukan dalam pembentukan pelat bipolar

karbon-karbon komposit, hal tersebut dilakukan untuk memenuhi target nilai konduktivitas listrik dan sifat mekanis yang diinginkan sehingga mampu memberikan kinerja yang baik dalam aplikasinya.

2.1 PERUMUSAN MASALAH

Dalam penelitian ini, akan dikembangkan pelat bipolar dengan menggunakan material komposit berbasis karbon-karbon komposit. Matriks yang digunakan adalah grafit limbah hasil pengolahan baja EAF. Grafit memiliki kelebihan yaitu konduktivitas yang cukup baik dan mempunyai sifat keras.

Namun grafit juga memiliki kelemahan yaitu sifat mekanis yang tidak begitu baik akibat kegetasannya dan proses pembuatan yang mahal. Penambahan *filler carbon black* diharapkan dapat meningkatkan konduktivitas komposit dengan meningkatkan *interface* grafit.

Konduktivitas pelat juga dipengaruhi beberapa faktor lain seperti distribusi besar partikel grafit dan *carbon black*. Proses pencampuran bahan-bahan seperti grafit, *carbon black*, dan resin epoksi dapat menimbulkan *void* atau *porous* yang akan mempengaruhi sifat mekanis dan konduktivitas pelat bipolar. Variasi besar partikel *carbon black* yang berukuran lebih kecil dibandingkan dengan grafit diharapkan mampu mengisi *void* atau *porous* yang terbentuk pada saat pencetakan. Semakin merata pendistribusian besar dan semakin kecilnya permeabilitas pelat akan meningkatkan kinerja pelat bipolar dan sel tunam secara keseluruhan^[2].

Salah satu tujuan penelitian ini adalah membuktikan pengaruh besar partikel dan distribusi partikel *carbon black* terhadap sifat mekanis dan konduktivitas pelat bipolar. Permeabilitas yang rendah akan meningkatkan kinerja sel tunam karena akan menghasilkan reaksi antarmuka (*interface*) yang baik antara grafit, *carbon black* dan resin epoksi sehingga dapat meningkatkan konduktivitas pelat. Oleh karena itu diperlukan distribusi besar partikel yang optimum agar tercapai suatu pelat bipolar yang memiliki sifat mekanis dan konduktivitas baik.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian pelat bipolar untuk PEMFC ini adalah:

- a. Mengetahui efek variasi besar butir *carbon black* terhadap sifat mekanis komposit pelat bipolar.
- b. Mengetahui efek dan sifat yang dihasilkan dari optimalisasi *carbon black* 5% terhadap pelat bipolar karbon-karbon komposit.
- c. Mengetahui efek besar butir grafit limbah EAF 53 μm terhadap konduktivitas komposit pelat bipolar dengan penambahan *carbon black*.
- d. Mengetahui komposisi campuran antar grafit, *carbon black*, dan resin epoksi yang optimal terhadap sifat pelat bipolar.

1.4 RUANG LINGKUP PENELITIAN

Sel tunam dengan tipe *polymer electrolyte membrane* (PEMFC) pada penelitian ini menggunakan karbon-karbon komposit untuk pelat bipolarnya. Pelat bipolar karbon-karbon komposit terdiri dari grafit yang berasal dari limbah pengolahan baja EAF sebagai matriksnya sedangkan sebagai *filler* digunakan *carbon black* yang berasal dari serabut kelapa. Komposit ini juga menggunakan tambahan lain berupa *binder* atau pengikat untuk menunjang sifat mekanisnya seperti resin epoksi dan bahan lain seperti metanol. Untuk menghasilkan pelat bipolar tersebut maka dilakukan beberapa tahapan pembuatan pelat yaitu:

1. Pencampuran antara grafit, *carbon black*, dan resin epoksi beserta *hardener*.
2. Proses pencetakan campuran yang sudah membentuk bakalan.
3. Proses karakterisasi untuk mendapatkan data-data yang diperlukan dari pelat bipolar.

Grafit pada penelitian ini akan digunakan pada ukuran partikel 53 μm , sedangkan untuk *carbon black* adalah kombinasi antara besar partikel 44 μm dan 37 μm . Semua bahan akan dicampur dengan komposisi sebagai berikut:

1. 80% dari berat total, kombinasi antara grafit (95%) dan *carbon black* (5%)
2. 20% dari berat total untuk resin epoksi dan *hardener*

Hasil dari proses pencampuran pada matriks, penguat dan bahan tambahan tersebut diberikan penekanan pada temperatur 70°C dan tekanan sebesar 450 Kg/cm^2 dengan menggunakan mesin *hot press* selama empat jam. Besar butir dari *carbon black* akan divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sifat mekanis dan konduktivitas listrik pelat bipolar. Kombinasi antara *carbon black* dengan besar partikel $44\ \mu\text{m}$ dan $37\ \mu\text{m}$ akan dilakukan dengan perbandingan 100:0; 90:10; 80:20; 70:30. Untuk mengetahui pengaruhnya terhadap performa dari pelat bipolar maka dilakukan empat pengujian yaitu pengujian densitas (ASTM D792), porositas (ASTM C20), konduktivitas (ASTM B193), dan fleksural (ASTM D790).

1.5 Sistematika Penulisan

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

BAB 1 : PENDAHULUAN

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

BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA

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

BAB 3 : METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi prosedur penelitian, daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

BAB 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi data-data hasil penelitian dan analisa dari hasil penelitian tersebut yang dibandingkan dengan hasil dari studi literatur

BAB 5 : PENUTUP

Bab ini berisikan kesimpulan akhir berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian ini

BAB 2

TEORI PENUNJANG

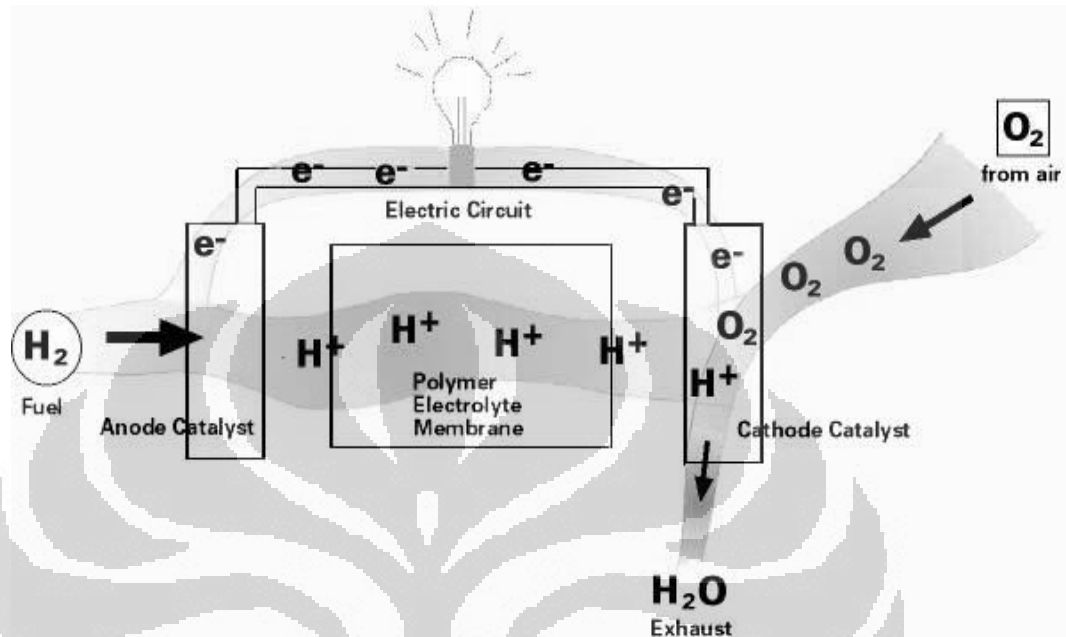
2.1 Sel Tunam

Sel tunam merupakan suatu perangkat yang dapat mengkonversi hidrogen secara langsung dan efisien menjadi energi listrik. Proses konversi ini menghasilkan hasil sampingan berupa air (H_2O) sehingga terbukti ramah lingkungan. Teknologi dasar kerja sel tunam adalah reaksi antara hidrogen dan oksigen ($2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$). Struktur fisik dasarnya terdiri atas lapisan elektrolit yang salah satu sisinya merupakan daerah kontak anoda berpori dengan katoda berpori pada sisi lainnya. Sel tunam dibagi atas beberapa kategori berdasarkan kombinasi tipe bahan bakar dan oksidan, tipe elektrolit yang digunakan, temperatur operasi, dan lain-lain.

Sel tunam mengkonversi oksigen dan hidrogen menjadi energi listrik dimana oksigen yang berupa gas didapat dari udara sedangkan gas hidrogen berasal dari reaksi reformer dari hidrokarbon. Karakter dari gas hidrogen yang mempunyai molekul kecil dan mudah terbakar menyebabkan sulitnya dilakukan penyimpanan dan transport gas tersebut. Usaha memperoleh hidrogen dengan mudah sedang diusahakan dengan berbagai cara misalnya memperkecil reaktor reformer dengan bahan baku *liquid petroleum gas* (LPG) atau gas metana, menguraikan metanol yang dibuat dari proses pabrikasi 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 CO_2 dan air ^[5].

Prinsip kerja pada sel tunam adalah gas hidrogen disuplai ke anoda (kutub negatif) dimana pada sisi lain yaitu pada katoda (kutub positif) terdapat gas oksigen. Hidrogen dipecah menjadi elektron dan proton (H^+) melalui sebuah reaksi kimia. Proton ini akan bergerak menuju katoda melewati membran sedangkan elektron yang terbentuk akan menghasilkan arus listrik kalau dihubungkan dengan penghantar listrik menuju katoda. Oksigen pada katoda akan beraksi dengan empat electron dan ion H^+ hasil dari reaksi hidrogen pada anoda sehingga akan membentuk air seperti

yang ditunjukkan reaksi berikut : $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$. secara umum prinsip kerja sel tunam dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Sumber : *Introduction to Fuel Cell Technology*

Gambar 2.1. Operasi dasar sel Bahan Bakar.^[2]

2.2 Jenis Sel Tunam

Sel tunam dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis berdasarkan kombinasi tipe bahan bakar dan oksidan, tipe elektrolit yang digunakan, temperatur operasi, dan lain-lain. Secara umum saat ini terdapat enam jenis sel tunam diantaranya 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)* yang dapat dijelaskan pada tabel 2.1 berikut ini:

Tabel 2.1 Jenis Sel Tunam^[1]

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	Hydrated Polymeric Ion Exchange Membranes	Mobilized or Immobilized Potassium Hydroxide in asbestos matrix	Immobilized Liquid Phosphoric Acid in SiC	Immobilized Liquid Molten Carbonate in LiAlO ₂	Perovskites (Ceramics)
Electrodes	Carbon	Transition metals	Carbon	Nickel and Nickel Oxide	Perovskite and perovskite / metal cermet
Catalyst	Platinum	Platinum	Platinum	Electrode material	Electrode material
Interconnect	Carbon or metal	Metal	Graphite	Stainless steel or Nickel	Nickel, ceramic, or steel
Operating Temperature	40 – 80 °C	65°C – 220 °C	205 °C	650 °C	600-1000 °C
Charge Carrier	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ⁼
External Reformer for hydrocarbon fuels	Yes	Yes	Yes	No, for some fuels	No, for some fuels and cell designs
External shift conversion of CO to hydrogen	Yes, plus purification to remove trace CO	Yes, plus purification to remove CO and CO ₂	Yes	No	No
Prime Cell Components	Carbon-based	Carbon-based	Graphite-based	Stainless-based	Ceramic
Product Water Management	Evaporative	Evaporative	Evaporative	Gaseous Product	Gaseous Product
Product Heat Management	Process Gas + Liquid Cooling Medium	Process Gas + Electrolyte Circulation	Process Gas + Liquid cooling medium or steam generation	Internal Reforming + Process Gas	Internal Reforming + Process Gas

2.3 Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)

Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) atau biasa disebut juga dengan *proton exchange membrane fuel cell* adalah salah satu jenis sel tunam yang mempunyai kelebihan dengan dapat bekerja pada temperatur rendah, ringan, dan

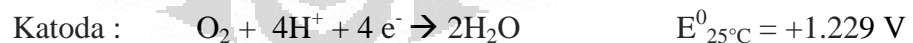
dapat dibuat dengan ukuran kecil sehingga dapat mengurangi biaya produksi. Membran pada PEMFC merupakan elektrolit untuk pertukaran ion. Membran ini berupa lapisan tipis padat yang berfungsi sebagai elektrolit pemisah katoda dan anoda kemudian secara selektif mengontrol transport proton dari anoda ke katoda dalam sel tunam dan dapat menghasilkan energi listrik. Membran ini disusun dalam jumlah yang besar dan dipisahkan oleh pelat bipolar untuk memenuhi kebutuhan daya.

PEMFC mempunyai berat dan volume yang kecil sehingga menguntungkan dibandingkan dengan sel tunam lainnya. PEMFC membutuhkan oksigen yang dihasilkan dari udara dan air untuk sistem operasi. Hidrogen dihasilkan dari penguraian metanol dalam reaksi kimia sehingga dapat menghasilkan gas hidrogen seperti reaksi berikut $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- + \text{CO}_2$

Pada PEMFC, hidrogen akan berpindah dari anoda secara difusi melalui bagian (*gas diffusion layer*) menuju lapisan katalisator dimana molekul hidrogen tersebut akan terurai menjadi elektron dan proton dengan reaksi elektrokimia setengah sel sebagai berikut :

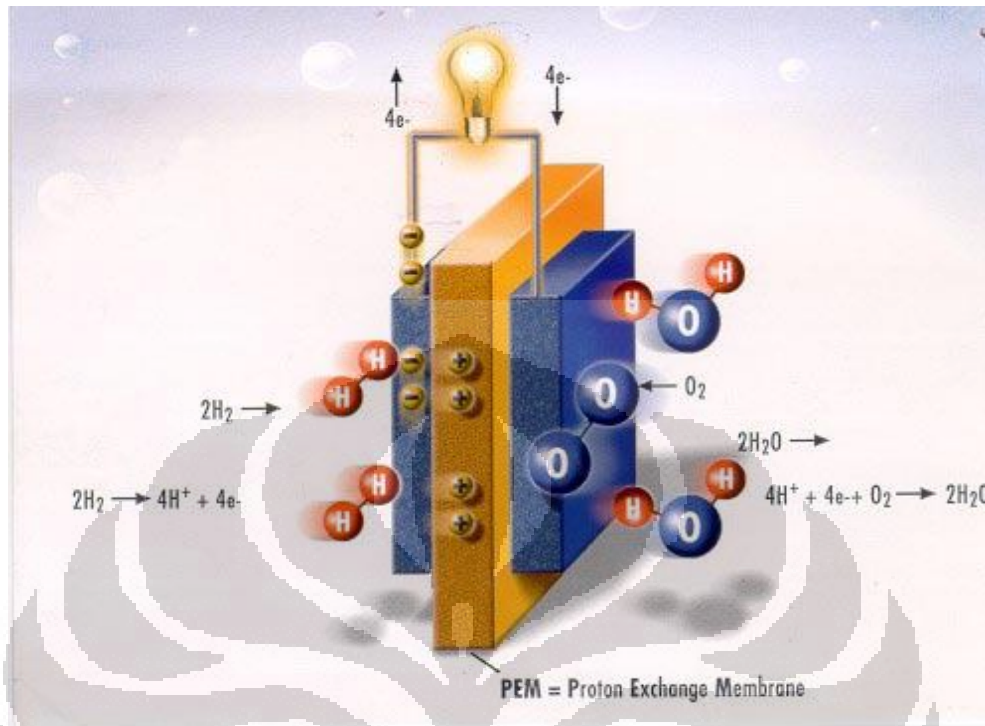


Proton dan elektron akan menuju katoda tetapi melalui *path* atau jalan yang berbeda. Proton akan berjalan melewati membran elektrolit menuju katoda dan elektron akan berjalan melalui sirkuit eksternal menuju katoda. Pada katoda, oksigen dari udara luar akan berdifusi melalui katoda *gas diffusion layer* menuju katoda katalis. Oksigen akan bereaksi dengan proton dan elektron hasil penguraian hidrogen pada anoda dan akan membentuk air (H_2O) kemudian pada saat yang bersamaan juga memproduksi panas seperti reaksi setengah sel berikut:



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





Gambar 2.2 Prinsip kerja PEMFC

PEM fuel cell bekerja pada temperatur yang relatif rendah, yaitu sekitar 80°C ^[1]. Rendahnya temperatur operasi ini menyebabkan rendahnya waktu pemanasan (*warm-up time*). Selain itu PEM memiliki kerapatan daya yang cukup tinggi karena sifat-sifat inilah maka PEM banyak digunakan sebagai sumber daya bagi alat-alat elektronik portable dan alat-alat transportasi.

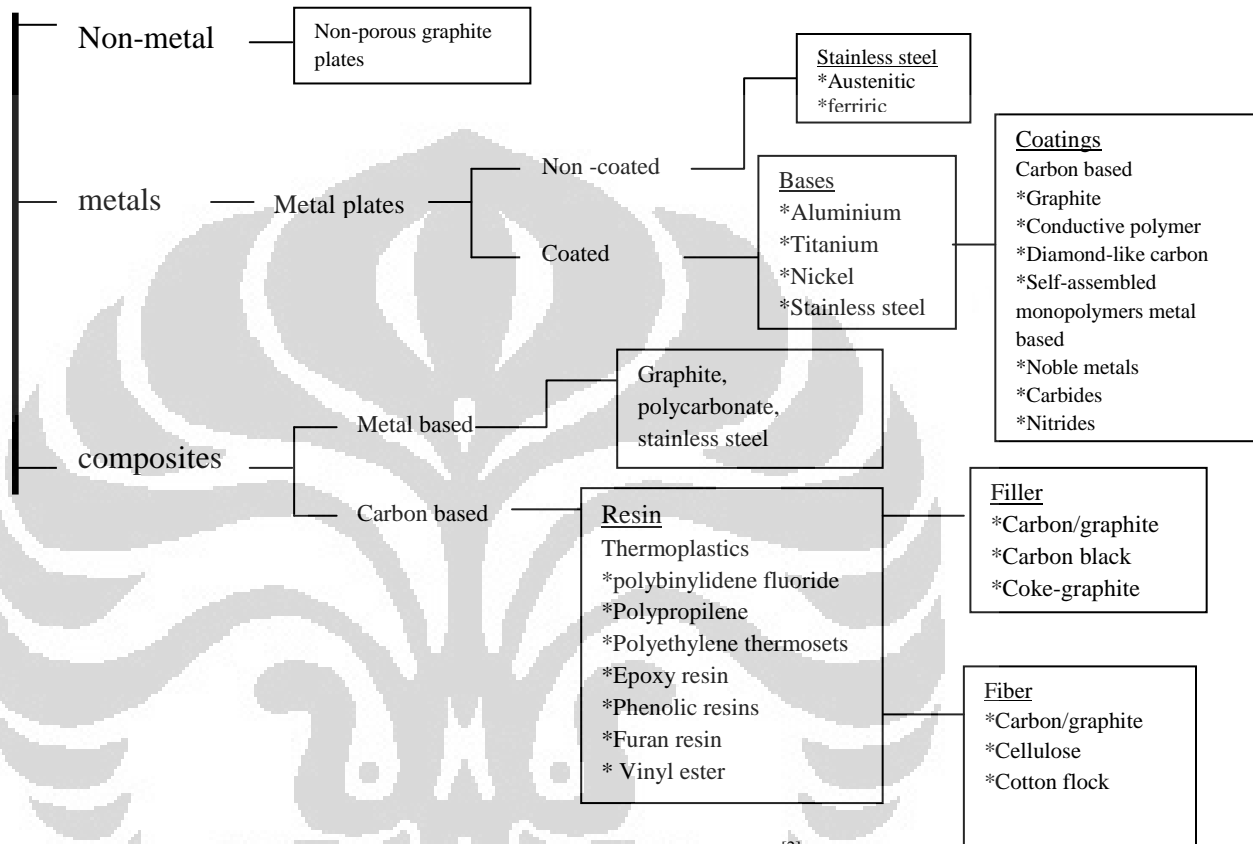
2.4 Pelat Bipolar

Pelat bipolar adalah komponen dalam rangkaian sel tunam yang mempunyai peranan sangat penting. Pelat bipolar ini digunakan sebagai penghubung elektrik antara dua elektroda dengan kutub yang berbeda. Pelat bipolar berfungsi untuk mendistribusikan gas ke membran, memindahkan air dari setiap sel, penghantar elektron dari anoda ke katoda, penghantar panas dari dan menuju elektroda mengalirkan produk akhir dalam bentuk air dari tiap sel, penghalang perpindahan gas antar sel, dan menjaga stabilitas struktur dari PEMFC itu sendiri. Pelat bipolar memiliki berat 60%-80% dari berat sel sehingga mempengaruhi harga produksinya

Universitas Indonesia

yang mencapai 30%-60% harga total ^[5]. Penelitian mengenai material yang digunakan untuk pelat yang secara umum diperlihatkan pada bagan berikut.

Bipolar Plates



Gambar 2.3. Material Pelat Bipolar Pada Umumnya ^[2]

Material yang digunakan untuk pelat bipolar mempunyai syarat memiliki permeabilitas yang baik, memiliki kekuatan yang baik, dapat diproses dengan mudah, memiliki berat dan volum yang rendah, dan memiliki ketahanan temperatur sekitar 800 °C, seperti terlihat pada tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2 Target DOE Untuk Pelat Bipolar.

Characteristic	Units	Status 2005 ^a	2010 Target	2015 Target
Cost ^b	\$/kW	10 ^c	5	3
Weight	kg/kW	0.36	<0.4	<0.4
H ₂ Permeation Flux @ 80 °C, 3 atm. (equivalent to <0.1 mA/cm ²)	cm ³ sec ⁻¹ cm ⁻²	< 2 x 10 ⁻⁶	< 2 x 10 ⁻⁶	< 2 x 10 ⁻⁶
Corrosion	µA/cm ²	<1 ^d	<1 ^d	<1 ^d
Electrical Conductivity	S/cm	>600	>100	>100
Resistivity ^e	Ohm cm ²	<0.02	0.01	0.01
Flexural Strength ^f	MPa	>34	>25	>25
Flexibility	% deflection at mid-span	1.5 to 3.5	3 to 5	3 to 5

Berdasarkan persyaratan tersebut maka pelat bipolar biasanya dibuat dari grafit atau berbagai macam jenis logam (titanium, *stainless steel*, dan nikel) atau dapat juga dibuat dari komposit untuk mengeliminasi beberapa kekurangan material konvensional sebelumnya. Pada permukaan pelat bipolar terdapat saluran-saluran yang dibuat sebagai jalur untuk gas reaktan (*gas flow channels*). Seperti pada skematik di atas, pelat bipolar dapat dibuat dengan beberapa macam bahan dasar diantaranya adalah non-logam, logam dan komposit. Berikut ini adalah bahan dasar penyusun pelat bipolar tersebut ^[3] :

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

Satu-satunya material non logam yang dapat dijadikan pelat bipolar adalah grafit, baik itu grafit alami maupun sintetis. Kedua material tersebut memiliki stabilitas kimia yang baik, konduktivitas yang tinggi, impregnasi terhadap polimer dan menghasilkan energi yang besar. Akan tetapi grafit pelat bipolar ini memiliki kekurangan yaitu pelat bipolar ini akan rapuh dan memiliki ketebalan yang tinggi, harganya masih mahal, Serta perlu adanya *machining* untuk membuat *gas flow channel*.

2. Logam

Logam merupakan suatu material yang cukup baik jika digunakan sebagai pelat bipolar. Hal itu dikarenakan logam memiliki nilai konduktivitas

yang sangat tinggi, tahan terhadap beban kejut dan getaran, beban dari permeabilitas, namun di sisi lain penggunaan *bipolar plate* pada temperatur 80°C dan dengan pH 2-3 dapat menyebabkan logam akan sangat mudah terkorosi, selain itu juga harga yang masih relatif mahal untuk pembuatan *gas flow channels*.

a) *Non-coated (base material)*

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

b) *Coated*

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

3. Komposit

Dua jenis pelat bipolar komposit yang telah dikembangkan, yaitu *metal base composite* dan *carbon base composite*. Pada *metal base* biasa dipadukan dengan penguat grafit, *polycarbonate*, serta *stainless steel*. Sedangkan pada *carbon base* biasa digunakan penguat berupa polimer baik itu *thermoplastic* seperti polypropylene, ataupun *polyethylene* dan *thermoset* seperti resin epoksi, phenolic resin, maupun vinil ester. Selain itu pada

carbon composite bipolar plate biasa ditambahkan *filler* maupun fiber guna meningkatkan sifat dari *bipolar plate* ini.

Komposit karbon merupakan terobosan baru dalam ilmu komposit dan sedang giat diteliti oleh banyak pihak. Hal itu dikarenakan komposit karbon memiliki prospek yang sangat baik untuk dikembangkan karena beberapa keunggulan yang dimilikinya, diantaranya ^[8]:

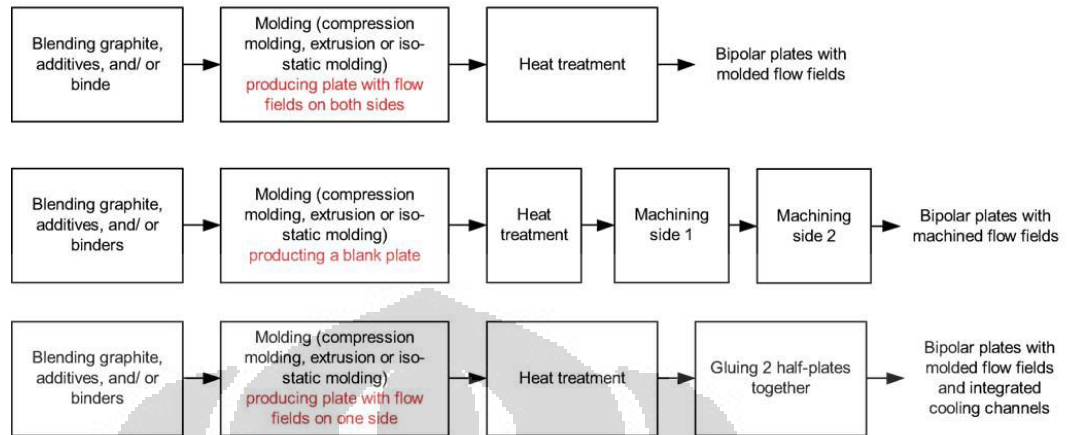
- a. Resistansi kontak permukaan yang sangat kecil
- b. Memiliki berat atau *density* yang lebih ringan
- c. Nilai konduktivitas yang sangat tinggi
- d. Memiliki kekuatan yang cukup baik dibanding dengan material kandidat lain selain logam
- e. *Gas impermeability* dan ketahanan korosi
- f. Proses relatif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

Proses pembuatan pelat juga berbeda-beda tergantung dari jenis materialnya. Untuk pelat bipolar yang terbentuk dari grafit dan karbon-karbon komposit pada proses awal selalu dilakukan proses pencampuran, proses pencampuran ini sangat penting dan harus merata agar semua bagian pelat mempunyai sifat yang sama. Setelah proses pencampuran dilakukan proses pencetakan. Baik itu untuk pelat dari grafit atau dari karbon-karbon komposit. Setelah proses pencetakan akan dilakukan proses *heat treatment* kepada pelat, hal ini berlaku pada pelat yang terbuat dari grafit.

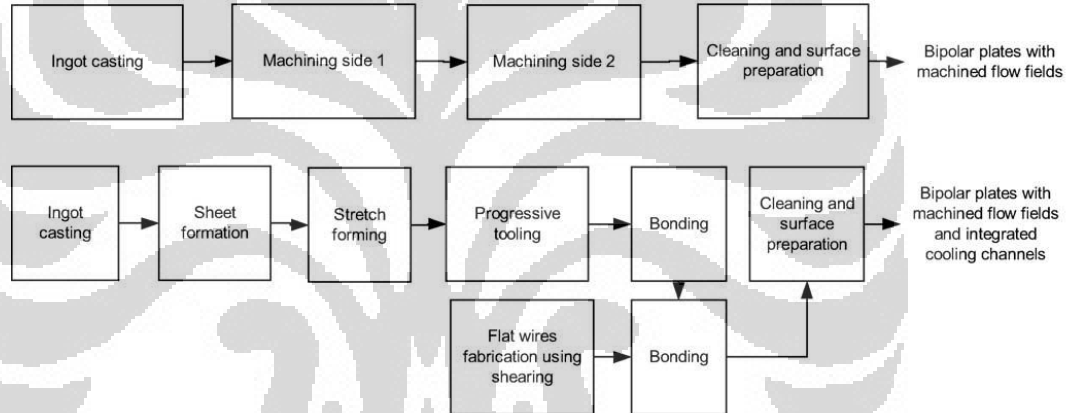
Sedangkan untuk pelat yang terbuat dari logam khususnya *stainless steel*, proses pembuatan pelat diawali oleh *ingot casting*. Setelah itu dapat dilakukan dua variasi pembuatan, baik itu secara *machining* atau secara *metal forming*. Semua proses pembuatan pelat bipolar ini mempunyai kelebihan dan kekurangannya masing-masing.

Di bawah ini adalah gambar 2.4, yaitu penjelasan proses pembuatan pelat bipolar berdasarkan jenis materialnya^[10] :

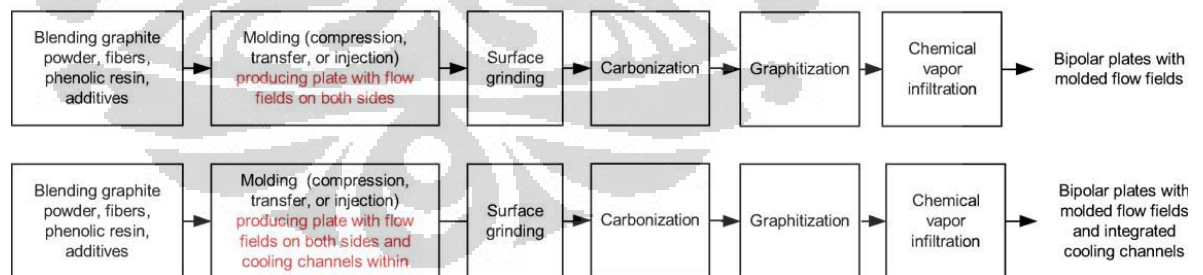
GRAPHITE PLATES



STAINLESS PLATES



CARBON COMPOSITE PLATES



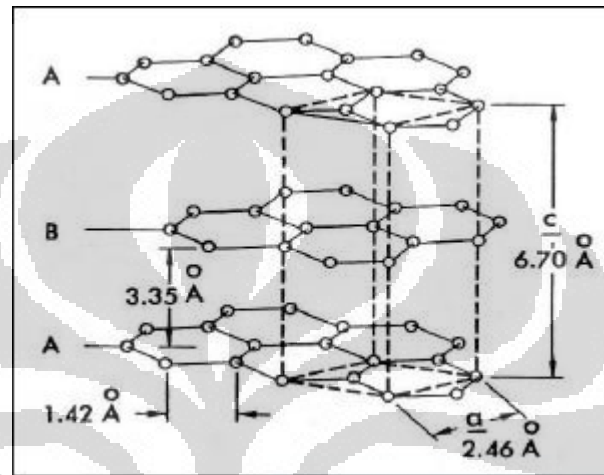
Sumber : *Bipolar Plates Considering Stack Manufacturing And Environment Impact*

Gambar2.4. Proses pembuatan pelat bipolar berdasarkan jenis materialnya ^[10]

2.4.1 Grafit

Grafit adalah salah satu bentuk alotrop dari karbon selain intan dan karbon amorf. Grafit memiliki struktur kristal *hexagonal* (gambar 2.5) yang tersusun atas

atom karbon yang terbentuk dari kisi planar dengan ikatan kovalen dan antar lapisannya memiliki ikatan *Van der Waals*. Grafit merupakan jenis karbon yang paling stabil pada kondisi standar ^[11]. Ikatan *Van der Waals* yang lemah memungkinkan tiap lapisan bergerak secara individual dan memberikan sifat pelumasan yang baik



Sumber : *Graphite structure, properties and manufacture*

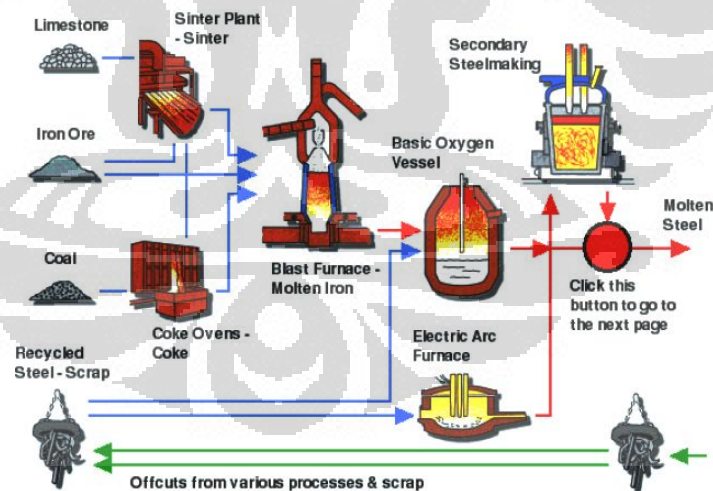
Gambar 2.5 Struktur kristal Grafit ^[12].

Penggunaan grafit pada umumnya adalah sebagai pelumas, bahan utama pada pensil, dan digunakan dalam aplikasi *fuel cell* ^[13]. Berikut ini adalah sifat-sifat fisis dari grafit ^[14]:

1. Memiliki titik leleh tinggi, sama seperti intan. Untuk melelehkan grafit, tidak hanya cukup memisahkan salah satu lembaran atom dari lembaran atom yang lainnya. Kamu harus memutuskan seluruh ikatan kovalen yang terdapat pada seluruh bagian struktur grafit.
2. Memiliki sifat lunak, terasa licin, dan digunakan pada pensil dan sebagai pelumas kering seperti pada kunci. Kamu dapat berfikir bahwa grafit kurang lebih seperti tumpukan kartu – tiap kartu kuat, tetapi kartu akan saling bergeser satu sama lain, atau akan merosot secara keseluruhan. Ketika kamu menggunakannya sebagai pensil, lembaran atom digosokkan dan menempel pada kertas.

3. Memiliki kerapatan yang lebih rendah dibandingkan intan. Hal ini disebabkan karena terdapat ruangan dalam jumlah yang relatif banyak yang mana ruangan tersebut merupakan "sampah" di antara lembaran-lembaran atom.
4. Menghantarkan listrik. Elektron yang terdelokalisasi bebas bergerak di seluruh bagian lembaran atom. Jika setiap bagian grafit terhubung pada suatu sirkuit, elektron akan dapat berpindah dari ujung lembaran dan dapat digantikan oleh elektron yang baru pada ujung yang lain.

Grafit EAF berasal dari limbah peleburan besi baja. Pada proses peleburan besi baja dengan metode EAF dibutuhkan suatu elektroda yang berfungsi untuk menghantarkan arus yang besar sehingga dapat melebur besi spons (*sponge iron*) dan besi tua (*scrap*) sebagai bahan baku utama pembuatan besi dan baja. Untuk menacapai tujuan ini, maka dibutuhkan suatu material yang memiliki konduktivitas yang tinggi sehingga dapat menghasilkan busur listrik. Oleh karena itu, grafit dipilih sebagai material utama untuk aplikasi elektroda karena memiliki resistivitas 0,25 dari karbon.



Gambar 2.6 Proses Peleburan Besi dan Baja^[15]

Pada aplikasi pelat bipolar, grafit dapat memberikan sifat mekanis yang baik dan konduktivitas listrik. Selain itu, penambahan grafit juga mampu meningkatkan

kemampuprosesan dari material komposit karena sifatnya yang baik sebagai pelumas padat. Hal tersebut mampu memberikan kinerja yang baik dan stabil dalam aplikasi sebagai pelat bipolar.

Tabel 2.3 Sifat-Sifat Umum Dari Grafit ^[17].

Density	1.76 gr/cm ³
Specific resistance	11.7 mikro ohm meter
Flexural strength	31 Mpa
Tensile strength	26
Young's Modulus	9.7 Gpa
Hardness	60 HRC
Thermal conductivity	116 W/mK

Grafit untuk pemakaian pelat bipolar juga divariasikan besar partikelnya, hal ini untuk mencari besar partikel yang optimum sehingga mendapatkan sifat mekanis dan konduktivitas yang baik. Selain besar partikel, bentuk partikel juga menentukan sifat mekanis grafit. Pengaruh besar partikel dan bentuk partikel grafit terhadap sifat mekanisnya dipresentasikan pada tabel 2.4 dan 2.5 :

Tabel 2.4 Pengaruh besar partikel terhadap sifat mekanis grafit ^[17]

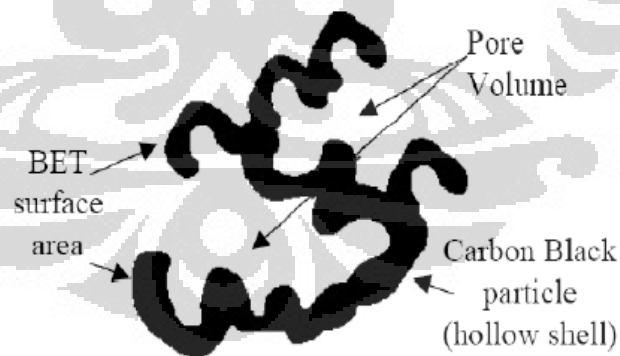
Particle size µm	Direction	Bulk electrical conductivity (S/cm)	Thermal Conduktivitas [W/(m.0C)]	Flexural strength (Mpa)
53-74	//	78.8	21.00	27.5
	⊥	683.3	121.40	
44-53	//	76.0	113.00	35.0
	⊥	566.5	13.00	
<44	//	45.8	13.00	39.8
	⊥	420.3	105.47	

Tabel 2.5 Pengaruh Bentuk Partikel Terhadap Sifat Mekanis Grafit ^[17]

sample	Particle size μm	Direction	Bulk electrical conductivity (S/cm)	Thermal Conduktivty [W/(m.0C)]	Flexural strength (Mpa)
Spherical graphite	44-63	//	84.0	18.9	39.5
		\perp	387.3	71.9	
	<44	//	60.0	12.5	44.0
		\perp	326.9	61.4	
Flake- like Graphite	44-53	//	76.0	20.3	35.0
		\perp	566.5	113,0	
	<44	//	45.8	13.0	39.8
		\perp	420.3	105.5	

2.4.2 Carbon Black

Carbon black merupakan padatan karbon amorf yang dibentuk dengan proses deposisi dari partikel padat dalam fasa gas. Proses deposisi tersebut terjadi karena pembakaran tidak sempurna dari hidrokarbon cair ^[18]. Struktur dari *carbon black* yang berbentuk amorf dan berpori dapat dilihat pada gambar 2.7 berikut ini.

**Gambar 2.7** Struktur *Carbon Black*

Dua jenis teknik manufaktur *carbon black* antara lain *furnace black* dan *thermal black*, kedua teknik ini yang paling familiar untuk menghasilkan hampir seluruh jenis *carbon black* yang ada di dunia, dengan *furnace black* sebagai teknik

yang paling umum ^[20]. Tanur produksi menggunakan reaktor tertutup untuk mengatomisasi bahan baku minyak di bawah kondisi yang dikontrol dengan sangat teliti (terutama suhu dan tekanan). Bahan baku utama dimasukkan ke dalam aliran gas panas (dicapai dengan membakar bahan baku sekunder, misalnya, gas alam atau minyak) di mana bahan baku tersebut akan menguap dan kemudian terjadi *pyrolyzes* dalam fase uap karbon untuk membentuk partikel mikroskopis. Dalam kebanyakan tungku reaktor, laju reaksi dikendalikan oleh uap atau semprotan air. *Carbon black* yang dihasilkan dihubungkan melalui reaktor, lalu didinginkan, dan dikumpulkan dalam kantong filter dalam suatu proses yang berkesinambungan. Residual gas dari tungku reaktor mencakup berbagai gas seperti karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂).

Penggunaan *carbon black* sudah dimulai ratusan tahun yang lalu, pada awalnya *carbon black* berguna sebagai zat pewarna. Seiring dengan perkembangan teknologi yang sangat pesat maka ditemukan fungsi-fungsi lain *carbon black*, antara lain ^[18]:

1. *Coloring agent* untuk tinta dan zat pewarna lainnya

Carbon black mempunyai kekuatan pewarnaan lebih tinggi dibandingkan dengan besi pigmen hitam atau organik, dan secara luas digunakan untuk tinta surat kabar, tinta percetakan, tinta India, dan cat. *Carbon black* juga digunakan sebagai pigmen hitam untuk tinta inkjet atau toner.

2. *Coloring agent* untuk resin

Carbon black memiliki kekuatan pewarnaan termal yang tinggi dan stabil, oleh karena itu cocok untuk mewarnai resin dan film pada temperature tinggi. *Carbon black* juga sangat baik untuk menyerap sinar ultraviolet, menyediakan resistansi yang tinggi terhadap sinar ultraviolet dan efeknya terhadap pewarnaan ketika hanya dengan sejumlah kecil dicampur dengan resin. *Carbon black* secara luas digunakan untuk mewarnai resin dan film. Resin dengan *carbon black* yang digunakan dalam bumper mobil, penutup kawat dan lapisan baja pipa yang membutuhkan ketahanan cuaca pada khususnya.

3. Peralatan elektronik

Carbon black mempunyai resistensi yang stabil dan karena itu digunakan sebagai bahan peralatan elektronik seperti di berbagai komponen *display* seperti material perekam magnetik, dan *OA rolls*. Selain itu, Mitsubishi Chemical telah mengembangkan *carbon black* dengan fungsi gabungan berbagai aplikasi khusus.

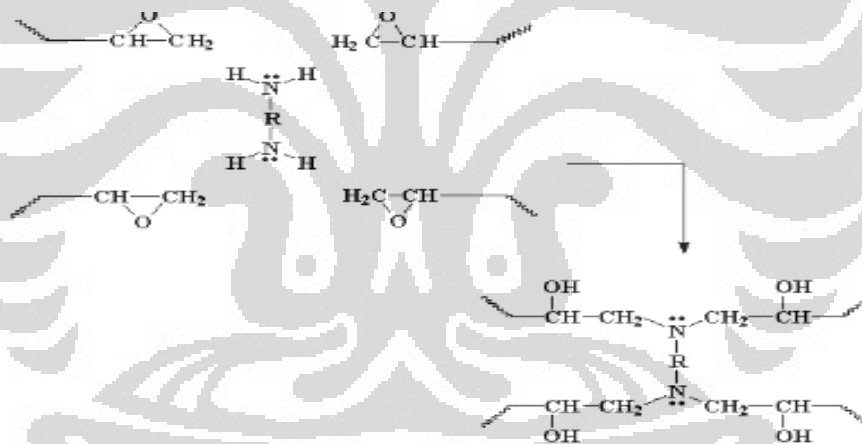
2.4.3 Epoksi

Epoksi merupakan salah satu jenis termoset yaitu salah satu jenis polimer yang tidak dapat menerima siklus pemanasan dan pendinginan secara kontinu seperti yang dapat dilakukan pada jenis polimer lainnya yaitu termoplastik. Ketika dipanaskan pada tahap awal, polimer ini akan melunak dan mampu mengalir di dalam cetakan, namun pada temperatur yang tinggi, epoksi akan mengalami reaksi kimia sehingga menjadi keras dan tidak mampu kembali ke bentuk semula dan jika dipanaskan ulang, epoksi tidak mampu melunak kembali melainkan akan terdegradasi. Struktur polimer ini terdiri dari dua penyusun, yaitu susunan resin dan *curing agent (hardener)* yang nantinya akan membuat proses polimerisasi terjadi pada temperatur ruang. *Epoxy hardener* akan dicampurkan dengan resin epoksi untuk menghasilkan reaksi *curing* agar didapatkan *hardened polymer (Cross link)* yang kuat dan mempunyai sifat mekanis baik sebagai matriks dasar komposit matriks polimer pelat bipolar. Sementara *hardener* adalah suatu senyawa reaktif *aliphatic amine* yang mempunyai sifat *curing time* yang cepat bila direaksikan pada temperatur ruang. Sifat-sifat umum yang dimiliki epoksi ^[21] :

- a) Kekuatan adhesi yang sangat baik
- b) Ketahanan yang baik terhadap panas dan zat kimia lain
- c) *Moisture resistance*
- d) Sifat mekanis yang cukup baik (tergantung jenis epoxy tersebut)
- e) Sifat electrical insulating (isolator listrik) yang sangat baik

- f) Sifat dapat diperbaiki dengan mudah , misalnya konduktivitas listrik dapat mudah ditingkatkan dengan penambahan aditif/filler yang mampu menghantarkan listrik dengan baik.

Epoksi merupakan salah satu polimer yang paling sering digunakan dalam material komposit karena mempunyai ketahanan pada suhu tinggi dibandingkan dengan polimer jenis lain. Resin epoksi banyak digunakan sebagai *binder* untuk berbagai jenis komposit dikarenakan resin epoksi memiliki daya isi dan juga sebagai agen penguat yang baik dalam komposit. Reaksi kimia antara resin epoksi dengan *agent* yang lain tidak perlu banyak memerlukan daya pembasahan yang besar. Selain non reaktif terhadap reaksi kimia, juga sebagai isolator yang baik untuk sifat elektrikalnya ^[22].



Gambar 2.8 Struktur reaksi *Curing* resin epoxy dengan hardener ^[5].

Beberapa keunggulan polimer jenis resin epoksi ini dapat dilihat dibawah ini ^[23] :

1. Mampu mengikat dengan gaya adhesi antara karbon dengan resin secara baik (kekuatan adhesi yang sangat baik)
2. konduktivitas listrik dapat mudah ditingkatkan dengan penambahan aditif atau *filler* yang sesuai
3. Sifat *electrical insulating* (isolator listrik) yang sangat baik

4. Kekuatan tinggi dan fleksibilitas yang rendah.
5. Kemungkinan terjadinya penyusutan selama polimerisasi sangat kecil.
6. Ketahanan terhadap reaksi kimia, *creep* dan *fatigue* baik.
7. Berbahaya karena mengandung racun kimia (epoxy resin)
8. Daya penyerapan terhadap air sangat tinggi dan Polimerisasinya lambat
9. Sulit untuk menggabungkan antara kekuatan dan ketahanan terhadap suhu tinggi

2.5 Komposit

Komposit merupakan kombinasi dari dua material atau lebih yang memiliki fasa yang berbeda menjadi suatu material baru yang memiliki properti lebih baik dari keduanya^[24]. Pencampuran dua atau lebih material pada komposit terjadi pada skala makro, hal ini yang membedakannya dengan sistem pencampuran lainnya seperti *alloy*. Struktur dasar komposit terdiri dari dua material penyusun, yaitu matriks dan penguat (*reinforcement*). Matriks merupakan bahan yang paling dominan dalam pembentukan komposit, presentase kandungan matriks dalam komposit biasanya 50% atau lebih. Pemilihan matriks ini menjadi sangat penting karena dalam suatu komposit dibutuhkan sifat mekanis yang baik, sifat mampuproses yang baik, dan juga memiliki resistansi yang baik terhadap bahan kimia dan panas. Fungsi dari matriks pada komposit adalah^[24] :

1. Mentransfer tegangan ke serat.
2. Menginfiltrasi serat dan cepat membeku.
3. Membentuk ikatan koheren, permukaan matrik/serat.
4. Melindungi serat.
5. Memisahkan serat.
6. Melepas ikatan.
7. Tetap stabil setelah proses manufaktur.

Sementara penguat digunakan dalam suatu komposit untuk meningkatkan sifat dari material komposit yang dihasilkan, memiliki kemampuan untuk mampu dibasahi oleh

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

Pada umumnya sifat material komposit, dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, diantaranya adalah^[3] :

1. Material penyusun

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

2. Jumlah material yang digunakan

Jumlah dari material penyusun akan mempengaruhi sifat yang dihasilkan dari komposit. Komposisi antara matriks dan penguat, sebaiknya seimbang karena jika jumlah material penguat lebih banyak dari matriks, maka sifat yang dihasilkan tidak mencapai nilai optimum. Pengaruh jumlah material terhadap sifat komposit, seperti modulus elastisitas dan densitas, dapat diprediksi dengan menggunakan *rule of mixture*.

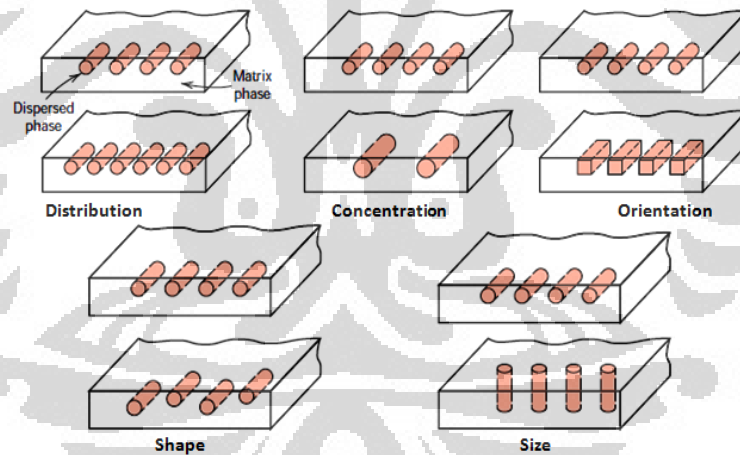
$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.1)$$

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} = \frac{m_f + m_m}{V_f + V_m + V_v} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{V_f + V_m + V_m} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{1} \quad (2.2)$$

dimana,

E_c = Modulus Elastisitas komposit [Pa]
 E_f = Modulus Elastisitas penguat [Pa]
 E_m = Modulus Elastisitas matriks [Pa]
 V_c = Fraksi volume komposit [%]
 V_f = Fraksi volume penguat [%]
 V_m = Fraksi volume matriks [%]
 ρ_c = Densitas komposit
 ρ_f = Densitas penguat
 ρ_m = Densitas matriks

3. Bentuk fasa yang terdispersi



Gambar 2.9 Parameter dari Fasa Terdispersi^[12]

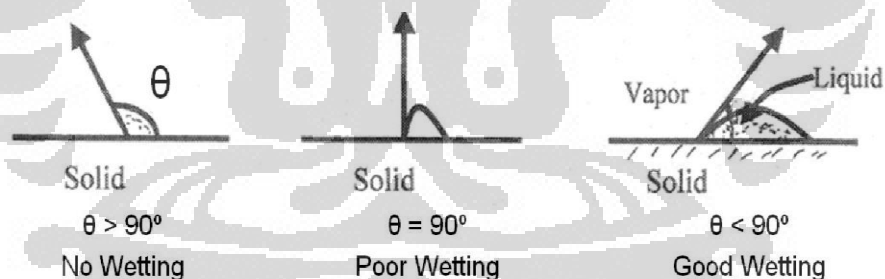
Fasa yang terdispersi dalam matrik juga mempengaruhi sifat komposit, baik dari distribusi, konsentrasi, orientasi, ukuran maupun bentuk dari fasa.

1. Fasa yang terdistribusi secara acak akan memiliki sifat yang lebih baik.
2. Semakin banyak fasa yang terdispersi dalam matriks, maka akan menghasilkan sifat mekanis yang lebih baik

3. Pada sistem komposit, penguat dengan orientasi yang searah dengan pembebanan akan mampu memberikan sifat mekanis yang lebih baik terhadap pembebanan tersebut.
4. Fasa yang memiliki bentuk silinder lebih baik karena tidak mempunyai tegangan sisa sehingga lebih tahan terhadap pembebanan.
5. Ukuran fasa yang kecil lebih baik karena mampu menahan dan mentransfer beban.

4. Daya Pembasahan

Daya Pembasahan adalah kemampuan untuk membasahi seluruh permukaan agar terjadinya suatu ikatan yang baik (kekuatan tinggi) dan juga untuk mengurangi jumlah porositas. Agar terjadi pembasahan yang baik, *contact angle* yang terjadi harus lebih kecil dari 90° , namun ketika *contact angle* antara matriks dan penguat lebih besar dari 90° maka perlu ditambahkan *wetting agent* untuk mengurangi tegangan atau energi permukaan (*surface tension*). Karena semakin tinggi *surface tension*, pembasahan antara grafit dengan epoxy akan menjadi semakin sulit.



Gambar 2.10 Hasil *wettability* komposit dengan *contact angle* ^[24]

Wettability dari permukaan padat terhadap permukaan cair (contoh adhesive) dapat diketahui berdasarkan persamaan Young ^[25] :

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LV} \cos \theta + \gamma_{SL} \quad (2.3)$$

Ket: γ_{SV} = Solid vapour phase

γ_{LV} = Liquid vapour phase

γ_{SL} = Solid liquid phase

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

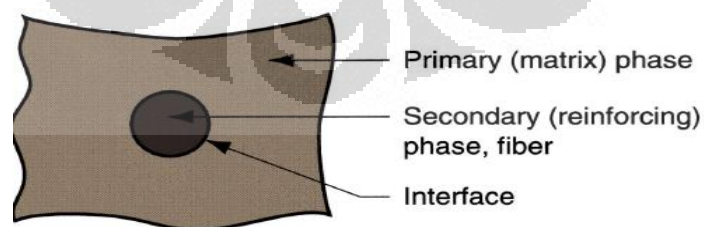
$$W_A = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (2.4)$$

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

$$W_A = \gamma_{LV} (1 + \cos \theta) \quad (2.5)$$

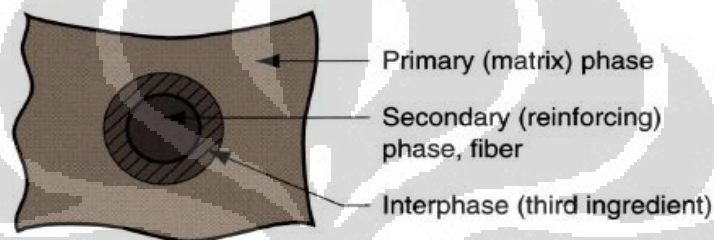
5. Ikatan antarmuka dan antarfasa

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



Gambar 2.11 Ikatan Antarmuka^[24]

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

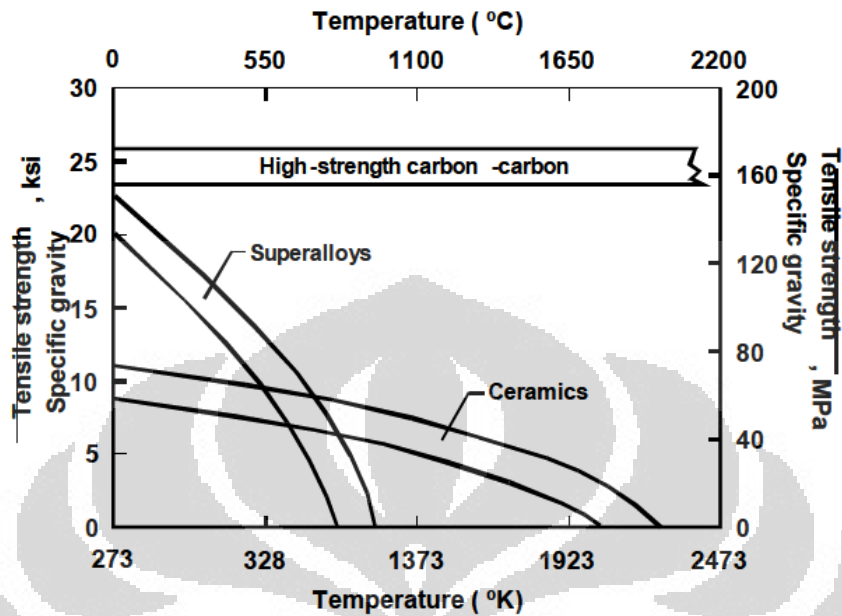


Gambar 2.12 Ikatan Interfasa^[24]

2.5.1 Karbon-Karbon Komposit

Karbon-karbon komposit merupakan salah satu jenis komposit yang memiliki matriks dan penguat sama-sama terbuat dari karbon. Kandungan karbon dalam Karbon-karbon komposit adalah 99.5 sampai 99.9%, dan keistimewaan material komposit ini adalah tidak adanya masalah kecocokan (*compatibility*) antara penguat dan matriks, karena baik unsur penguat, seperti serat, dan matriksnya adalah grafit. Serat penguat karbon dalam matrix karbon. Fasa matriks karbon dapat dibentuk

dengan pirolisis padatan, cairan, dan gas material organik.



Gambar 2.13 Perbandingan beberapa material kekuatan tinggi [26]

Karbon-karbon komposit dikenal karena kekuatannya yang tinggi dan pemuaian (ekspansi termal) yang rendah pada suhu lebih dari 3500 °C. Sebagai perbandingan, paduan-paduan super (*superalloys*) hanya sanggup menahan sampai sekitar 1200 °C. Kekuatan Karbon-karbon komposit bahkan meningkat seiring meningkatnya suhu, tidak seperti kekuatan logam dan keramik yang akan menurun. Karbon-karbon komposit juga dikenal memiliki ketangguhan dan ketahanan abrasi dan korosi, serta memiliki daya hantar listrik dan kalor tinggi (untuk daya hantar kalor, Karbon-karbon komposit dinyatakan melebihi daya hantar kalor perak dan tembaga pada suhu yang tinggi, serta memiliki ketahanan terhadap kejutan termal (*thermal shock*) yang luar biasa tanpa mengalami retak atau berubah bentuk. Karbon-karbon komposit memiliki kinerja dan kesatuan struktur yang baik pada lingkungan yang non-oksidator, tetapi pada lingkungan oksidator komposit ini memerlukan lapisan perlindungan pada keadaan tertentu. Misalnya saja bila karbon-karbon komposit berada pada lingkungan udara pada suhu di atas 427 °C, maka material ini akan teroksidasi dengan segera dan terdegradasi. Oleh karena itu perlu diberikan

perlindungan, dalam hal ini lapisan penahan oksigen (*oxygen-barrier*) berupa silikon karbida. Selain itu, karbon-karbon komposit sangat mampu-kerja (*workable*), dan bisa dibentuk menjadi bentuk-bentuk yang rumit. Berikut beberapa sifat dari karbon-karbon komposit dengan bentuk serat penguat yang berbeda ^[26].

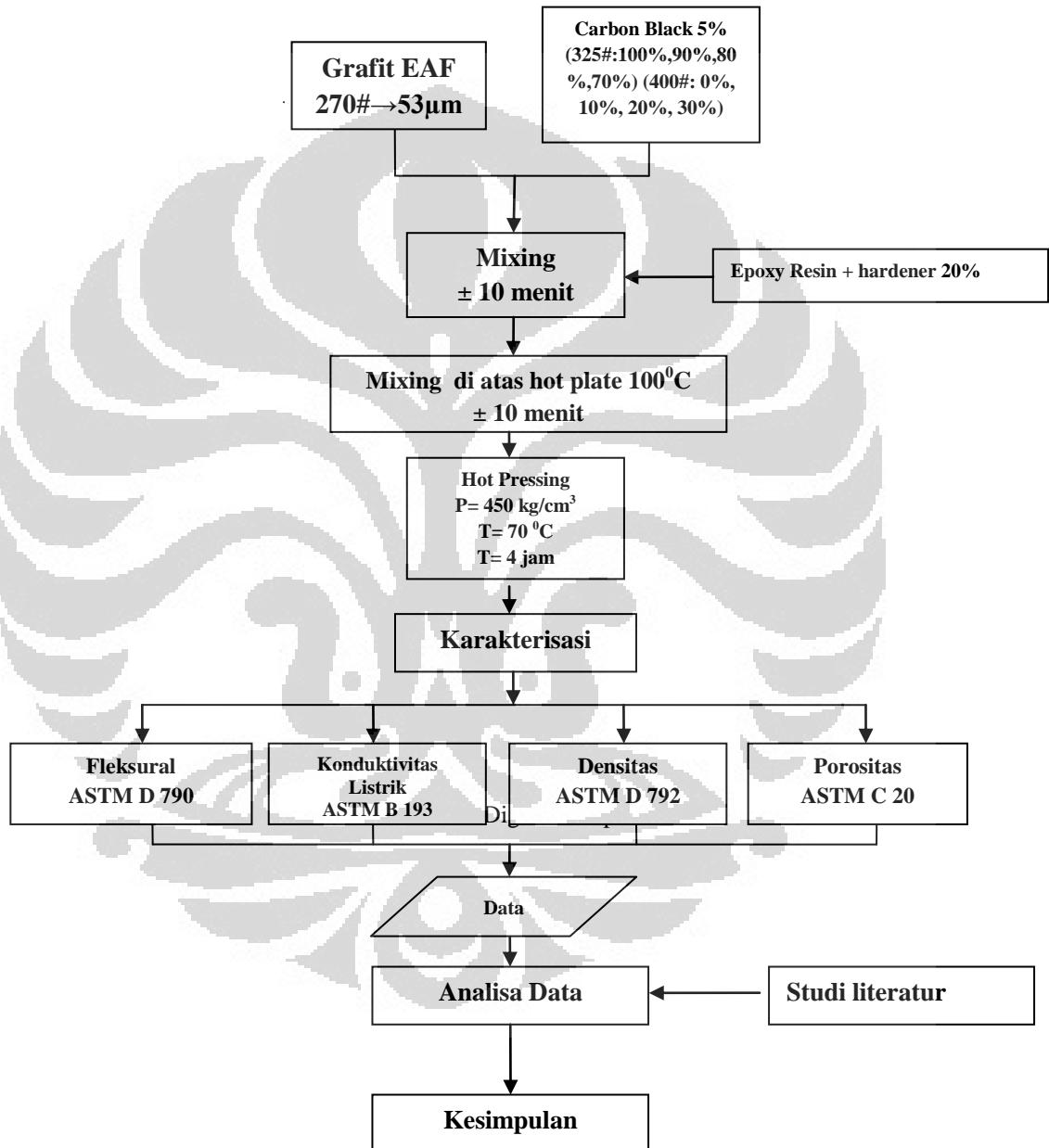
Dari itu, dapat ditarik kesimpulan bahwa karbon-karbon komposit memiliki keunggulan sebagai berikut:

1. tahan panas
2. kekuatan yang baik pada suhu tinggi
3. daya hantar kalor tinggi
4. ringan
5. pemuaian termal rendah
6. tahan campuran udara/bahan bakar
7. rasio kekuatan dan kekakuan terhadap berat yang tinggi

Karbon-karbon komposit memiliki banyak aplikasi pemakaian karena memiliki karakteristik yang baik, yaitu ringan, *high strength* (kuat), tahan terhadap temperatur yang sangat tinggi, *high performance*, dan karakteristik lainnya. Karbon-karbon komposit biasanya digunakan untuk *disc-type brakes* pada pesawat luar angkasa, *rotary engine seals*, dan beberapa aplikasi yang menuntut ketahanan material terhadap temperatur dan tekanan tinggi ^[26]. Untuk kepentingan komersil, diantaranya meliputi *furnace fixturing*, *heatshields*, *load plates*, *heating elements* dan *X-ray targets*. Untuk pemakaian pelat bipolar, karbon-karbon komposit sangat menguntungkan dibandingkan dengan penggunaan grafit 100% karena dapat menurunkan biaya produksi. karbon-karbon komposit juga dapat menghasilkan pelat bipolar yang dibutuhkan, yaitu murah (material dan proses pembuatan), ringan, tipis, sifat mekanis, dan konduktivitas yang baik ^[27].

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan :

1. Timbangan Digital
2. Gelas Ukur
3. *Beaker Glass* 1 L, 100 mL
4. *Thermometer*
5. Sendok
6. Spatula
7. *Mixer*
8. Oven
9. *Die Stainless Steel* 15 x 15 cm
10. Alat Uji Porositas (BET – ASTM C 20)
11. Alat Uji Fleksural (Bending 3 titik – ASTM D 790)
12. Alat Uji Densitas (ASTM D 792)
13. Alat Uji Konduktivitas (*Four Point Probe*)

Bahan yang digunakan :

Pelat bipolar pada penelitian ini terbuat dari material karbon-karbon komposit. Grafit akan berperan sebagai matriks sedangkan penguatnya adalah *carbon black*. Polimer berjenis epoksi berfungsi sebagai *binder* atau pengikat. Bahan lain yang digunakan adalah metanol, yang berguna pada saat proses pencampuran komposit. Berikut adalah data komposisi bahan-bahan pembentuk pelat bipolar :

Tabel 3.1 . Komposisi dan pengkodean formulasi sampel

Bahan (Total 180 gram)		Satuan	Kode formulasi sampel							
			1		2		3		4	
Resin Epoksi	20%	wt %	50		50		50		50	
		gr	18		18		18		18	
Resin <i>Hardener</i>	20%	wt %	50		50		50		50	
		gr	18		18		18		18	
Grafit EAF	80%	wt %	95		95		95		90	
		gr	136,8		13,8		136,8		136,8	
		μm	53		53		53		53	
<i>Carbon Black</i>	80%	wt %	5		5		5		5	
		gr	7,2		7,2		7,2		7,2	
		μm	44	37	44	37	44	37	44	37
		wt %	100	0	90	10	80	20	70	30
		gr	7,2	0	6,48	0,72	5,76	1,44	5,04	2,16

3.2.1 Grafit Limbah EAF (*Electric Arc Furnace*)

Dalam penelitian ini digunakan grafit elektroda busur listrik (*electric arc furnace*) sisa dari proses peleburan baja. Grafit akan digunakan dengan ukuran partikel 53μ dengan komposisi 75% dari berat total pelat. Ukuran tersebut diperoleh setelah bongkahan grafit elektroda EAF ditumbuk dan digerus menggunakan alat *disc mill* dan *planetary ball mill* untuk kemudian diayak dengan mesin pengguncang hingga mendapatkan ukuran yang diinginkan. Tabel berikut menunjukkan sifat-sifat grafit yang dipakai pada penelitian ini.

Tabel 3.2 Spesifikasi Grafit EAF

Grade	Ultra High Power (UHP)
Diameter dan Panjang	406 mm dan 1800 mm
Porositas	15 – 26%
Densitas	1,66 – 1,72 gr/cm ³
Resistivitas	5,0 – 6,0 ohm/m
Konduktivitas Termal	120 – 300 W/MK
Kekuatan Tekan	260 – 262 kg/cm ²
Kapasitas Pembawa Arus	20 – 46 KA
Kandungan Abu	0,5 % max
Koefisien Ekspansi Termal	(0,5 – 2,5) x 0,000001/K

3.2.2 Carbon Black

Pada penelitian ini *carbon black* yang dipakai dihasilkan dari serabut kelapa yang dilakukan proses pembakaran tidak sempurna. Proses pembuatan *carbon black* dilakukan di LIPI dan yang akan digunakan dalam pelat ini adalah kombinasi antara besar partikel 44 μ m dan 37 μ m dimana komposisi bahannya tertera pada table komposisi bahan (tabel 3.1). *Carbon black* digunakan sebagai material semi konduktif. *Carbon black* dengan luas permukaan yang luas akan mampu menyaring arus listrik dan membentuk jaringan karbon yang konduktif. Namun, struktur *carbon black* yang berporos akan mengurangi sifat mekanis dari komposit^[27].

3.2.3 Resin epoksi

Pada penelitian ini digunakan resin epoksi (Bhispenol A-epichlorohydrin) dengan merek dagang Eposchon. Tabel 3.1 berikut ini adalah spesifikasi dari resin epoksi yang digunakan dalam penelitian.

Tabel 3.3 Spesifikasi Resin Epoksi

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

Epoksi memerlukan sebuah *coupling agent* sebagai stimulan terjadinya proses polimerisasi dengan baik pada suhu ruang. Oleh karena itu digunakan *epoxy hardener* dengan merek dagang Eposchon (Polyaminoamide). Tabel 3.2 berikut ini adalah spesifikasi dari *hardener* yang digunakan dalam penelitian.

Tabel 3.4 Spesifikasi *Hardener*

Sifat	Nilai
Viskositas (25 ^o C)	100-200
Kekerasan (D)	84
Kekuatan Tarik (kgf/cm ²)	410
Kekuatan Fleksural (kgf/cm ²)	810
Kekuatan Tekan (kgf/cm ²)	740
Kekuatan Geser Adhesive (kgf/cm ²)	160

Epoksi pada pelat bipolar berfungsi sebagai *binder* agar pencampuran antara grafit dan *carbon black* optimal. Persentase epoksi yang digunakan adalah 10% untuk epoksi resin dan 10% untuk epoksi hardener.

3.2.4 Metanol

Penggunaan metanol berfungsi sebagai pengencer polimer epoksi pada saat pencampuran bahan-bahan pelat bipolar. Dalam penelitian ini menggunakan metanol teknis dengan merek dagang Brastaco. Tabel 3.5 berikut menunjukkan sifat-sifat metanol yang dipakai pada penelitian ini.

Tabel 3.5 Spesifikasi Metanol

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

3.3 Proses Pembuatan Pelat

3.3.1 *Crushing* dan *milling* grafit

Proses *crushing* dan *milling* dilakukan untuk mereduksi ukuran grafit maupun *carbon black* untuk mempermudah proses pembuatan pelat bipolar. Dalam tahap ini, grafit EAF yang digunakan sebagai penguat dari matriks dan untuk meningkatkan konduktivitas pelat bipolar akan dihancurkan dan dihaluskan untuk menghasilkan butir yang lebih kecil & halus agar dapat memudahkan pada proses pencampuran dan meningkatkan sifat pelat bipolar itu sendiri. Proses penghancuran dapat dilakukan dengan manual atau dengan menggunakan *disc mill*.

3.3.2 Sieving

Proses pengayakan atau *sieving* dilakukan untuk mencapai ukuran bahan yang diinginkan. Setelah proses *milling*, ukuran partikel akan beragam-ragam oleh karena

itu dilakukan proses pengayakan untuk mendapatkan ukuran yang sesuai dengan spesifikasi sampel. Untuk penelitian ini besar partikel grafit adalah $53\mu\text{m}$ yang didapatkan melalui pengayakan -270#, setiap grafit hasil proses *milling* akan diayak dengan menggunakan mesin ayak dengan waktu yang telah ditentukan. Sedangkan untuk mendapatkan carbon black dengan ukuran $44\mu\text{m}$ dan $37\mu\text{m}$, dilakukan pengayakan -325# dan -400#.

3.3.3 Mixing

Semua bahan pembentuk pelat akan dicampur namun sebelum dilakukan proses pencampuran, maka akan dilakukan penimbangan terhadap material-material yang akan dicampur untuk mendapatkan jumlah yang sesuai dengan perbandingan yang telah ditetapkan. Berikut ini adalah tahapan proses pencampuran bahan atau mixing:

1. Siapkan alat dan bahan yang dibutuhkan.
2. Larutkan dengan cara mengaduk resin epoksi dan *hardener* dengan metanol dalam beaker glass 100 ml terpisah selama 5 menit.
3. Campurkan grafit, *carbon black*, dalam beaker glass 1000 ml dan kemudian diaduk hingga rata.
4. Masukkan resin epoksi yang telah diencerkan dengan metanol 35 ml ke dalam adonan dan *mixing* selama 5 menit.
5. Masukkan *epoxy hardener* yang telah dilarutkan dengan metanol 35 ml ke dalam adonan dan *mixing* selama 5 menit.
6. *Mixing* kembali adonan di luar *hot plate* selama 5 menit untuk meratakan distribusi penyebaran keenceran metanol, grafit dan *epoxy*.
7. Lanjutkan *mixing* adonan di atas *hot plate* (100°C) selama 5 menit untuk mengeluarkan metanol yang ada di bakalan.
8. Hasil adonan tersebut kemudian dimasukkan ke dalam cetakan.

3.3.4 Pencetakan pelat

Adonan yang telah tercampur lalu dimasukkan kedalam cetakan yang terbuat dari baja tahan karat dengan ukuran 15cm x 15cm, lalu diratakan. Setelah semua adonan habis berpindah kedalam cetakan, maka cetakan ditutup dan dimasukkan kedalam mesin *Hot Press Pressure*. Lalu variabel tekanan yang digunakan dalam alat ini adalah sebesar 450 Kg/cm^3 dengan masukkan suhu sebesar $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Setelah proses penekanan dengan temperatur berjalan, maka didiamkan selama minimal 12 jam agar cetakan tertekan dengan baik dan tidak terjadi perubahan dimensi pada pelat akibat pelengkungan.

3.3.5 Pembuatan specimen uji

Pelat yang sudah dihasilkan kemudian dilanjutkan dengan pembuatan sampel uji, dimana dalam proses ini pelat akan dibagi menjadi 3 bagian, yaitu :

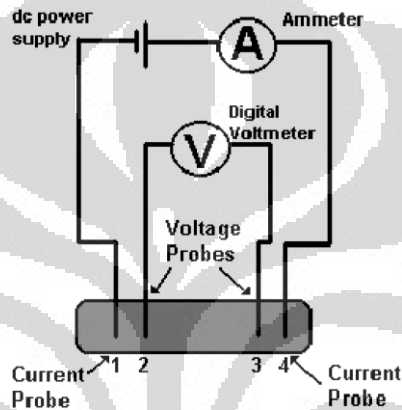
- 1 Untuk pengujian konduktivitas, sampel dibuat dengan ukuran 2cm x 2cm sebanyak 5 buah untuk satu variabel. Masing – masing sampel diampelas hingga rata agar arus yang ditembakkan pada permukaan sampel, dapat ditangkap sehingga menghasilkan nilai konduktivitas yang akurat.
- 2 Untuk pengujian densitas,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

3.4 Karakterisasi Pembuatan Pelat Bipolar

3.4.1 Pengujian Konduktivitas

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

Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat digital Veeco FPP 5000 - *four point probe test*. Seperti yang terlihat pada gambar dibawah, alat ini terdiri dari empat buah kawat yang kemudian diletakkan pada permukaan sampel. Arus akan mengalir melalui kawat no.1 dan 4. Apabila sampel memiliki ketahanan terhadap aliran dari arus listrik, maka akan terjadi penurunan tegangan karena arus mengalir sepanjang sampel. Penurunan tegangan ini terjadi pada kawat 2 dan 3 yang kemudian diukur dengan voltmeter digital.



Gambar 3.2 Skema mesin *four probe test*

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



Gambar 3.3 Mesin Veeco FPP 5000 - *four point probe test*

Adapun prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut :

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

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

$$C = \frac{1}{\rho} \quad (3.1)$$

dimana, C = nilai konduktivitas (S/cm)

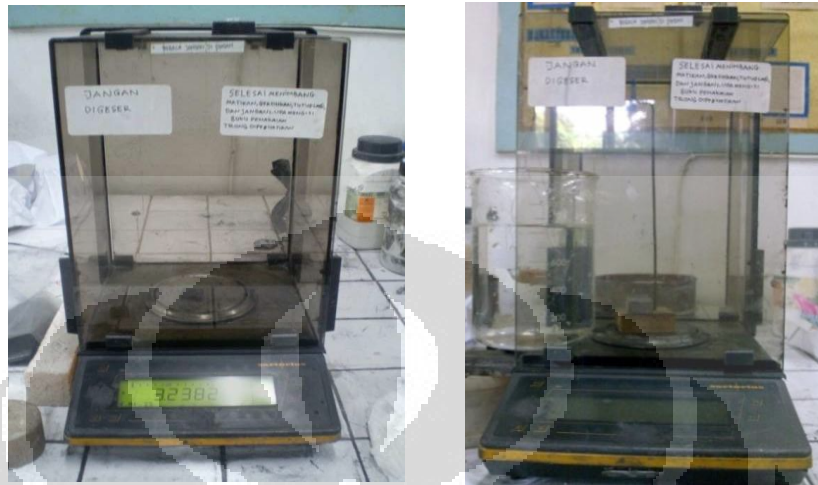
ρ = resistivitas (Ω cm)

3.4.2 Pengujian Densitas

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

1. Sampel ditimbang pada temperatur ruang ($25 \pm 20^\circ\text{C}$) sehingga diperoleh massa kering dari sampel
2. Kemudian sampel dicelupkan dalam *beaker glass* berisi air. Pencelupan ini harus dilakukan hingga seluruh permukaan sampel berada di tengah – tengah *beaker*

glass, tidak boleh menyentuh dasar dan pinggir dari *beaker glass*, seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 3.4 Penimbangan sampel di udara (kiri) dan di air (kanan)

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

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

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

A = massa sampel kering (g)

B = massa sampel tergantung dalam air (g)

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

3.4.3 Pengujian Porositas

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

jenuh (setelah direndam). Adapun langkah – langkah pengujian yang dilakukan, antara lain :

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



Gambar 3.5 Sampel direbus pada $T=100^{\circ}\text{C}$

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

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

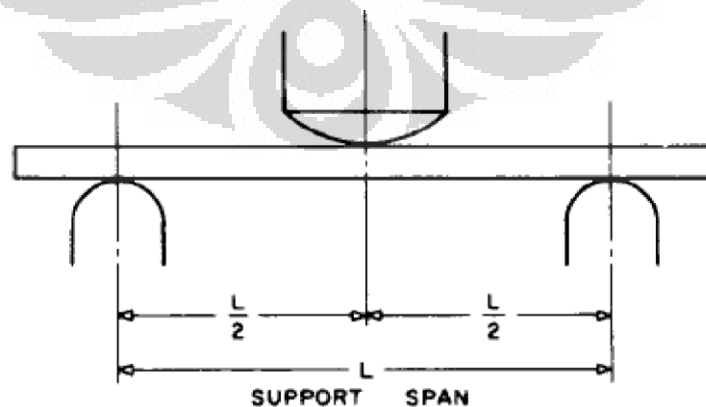
Perhitungan nilai porositas dapat dihitung dengan persamaan:

$$\% \text{ Porositas} = \frac{S_w - D}{D - S} \times 100\% \quad (3.3)$$

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

3.4.4 Pengujian Fleksural

Pengujian fleksural bertujuan untuk mengetahui ketahanan dari pelat bipolar terhadap beban tekan. Pengujian ini sangat penting untuk dilakukan karena akan menentukan performa dari pelat bipolar ketika digunakan pada berbagai aplikasi, mengingat pelat bipolar banyak mendapatkan tekanan dari gas yang masuk maupun keluar dari sistem sel bahan bakar. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM D790, yaitu “*standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electric insulating materials*”. Pengujian dilakukan dengan metode *three point bending*, dimana beban akan diberikan pada bagian tengah sampel uji. Ukuran dari sampel uji adalah 6 cm x 1,3 cm x 0,3 cm.



Gambar 3.6 Skema Pengujian Fleksural

Prinsip pengujian ini adalah sampel diletakkan ditengah – tengah diantara dua penahan, yang kemudian diberikan beban tekan di bagian tengah sampel dengan kecepatan konstan hingga sampel patah. Pengujian ini menggunakan mesin Universal Testing Machine (UTM) T22K dengan menggunakan panjang penahan 65 mm, diameter *punch* 3,2 mm dan kecepatan pembebanan 2,2 mm/menit.



Gambar 3.7 Proses Uji Fleksural

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

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

dimana, σ_f = tegangan / kekuatan lentur (MPa)

P = beban maksimal (N)

L = panjang specimen (mm)

b = lebar specimen (mm)

d = tebal specimen (mm)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengamatan Visual Pelat Bipolar Hasil Pencetakan

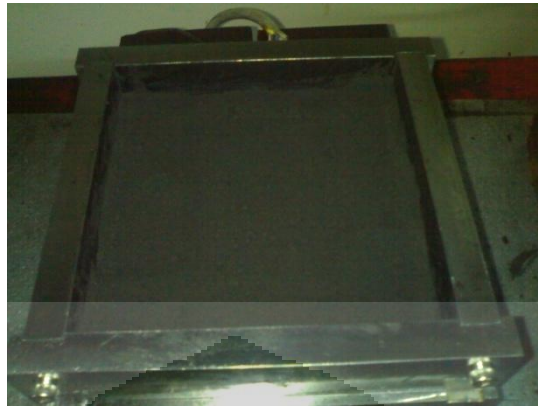
Pada penelitian ini dibuat pelat dengan variasi besar partikel antara $44\mu\text{m}$ dan $37\mu\text{m}$ yang memiliki perbandingan 0:100, 10:90, 20:80, 30:70. Untuk besar partikel grafit yang digunakan adalah sebesar $53\mu\text{m}$. Berikut adalah gambar penampakan untuk sampel 1, 3, dan 4.



Gambar 4.1 Penampakan sampel setelah pencetakan 1 (100% $44\mu\text{m}$), 3 (80% CB $44\mu\text{m}$; 20% CB $37\mu\text{m}$), 4 (70% CB $44\mu\text{m}$; 30% CB $37\mu\text{m}$)

Berdasarkan hasil pengamatan visual diatas, semua pelat bipolar yang dihasilkan relatif baik dan mempunyai dimensi yang tidak jauh berbeda. Permukaan pelat yang dihasilkan juga relatif halus dan rata, hal ini disebabkan proses pencampuran yang baik dari resin epoksi dan *hardener*, grafit serta *carbon black*. Namun pinggiran sampel terdapat kerutan-kerutan yang kemungkinan disebabkan oleh proses pendinginan yang tidak merata pada sampel akibat kurang baiknya pencampuran antara *hardener* dan resin. Sedikit lengkungan terlihat pada pelat yang disebabkan proses penyimpanan setelah pencetakan kurang baik. Namun secara keseluruhan sampel terlihat dalam kondisi yang baik, hal ini dapat dilihat dengan tidak adanya porositas dan permukaan yang mulus pada sampel. Pada pelat bipolar ini diharapkan campuran antara resin epoksi dan *hardener* yang merata agar proses pengeringan dapat terjadi dengan baik sehingga menghasilkan pelat yang secara visual terlihat mulus, keras dan kokoh.

Faktor peletakan serbuk hasil campuran epoksi, grafit dan *carbon black* kedalam cetakan juga mempengaruhi hasil akhir dari pelat bipolar yang akan dihasilkan. Peletakan serbuk komposit yang menyebar secara merata adalah cara yang paling baik untuk mendapatkan pelat bipolar yang baik. Peletakan bakalan juga akan berpengaruh terhadap tebal sampel, pada keempat sampel pelat tebal berkisar antara 0.3 cm - 0.4 cm, hal ini diakibatkan tidak meratanya peletakan bakalan pada cetakan, namun tebal ini tidak terlalu berpengaruh terhadap sifat mekanis dan konduktivitas pelat. Metode peletakan serbuk komposit ini dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut ini



Gambar 4.2 proses pencetakan sampel

4.2 Karakterisasi Pelat Bipolar

Pelat bipolar mempunyai peranan sangat penting dalam kinerja sel tunam secara keseluruhan, hal ini dapat dilihat dari berat pelat bipolar yang mencakupi hingga 80% berat total komponen sel tunam. Beberapa pengujian dilakukan yang bertujuan melihat sifat mekanis pelat sehingga bisa dikatakan pelat tersebut layak. Persyaratan pelat dapat dilihat pada tabel 2.2.

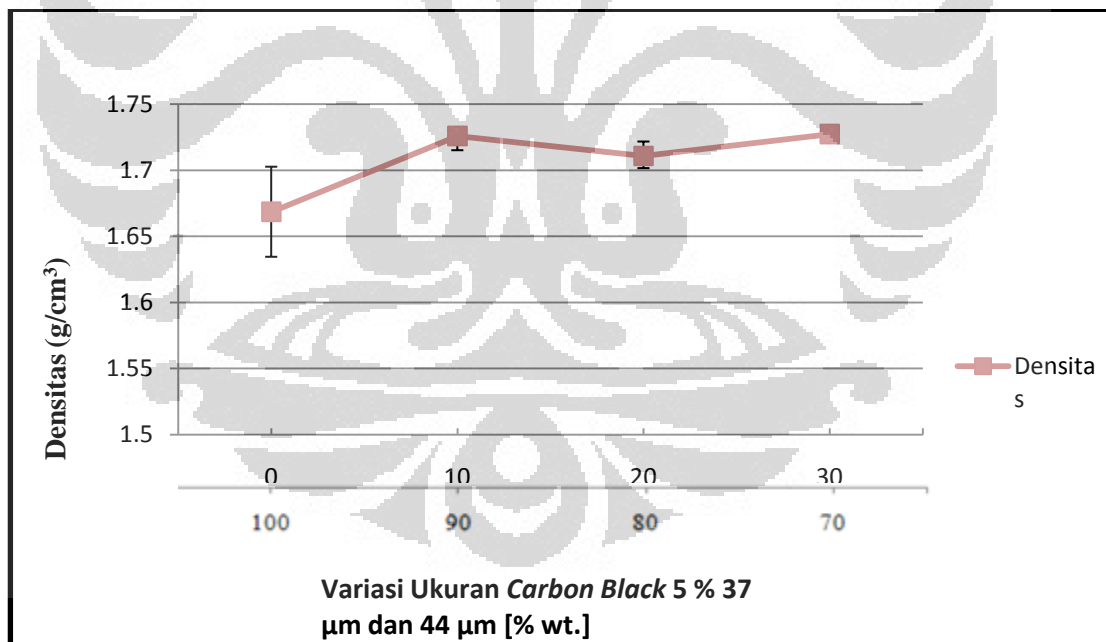
4.2.1 Pengujian Densitas

Pengujian densitas ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui massa jenis pelat bipolar tersebut. Pelat bipolar yang mempunyai massa jenis yang kecil akan meningkatkan efisiensi PEMFC pada saat diaplikasikan misalnya pada kendaraan bermotor, selain itu pelat bipolar yang ringan sangat berguna terutama dalam aplikasi perlengkapan *portable*. Densitas pelat juga mempengaruhi berat keseluruhan dari susunan sel tunam, hal ini disebabkan berat dari pelat bipolar mempengaruhi berat total sel tunam hingga 80%. Tabel 4.1 berikut akan menunjukkan hasil pengujian densitas.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Densitas

Sampel	<i>Carbon black</i> 44 μ m (%)	<i>Carbon black</i> 37 μ m (%)	Densitas (g/cm ³)
1	100	0	1,67
2	90	10	1,72
3	80	20	1,71
4	70	30	1,73

Table di atas memperlihatkan besar densitas tergantung dari perbandingan *carbon black* 44 μ m dan 37 μ m, untuk lebih memperjelas pengaruh penambahan *carbon black* 37 μ m terhadap nilai densitas pelat maka data-data di atas diolah menjadi gambar 4.3.

**Gambar 4.3** Pengaruh Variasi Ukuran Partikel *Carbon Black* Terhadap Densitas

Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa seiring dengan penambahan *carbon black* 37 μ m maka nilai densitas pelat bipolar tersebut cenderung fluktuatif. Pada

penambahan *carbon black* 37 μm sebesar 10% terjadi total kenaikan densitas sebesar 3.44% dari kadar *carbon black* 37 μm 0% atau 44 μm 100%. Densitas tersebut mengalami penurunan sebesar 0.88% pada kadar *carbon black* 37 μm 20%, namun pada pada kadar *carbon black* 37 μm 30 % kembali terjadi kenaikan densitas sebesar 0.96% dari variabel sebelumnya. Namun perubahan yang terjadi pada saat penambahan *carbon black* 37 μm tidak terlalu signifikan. Terlihat bahwa penambahan *carbon black* 37 μm akan menambah densitas pelat.

Hasil pengujian densitas jika dibandingkan dengan densitas grafit murni, yaitu sebesar 1.76 gr/cm³ dan jika dilakukan penghitungan densitas dengan hukum pencampuran, densitas grafit akan dicampurkan dengan *carbon black* yang mempunyai densitas 1.8 gr/cm³ dan epoksi resin 1.2 gr/cm³, maka hasil pencampuran ketiganya akan menghasilkan densitas yang lebih kecil dari densitas grafit murni.

Pada penelitian ini, ukuran serbuk dari *filler carbon black* yang digunakan memiliki ukuran lebih kecil dari grafit, yaitu 44 μm dan 37 μm . peningkatan densitas terjadi seiring dengan penambahan *carbon black* 37 μm seperti yang terlihat pada gambar 4.3. Hal ini diakibatkan penyebaran partikel *carbon black* yang lebih merata untuk mengisi porous akibat besar partikel grafit yang cukup besar (53 μm). Semakin besar ukuran partikel *filler* maka densitas atau kerapatannya seharusnya akan semakin menurun.

Berdasarkan pengujian densitas yang telah dilakukan, nilai densitas yang paling optimum didapatkan pada sampel dengan penambahan *filler carbon black* 37 μm sebesar 40%, yaitu sebesar 1.73 gr/cm³. Namun secara umum semua pelat bipolar yang dihasilkan ini sangat ringan dan masih di dalam syarat berat jenis pelat bipolar yang baik, yaitu 5 g/cm³ [5]. Nilai densitas pelat bipolar akan mempengaruhi berat total suatu *fuel-cell stack* [28]. Sel tunam yang ringan dapat dihasilkan jika densitas pelat bipolar yang didapat sangat rendah. [28].

4.2.2 Pengujian Porositas

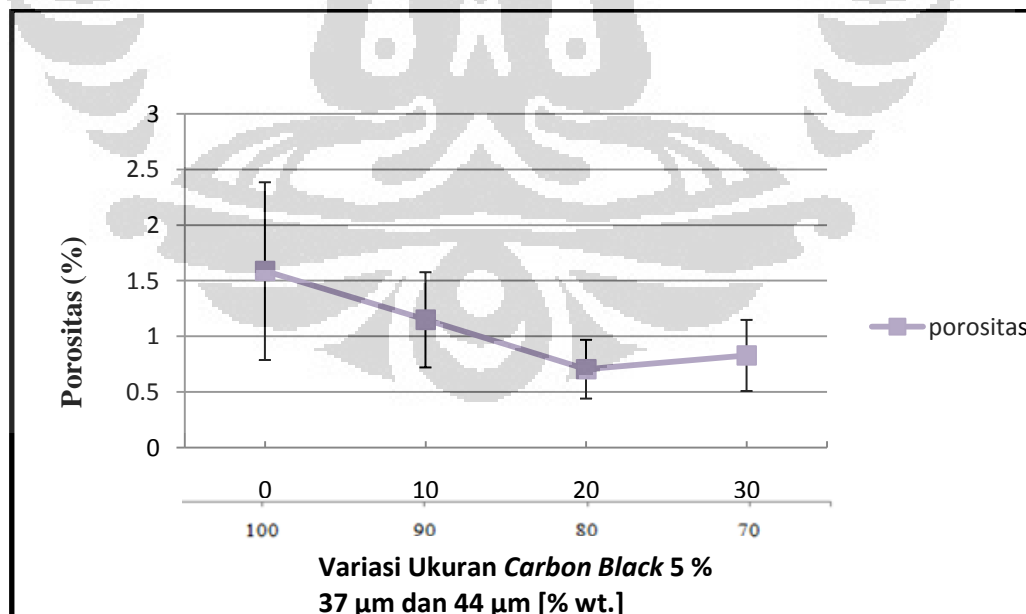
Porositas merupakan salah satu parameter yang dapat menentukan kualitas performa pelat bipolar pada sistem PEMFC. Pelat bipolar tersebut harus mempunyai

sifat tidak tembus gas (*impermeability*) yang baik agar tidak merusak rekasi sel tunam yang berlangsung. Pengujian porositas yang dilakukan sesuai dengan ASTM C20 menghasilkan data-data seperti pada tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Porositas

Sampel	<i>Carbon black</i> 44 μ m (%)	<i>Carbon black</i> 37 μ m (%)	Porositas (%)
1	100	0	1,59
2	90	10	1,15
3	80	20	0,71
4	70	30	0,83

Nilai porositas yang diharapkan adalah kurang dari 1%, semakin kecil nilai porositas maka akan meningkatkan nilai densitas karena seiring dengan berkurangnya porous maka pelat akan semakin padat dan akan meningkatkan nilai densitasnya. Pengaruh penambahan *carbon black* 37 μ m terhadap persentase porositas pelat diperlihatkan pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Pengaruh Variasi Ukuran Partikel *Carbon Black* Terhadap Porositas

Porositas tertinggi yang terlihat pada gambar 4.4 adalah 1.59%, yaitu ketika belum ada penambahan *carbon black* 37 μ m kedalam sampel. Penurunan porositas terjadi ketika ditambahkan 10% *carbon black* 37 μ m, penurunan terjadi sebesar 38% dari nilai porositas awal. Porositas turun turun ketika ditambahkan 20 % *carbon black* 37 μ m, penurunan juga terjadi cukup besar yaitu 37% porositas sebelumnya. Namun terjadi kenaikan porositas pada sampel yang ditambah 30% *carbon black* 37 μ m sebesar 17.5%. namun kenaikan ini tidak terlalu signifikan.

Penyebab terbentuknya porositas adalah faktor pembuatan sampel yang berskala makro. Ukuran grafit yang cukup besar (53 μ m) dapat menghasilkan rongga-rongga yang cukup banyak. Penambahan *carbon black* dimaksudkan sebagai pengisi rongga-rongga tersebut sehingga tercipta *interface* yang baik. Ukuran partikel *carbon black* yang lebih kecil dibandingkan dengan grafit memungkinkan *carbon black* mengisi *porous* tersebut. Penyebab lain terjadinya rongga-rongga dalam sampel uji disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu tingginya viskositas atau masih lembabnya campuran serbuk komposit pada daerah tertentu sehingga campuran tersebut mungkin saja menyerap gelembung-gelembung udara (kemampuan alirnya rendah) dan ketika dilakukan proses pencetakan akan menghasilkan kepadatan yang tidak merata^[5].

Gambar 4.4 memeperlihatkan bahwa penambahan *carbon black* 37 μ m akan menurunkan porositas, namun penambahan yang terlalu banyak juga akan menyebabkan naiknya porositas , seperti yang terlihat pada variabel terakhir.

Secara keseluruhan nilai porositas yang dihasilkan tidak terlalu besar seiring dengan penambahan *filler carbon black* yang berkisar diantara 0.71-1.59%. Dengan tingkat porositas yang kecil akan meningkatkan efisiensi performa pelat bipolar pada sistem sel tunam. Sehingga diharapkan dapat memenuhi kriteria pelat bipolar yang baik pada penggunaannya yang dipersyaratkan pada pemakaian sel tunam sebagai salah satu energi alternatif di masa depan.

4.2.3 Pengujian Konduktivitas

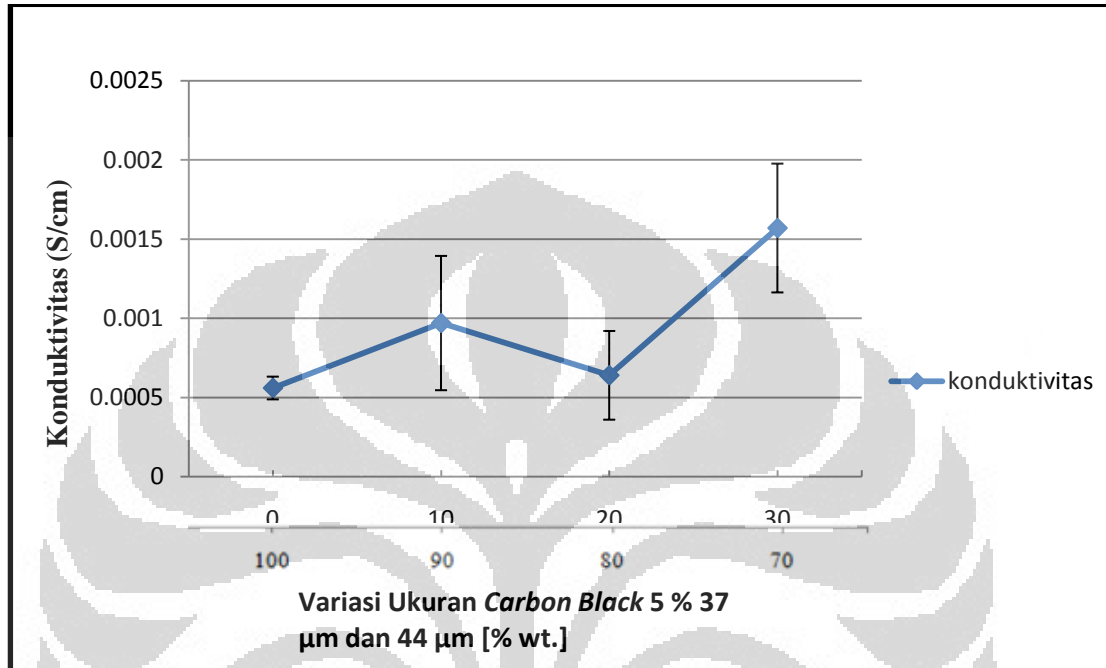
Pelat bipolar sangat memiliki peranan yang besar dalam sistem sel tunam. Fungsi utama dari pelat bipolar tersebut adalah mengumpulkan dan mengalirkan arus dari kutub anoda ke kutub katoda. Oleh karena itu material pelat bipolar harus memiliki sifat konduktivitas listrik yang baik untuk menghantarkan atau menghasilkan arus listrik tersebut. Hasil pengukuran resistivitas atau hambatan yang dilakukan oleh alat *four point probe* akan didapatkan suatu nilai konduktivitas (S/cm) pelat bipolar yang dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Konduktivitas

Sampel	<i>Carbon black</i> 44 μ m (%)	<i>Carbon black</i> 37 μ m (%)	Konduktivitas (10^{-4} S/cm)
1	100	0	5,56
2	90	10	9,7
3	80	20	6,4
4	70	30	15,7

Nilai konduktivitas sangat dipengaruhi kerapatan antara grafit dengan grafit atau grafit dengan *carbon black*. Untuk meningkatkan *interface* pada pelat maka dilakukan penambahan *carbon black* yang berukuran lebih kecil dari grafit dan penambahan resin epoksi yang bertujuan sama. Nilai konduktivitas grafit murni seperti pada tabel 2.4 memeperlihatkan bahwa dengan semakin kecilnya ukuran partikel grafit, maka nilai konduktivitas akan cenderung menurun. Tabel 2.4 menjelaskan pengaruh ukuran partikel terhadap nilai konduktivitas grafit murni, jika dibandingkan dengan nilai yang didapat pada tabel 4.3 maka perbedaan nilai konduktivitasnya sangat jauh berbeda. Nilai konduktivitas grafit murni pada ukuran partikel 53 μ m adalah 78,8 S/cm sedangkan nilai paling tinggi konduktivitas pelat bipolar dengan grafit berukuran sama namun ditambahkan *carbon black* dan resin epoksi hanya sebesar $15,7 \times 10^{-4}$ S/cm. penambahan *carbon black* dan eposi resin terhadap pelat bipolar dengan matriks grafit akan menurunkan nilai konduktivitasnya,

penjelasan mengenai pengaruh penambahan *carbon black* 37 μm terhadap konduktivitas grafit akan dijelaskan seperti gambar 4. 5 berikut ini.



Gambar 4.5 Pengaruh Variasi Ukuran Partikel *Carbon Black* Terhadap Densitas

Gambar 4.5 memperlihatkan bahwa terjadi kenaikan nilai konduktivitas dari sampel pertama (*carbon black* 37 μm 0 %) dari $5,56 \times 10^{-4}$ S/cm menjadi $9,7 \times 10^{-4}$ atau kenaikan sebesar 42%. Namun pada sampel ketiga terjadi penurunan menjadi $6,4 \times 10^{-4}$ S/cm dan kemudian mengalami kenaikan cukup pesat pada kandungan *carbon black* 37 μm terbanyak (30%) yaitu sebesar $15,7 \times 10^{-4}$ S/cm. Sampel empat memiliki nilai konduktivitas paling baik, namun masih sangat jauh dari syarat konduktivitas untuk pelat bipolar yaitu 100 S/cm.

Pada material komposit, penambahan *carbon black* digunakan sebagai antistatik, *electrostatic dissipative* (daya disipasi listrik), dan *filler konduktif*. *Carbon black* dengan luas permukaan yang tinggi dapat mengumpulkan arus listrik pada konsentrasi yang lebih rendah dan membentuk jaringan karbon konduktif. *Carbon black* juga berfungsi sebagai medium dari proses migrasi elektron didalam grafit dan resin epoksi, sehingga arus yang mengalir didalamnya akan saling terdorong dan

semakin mudah bergerak secara kontinyu yang menyebabkan arus yang dihasilkan akan semakin besar. Hal ini yang menyebabkan nilai konduktivitas pada grafik diatas yang semakin meningkat sampai titik optimum pada penambahan *carbon black* 37 μ m (30%). Rendahnya konduktivitas pelat kemungkinan terjadi akibat belum optimalnya pencampuran *carbon black* ke dalam campuran komposit karbon sehingga masih tercipta banyak *porous* yang dapat menyebabkan turunnya konduktivitas. Faktor lain yang mempengaruhi adalah lapisan *binder* yang menutupi sebagian partikel grafit dan *carbon black* sehingga menghambat jalannya arus yang dapat menyebabkan rendahnya nilai konduktivitas.

Secara umum, nilai konduktivitas yang didapatkan dari lima pelat bipolar yang dihasilkan diatas masih belum bisa memenuhi target dimana diinginkan nilai konduktivitas yang tinggi dari 100 S/cm. nilai konduktivitas dapat ditingkatkan dengan meningkatkan efisiensi penyampuran antara resin dan *carbon black* sehingga hubungan *interface* antara grafit dengan grafit atau grafit dengan *carbon black* menjadi baik.

4.2.4 Pengujian Fleksural

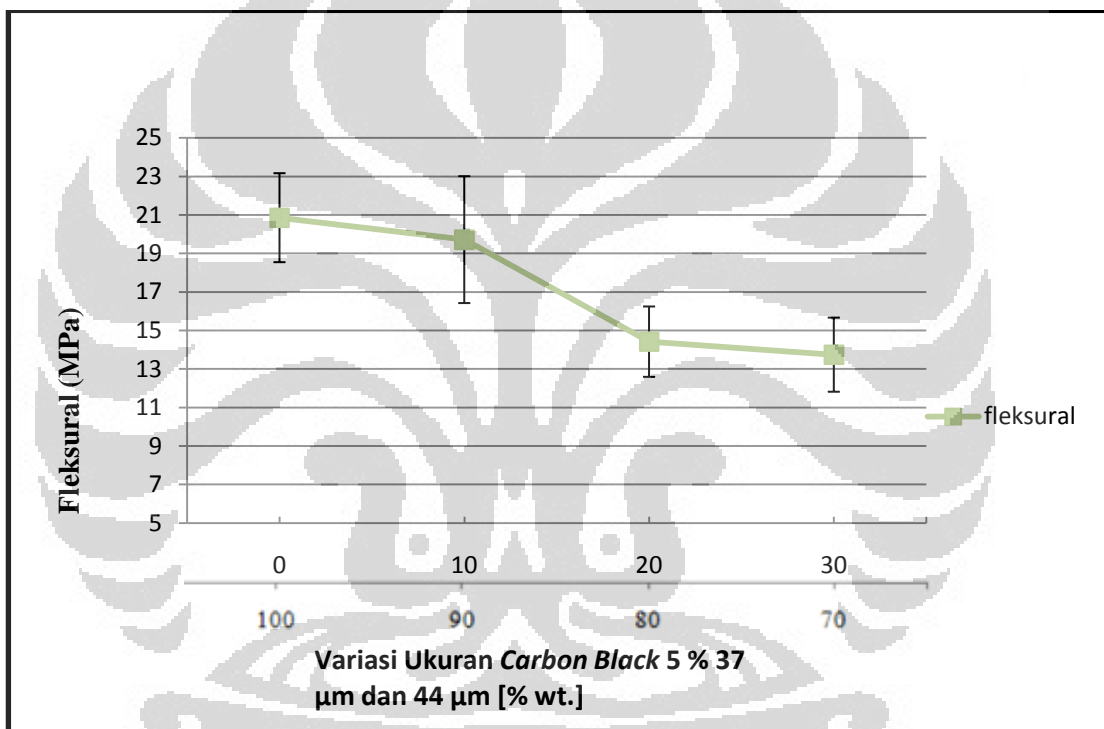
Data hasil pengujian fleksural untuk seluruh sampel disajikan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Fleksural

Sampel	<i>Carbon black</i> 44 μ m (%)	<i>Carbon black</i> 37 μ m (%)	Fleksural (MPa)
1	100	0	20,85
2	90	10	19,71
3	80	20	14,41
4	70	30	13,74

Pengujian fleksural dilakukan untuk menguji kekuatan lentur dari pelat, hal ini disebabkan fungsi pelat bipolar sebagai penopang sebagian besar komponen sel

tunam lainnya. Pengaruh ukuran partikel grafit terhadap kekuatan fleksuralnya seperti terlihat pada tabel 2.4 memperlihatkan bahwa semakin kecil ukuran partikel grafit maka kekuatan fleksuralnya akan meningkat. Kekuatan fleksural grafit murni pada ukuran 53 μm adalah sebesar 27,5 MPa, jika dibandingkan dengan pelat bipolar berukuran grafit sama besar namun ditambahkan *carbon black* dan resin epoksi maka nilai terbesarnya adalah 20,85 MPa. Pengaruh penambahan *carbon black* 37 μm terhadap kekuatan fleksural akan diperlihatkan pada gambar 4.6 berikut ini.



Gambar 4.6 Pengaruh Variasi Ukuran Partikel *Carbon Black* Terhadap Fleksural

Hasil pengujian fleksural terlihat bahwa nilai tertinggi terdapat pada sampel yang hanya mengandung *carbon black* 44 μm 100%. Seiring dengan penambahan *carbon black* 37 μm mulai dari 10% hingga 30 % kekuatan fleksural terus menurun. Seperti yang terlihat pada gambar 4.6, penambahan *carbon black* berturut-turut 10%, 20 %, dan 30% hanya menghasilkan kekuatan fleksural 20.85 MPa, 14.5 MPa, dan 13.5 MPa.

Penyebab turunnya kekuatan fleksural dengan penambahan *carbon black* 37 μ m kemungkinan disebabkan oleh sifat dasar dari *carbon black* yang tidak homogen, sehingga partikel *carbon black* hanya terpusat pada titik tertentu dan tidak tersebar secara merata. Selain itu ikatan antara garfit dengan *carbon black* yang buruk juga menghasilkan tegangan fleksural yang rendah.

Secara umum, nilai kekuatan fleksural yang dihasilkan tidak memenuhi target DOE dimana diinginkan nilai kekuatan fleksural diatas 25 MPa (tabel 2.2). penambahan *carbon black* 37 μ m ternyata tidak memberikan pengaruh yang cukup baik kepada kekuatan fleksural sampel.

4.3 Perbandingan Sifat Pelat Bipolar

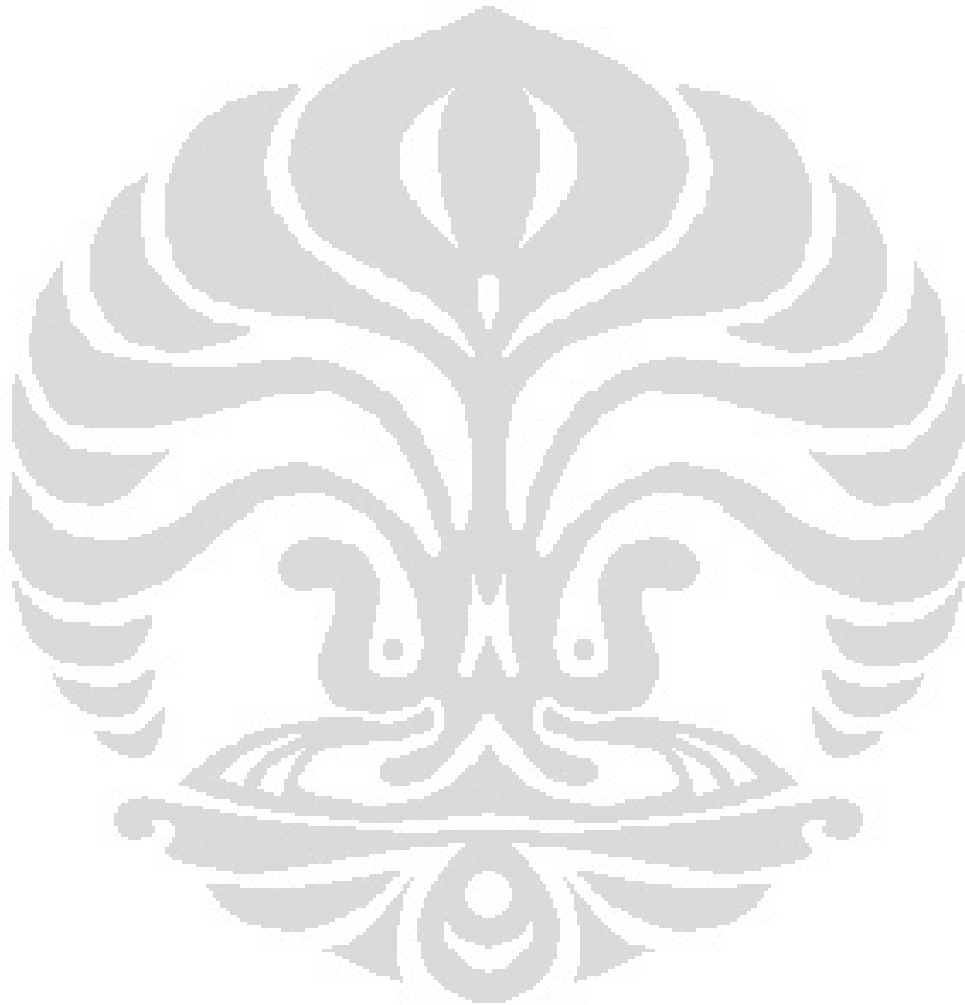
Tabel 4.5 Perbandingan Sifat Tiap Sampel

Sampel	<i>Carbon black</i> 37 μ m (0%)	<i>Carbon black</i> 37 μ m (10%)	<i>Carbon black</i> 37 μ m (20%)	<i>Carbon black</i> 37 μ m (30%)
Konduktivitas	5,56 x 10 ⁻⁴	9,7 x 10 ⁻⁴	6,4 x 10 ⁻⁴	1,57 x 10 ⁻³
Fleksural	20,85	19,71	14,41	13,74
Densitas	1,67	1,72	1,71	1,73
Porositas	1,59	1,15	0,71	0,83

Tabel diatas memperlihatkan bahwa nilai konduktivitas dan fleksural tidak memenuhi standar DOE. Nilai konduktivitas sampel masih jauh dari yang diharapkan. Nilai konduktivitas yang baik sangat diperlukan sel tunam sesuai dengan fungsi dan cara kerjanya. Fleksural juga mempunyai nilai yang di bawah standar DOE (25 MPa). Hal ini sangat tidak menguntungkan, karena pelat bipolar selain harus mempunyai konduktivitas yang baik juga harus mempunyai kekuatan lentur yang tinggi, hal ini berkaitan dengan fungsi pelat bipolar yang juga sebagai penopang sebagian besar komponen sel tunam.

Densitas pelat sudah sangat baik begitu juga dengan nilai porositasnya. Densitas yang rendah akan meningkatkan efisiensi pemakaian sel tunam dari segi

biaya dan pemanfaatan energi. Nilai porositas yang rendah juga dapat menghindari perambatan gas melalui pelat yang dapat menurunkan performa sel tunam. Jika dilihat dari empat sampel yang telah diteliti maka dapat dikatakan bahwa sampel kedua dengan perbandingan *carbon black* 44 μm dan *carbon black* 37 μm (90:10). Namun secara keseluruhan sifat mekanis dan konduktivitas dari pelat yang diteliti masih jauh dari yang diharapkan.



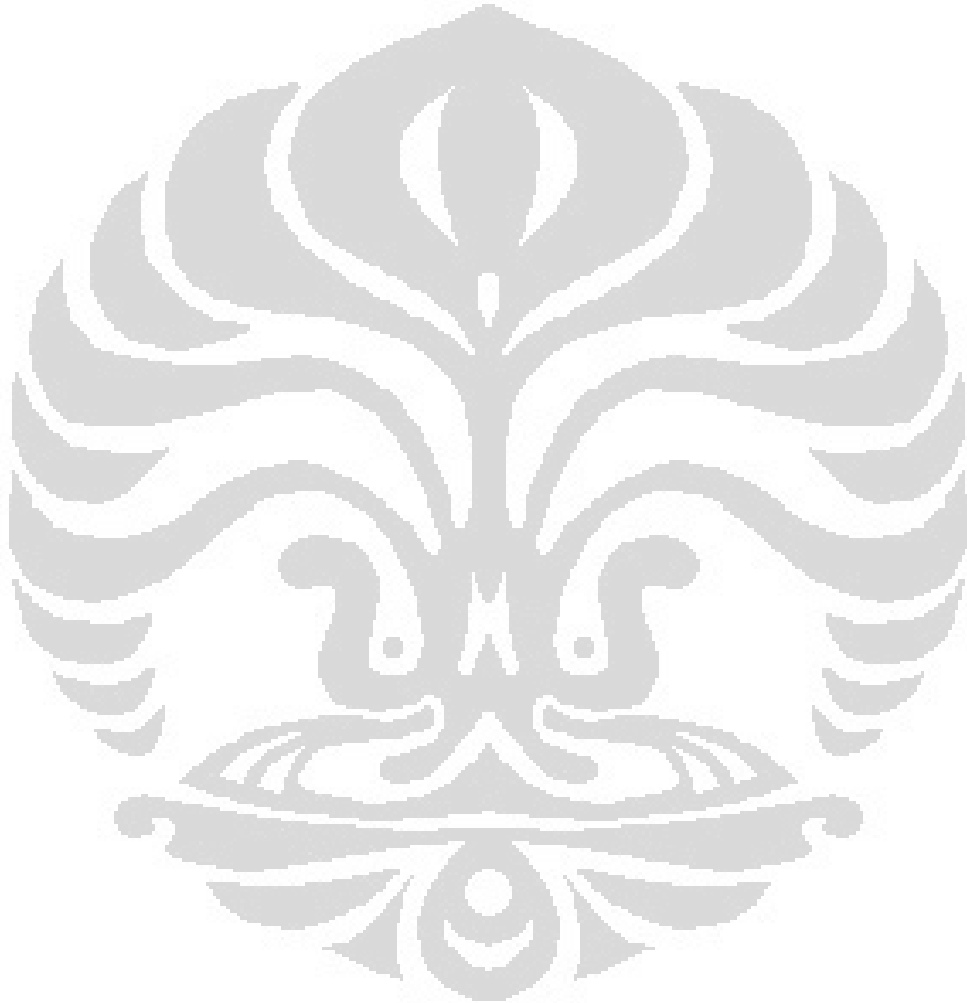
BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

1. Variasi ukuran partikel *carbon black* tidak banyak berpengaruh terhadap proses pembuatan pelat bipolar
2. Pelat yang mempunyai densitas paling rendah adalah sampel dengan kandungan *carbon black* 37 μ m yaitu 1,67 g/cm³, sedangkan sampel yang mempunyai densitas paling tinggi terdapat pada sampel dengan kandungan *carbon black* 37 μ m 30%.
3. Angka porositas setiap pelat berjumlah sangat kecil, untuk porositas terendah terdapat pada sampel dengan kandungan *carbon black* 37 μ m 20% dengan persentase porositas mencapai 0,70564%, sedangkan sampel yang mempunyai porositas paling tinggi yaitu sampel dengan *carbon black* 37 μ m 0% sebesar 1,59%.
4. Semua pelat tidak memenuhi target nilai konduktivitas yang diharapkan (100S/cm). konduktivitas tertinggi terdapat pada pelat dengan kandungan *carbon black* 37 μ m 30% sebesar $1,57 \times 10^{-3}$ S/cm. sedangkan konduktivitas terendah dimiliki pelat dengan kandungan *carbon black* 37 μ m 0% sebesar $5,56 \times 10^{-4}$ S/cm.
5. Kekuatan fleksural paling tinggi dimiliki oleh pelat dengan kandungan *carbon black* 37 μ m sebesar 20,85 MPa, sedangkan fleksural paling rendah terdapat pada pelat dengan kandungan *carbon black* 37 μ m 30% dengan nilai 13,74 MPa. Semua pelat sudah tidak memenuhi batas kekuatan yang diberikan (25 MPa).
6. Pelat dengan kandungan *carbon black* 37 μ m sebesar 10% adalah pelat yang mempunyai performa paling baik dibandingkan sampel lainnya, pelat ini

mempunyai konduktivitas $9,7 \times 10^{-4}$ S/cm, fleksural 19,71 MPa, densitas 1,73 g/cm³ dan persentase porositas hanya 1,15%.

7. Penambahan carbon black dengan besar partikel 37 μ m yang divariasikan dengan *carbon black* 44 μ m tidak selalu meningkatkan performa pelat, hal ini disebabkan persebaran partikel *carbon black* yang tidak merata pada setiap bagian pelat.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] US. Department of Energy. *Fuel Cell Handbook 7th Edition*, EG & G Technical Services Inc., Morgantown, West Virginia, November 2004
- [2] Chris Rayment & Scott Sherwin. *Introduction to Fuel Cell Technology*, Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame, May 2, 2003
- [3] Kurniawan Rio. *Skripsi: Pengaruh penambahan polyanilin terhadap karakterisasi komposit epoxy resin + grafit eaf + carbon black sebagai material pelat bipolar untuk polymer electrolyte membrane fuel cell*, Departemen Teknik Metalurgi dan Material. 2009.
- [4] Atul Kumara, Ramana G. Reddy, *Materials and design development for bipolar/end plates in fuel cells*, Department of Metallurgical and Materials Engineering, University of Alabama. 2004
- [5] Sembiring Gabriel. *Skripsi: Perancangan dasar komposit pelat bipolar untuk polymer electrolyte membrane fuel cell (pemfc) dengan bahan utama polimer epoxy dan grafit* Departemen Teknik Metalurgi dan Material. 2009.
- [6] Ling Du, *Dissertation: Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (Pem) Fuel Cells*, 2008
- [7] Putra Setiadi. *Skripsi: Pengaruh tekanan compression moulding terhadap performa pelat bipolar komposit karbon eaf/resin epoksi dengan komposisi 5% carbon black*, Departemen Teknik Metalurgi dan Material. 2009.
- [8] Besmann, Ted, James Klett, John Henry, Jr., and Edgar Lara-curzio. *Carbon Composite Bipolar plate for PEM Fuel Cells.*
- [9] Allen Hermann, Tapas Chaudhuri, Priscila Spagnol. *Bipolar plates for PEM fuel cells : A review*. International Journal of Hydrogen Energy 30 (2005) 1297 – 1302.
- [10] Joyce S. Cooper, *Design analysis of PEMFC bipolar plates considering stack manufacturing and environment impact*, Department of Mechanical Engineering, University of Washington. 2003.
- [11] <http://en.wikipedia.org/wiki/Graphite> diakses pada tanggal 17-12-2010 jam 6.52

- [12] Briand Rand , *Graphite structure, properties and manufacture*, Briand Rand, Unversity of Pretoria
- [13] <http://www.graftech.com/getdoc/3bd3a1ee-e92d-48d5-9fc9-02ea67275d83/GP44R-Graphite-Powder.aspx> diakses pada tanggal 17-12-2010 jam 6.54
- [14] <http://community.um.ac.id/showthread.php?75429-Sifat-fisik-grafit> diakses pada tanggal 17-12-2010 jam 6.57
- [15] Dr.Ing. Bambang Suharno, Ir. Bustanul Arifin, M.Phil.Eng. *PEMBUATAN BAJA PADA EAF*. Departemen Metalurgi dan Material FTUI. 2007
- [16] <http://www.graftech.com/getattachment/bec97181-4360-45dc-80e6-7d671ca5621e/Grade-ATJ-Isomolded-Graphite.aspx> diakses pada tanggal 17-12-2010 jam 7.30
- [17] ZHANG Jie ZOU Yan-wen , HE Jun, *Influence of graphite particle size and its shape on performance of carbon composite bipolar plate*, Institute of Nuclear Energy and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, 2005
- [18] http://www.carbon-black.org/what_is.html diakses pada tanggal 17-12-2010 jam 7.35
- [19] http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_black diakses pada tanggal 17-12-2010 jam 7.30
- [20] <http://carbon-black.org/> diakses pada tanggal 17-12-2010 jam 7.25
- [21] http://www.huntsman.com/advanced_materials/index.cfm?PageID=5865 diakses pada tanggal 17-12-2010 jam 7.45
- [22] Kakati Biraj, K, and Deka Dhanapati. *Effect of Resin Matrix Precursor on the Properties of Graphite Composite Bipolar plate for PEM Fuel Cell*. *Energy & Fuel* 21, 1681-1687.(2007)
- [23] Harper.A. Charles. *modern plastics handbook2000*. Mc Graw-Hill published company.hlm 2.62.USA.(2000).
- [24] Anne Zulfia. *Diktat Kuliah Material Komposit*. Departemen Teknik Metalurgi dan Material. 2009.
- [25] D.F. Caulfield et al., *Wood Thermoplastic Composites Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite*, Chap 13 (Taylor and Francis,2005), hlm 4-5
- [26] Jeffy Arry Susanto, *Tugas Paper Material Komposit, Carbon-Carbon Composite*, Universitas Indonesia, 2008

- [27] Method for the manufacture of carbon-carbon composite, Michael F. Baud, Elizabethon, Tenn; Jay A. Harvey, East Amherst, N.Y. Great Lakes Carbon corporation New York
- [28] Hsu-Chiang Kuan, Chen-Chi M. Ma, Ke Hong Chen, Shih-Ming Chen, *Preparation, Electrical, Mechanical, and Thermal Properties of Composite Bipolar plate for a Fuel Cell* (Elsevier, 2004)





Technical Information

EP

Bakelite® EPR 174

Unmodified, liquid standard epoxy resin based on Bisphenol-A

Characteristics

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

Curing agent

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

Applications

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

Shelf Life

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

Precautions

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

P.T. JUSTUS KIMARAYA
JAKARTA

Lampiran 2. Hardener Eposchon

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 :	
Task 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

FT. Duta Kimia
JAKARTA

Lampiran 3 Spesifikasi Grafit EAF

WED, 29-JUL-09 12:28 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 Group	Unit	BOH	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.

Lampiran 3. Spesifikasi Grafit EAF (lanjutan)

WED, 29-JUL-09 12:21 DIV SSP: 11 PTKS CLG 02 0254 371184 P. 0

CILEGON

INVENTORY CONTROL SYSTEM Item No : 00908011

DATE : 04.12.2007

GROUP/CLASS : 443019132

Nato-name : ELECTRODE,

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

NAME & SPECIFICATION GROUP

GRAPHITE,ELECTRODE-D406X1800MM-20-46KA

GRAPHITE ELECTRODE
 GRADE: ULTRA HIGH POWER (UHP)
 DIA.: 406 MM
 LENGTH: 1800 MM
 POROSITY: 15 - 26%
 BULK DENSITY: 1.66-1.72 GR/CM3
 RESISTANCE: 5.0-6.0 OHM/M
 THERMAL CONDUCTIVITY: 120-300 W/MK
 COMPRESIVE STRENGTH: 260-262 KG/CM2
 CURRENT CARRYING CAPACITY: 20-46 KA
 WEIGHT OF EACH SET POLE & NIPPLE: +/- 410KG
 ASH CONTENT'S: 0.5% MAX
 AVERAGE LINEAR COEFFICIENT OF THERMAL EXPANS:
 (0.5-2.5)X0.000001/K

COMPLETE WITH ACCESSORIES :

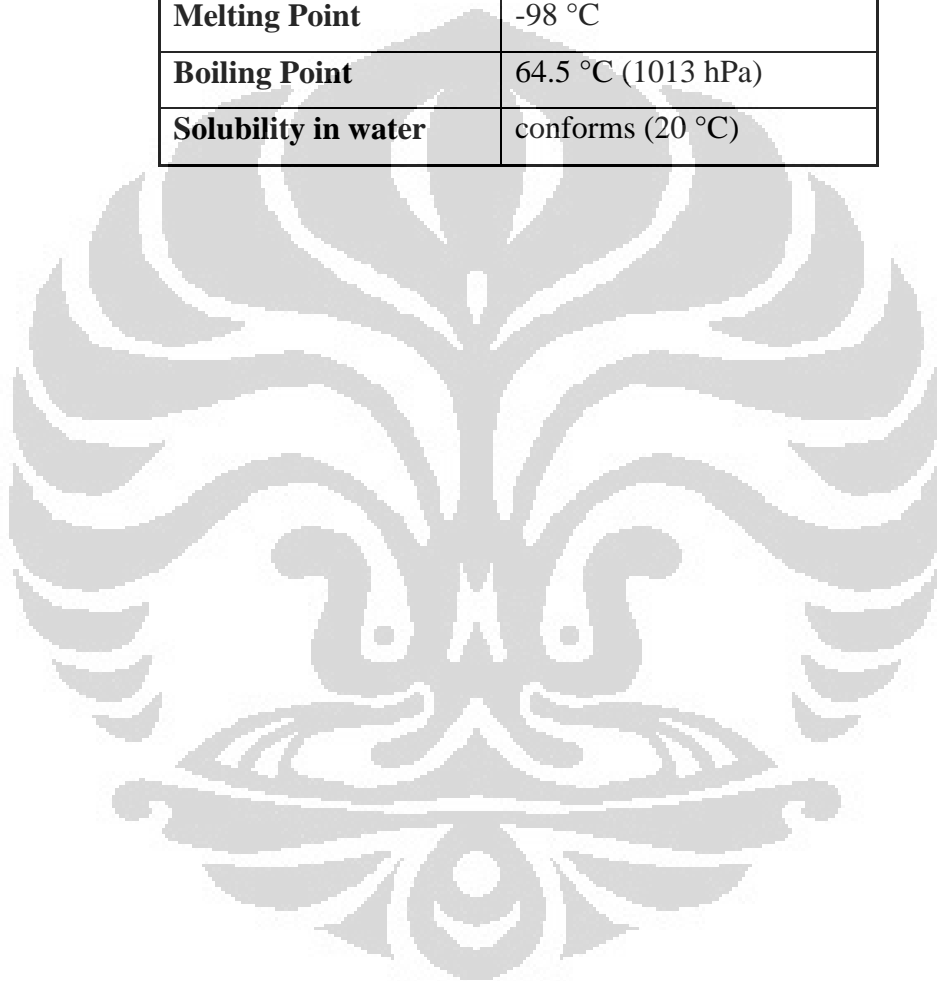
- 3 EA NIPPLE TRANSPORT FOR 20 TON GRAPHITE ELECTRODE
- PRESET LONG NIPPLE
- 1 EACH ELASTIC CRANE SUSPENSION GEAR FOR ELECTRODE 16 TN

MANUFACTURE :

GENSUPP ELECTRODE-ARC-D406MMX1800MM-20-46KA

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

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



Lampiran 5 Hasil Pengujian Konduktivitas

	Epoxy (%)	CB -325# (%)	CB -400# (%)	Resistivitas (Ωcm)	Konduktivitas (S/cm)	Konduktivitas rata-rata (10^{-4} S/cm)
I	20	100	0	1973	0.00051	5,6
II	20	100	0	1643	0.00061	
I	20	90	10	764	0.00131	9,7
II	20	90	10	2030	0.00049	
III	20	90	10	910	0.00110	
I	20	80	20	3110	0.00032	6,4
II	20	80	20	1200	0.00083	
III	20	80	20	1292	0.00077	
I	20	70	30	1424	0.00070	15,7
II	20	70	30	673	0.00149	
III	20	70	30	780	0.00128	

Lampiran 6 Hasil Pengujian Densitas

CB -400# (%)	A (Udara) (gr)	B (Air) (gr)	A-B (gr)	ρ air (gr/cm ³)	Densitas	Densitas rata-rata	
					(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	
0%	I	2.86	1.2	1.66	0.996232	1.72	1.67
	II	2.9	1.18	1.72		1.68	
	III	2.96	1.19	1.77		1.67	
	IV	3.08	1.23	1.85		1.66	
	V	2.85	1.1	1.75		1.62	
10%	I	2.8	1.2	1.6	0.996232	1.74	1.72
	II	2.31	0.97	1.34		1.72	
	III	2.45	1.03	1.42		1.72	
	IV	3.09	1.31	1.78		1.73	
	V	2.09	0.88	1.21		1.72	
20%	I	2.82	1.18	1.64	0.996232	1.71	1.71
	II	2.91	1.2	1.71		1.70	
	III	2.85	1.19	1.66		1.71	
	IV	3	1.26	1.74		1.72	
	V	3.07	1.29	1.78		1.72	
30%	I	2.76	1.16	1.6	0.996232	1.72	1.73
	II	2.94	1.24	1.7		1.72	
	III	2.98	1.27	1.71		1.74	
	IV	2.88	1.23	1.65		1.74	
	V	3.04	1.28	1.76		1.72	

Lampiran 7 Hasil Pengujian Porositas

CB -400# (%)	D (gr)	S (gr)	Sw	Sw-D	D-S	Porositas	Porositas rata-rata	
			(gr)	(gr)	(gr)	(%)	(%)	
0%	I	2.84	1.1	2.87	0.03	1.74	1.72	1.59
	II	2.89	1.18	2.91	0.02	1.71	1.17	
	III	2.94	1.2	2.95	0.01	1.74	0.57	
	IV	3.06	1.23	3.11	0.05	1.83	2.73	
	V	2.83	1.1	2.86	0.03	1.73	1.73	
10%	I	2.78	1.17	2.79	0.01	1.61	0.62	1.15
	II	3.28	0.97	3.3	0.02	2.31	0.87	
	III	2.43	1.05	2.45	0.02	1.38	1.45	
	IV	3.07	1.3	3.09	0.02	1.77	1.13	
	V	2.08	0.89	2.1	0.02	1.19	1.68	
20%	I	2.74	1.14	2.75	0.01	1.6	0.63	0.82918
	II	2.93	1.23	2.94	0.01	1.7	0.59	
	III	2.97	1.24	2.98	0.01	1.73	0.58	
	IV	2.87	1.22	2.89	0.02	1.65	1.21	
	V	3.02	1.27	3.04	0.02	1.75	1.14	
30%	I	2.8	1.17	2.81	0.01	1.63	0.63	0.70564
	II	2.89	1.19	2.91	0.02	1.7	1.18	
	III	2.84	1.17	2.85	0.01	1.67	0.60	
	IV	2.98	1.24	2.99	0.01	1.74	0.57	
	V	3.05	1.28	3.06	0.01	1.77	0.56	

Lampiran 8 Hasil Pengujian Fleksural

		b (mm)	d (mm)	L (mm)	P (N)	σ_f (MPa)	σ_f rata-rata (MPa)
CB 0%	I	13.25	3.1	64	30.4	22.9	20.85
	II	13.5	3.15	64	25.6	18.35	
	III	13.95	3.05	64	28.8	21.31	
CB 10%	I	13.15	4	64	44.8	20.44	19.71
	II	12.2	4.65	64	41.6	15.14	
	III	13.85	3.9	64	51.2	23.33	
	IV	13.95	3.75	64	44.8	21.92	
	V	13.45	3.85	64	36.8	17.72	
CB 20%	I	14	3.85	64	36.8	13.76	13.76
	II	13.9	3.6	64	30.4	15.65	
	III	14.5	3.8	64	25.6	17.80	
CB 30%	I	15.65	4.05	64	32	14.8	14.41
	II	14.8	3.55	64	27.2	14.49	
	III	13.35	3.95	64	30.4	13.93	

Lampiran 9 Tabel Densitas Air (www.simetric.co.uk)

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

	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0.999841	0.999847	0.999854	0.999860	0.999866	0.999872	0.999878	0.999884	0.999889	0.999895
1	0.999900	0.999905	0.999909	0.999914	0.999918	0.999923	0.999927	0.999930	0.999934	0.999938
2	0.999941	0.999944	0.999947	0.999950	0.999953	0.999955	0.999958	0.999960	0.999962	0.999964
3	0.999965	0.999967	0.999968	0.999969	0.999970	0.999971	0.999972	0.999972	0.999973	0.999973
4	0.999973	0.999973	0.999973	0.999972	0.999972	0.999972	0.999970	0.999969	0.999968	0.999966
5	0.999965	0.999963	0.999961	0.999959	0.999957	0.999955	0.999952	0.999950	0.999947	0.999944
6	0.999941	0.999938	0.999935	0.999931	0.999927	0.999924	0.999920	0.999916	0.999911	0.999907
7	0.999902	0.999898	0.999893	0.999888	0.999883	0.999877	0.999872	0.999866	0.999861	0.999855
8	0.999849	0.999843	0.999837	0.999830	0.999824	0.999817	0.999810	0.999803	0.999796	0.999789
9	0.999781	0.999774	0.999766	0.999758	0.999751	0.999742	0.999734	0.999726	0.999717	0.999709
10	0.999700	0.999691	0.999682	0.999673	0.999664	0.999654	0.999645	0.999635	0.999625	0.999615
11	0.999605	0.999595	0.999585	0.999574	0.999564	0.999553	0.999542	0.999531	0.999520	0.999509
12	0.999498	0.999486	0.999475	0.999463	0.999451	0.999439	0.999427	0.999415	0.999402	0.999390
13	0.999377	0.999364	0.999352	0.999339	0.999326	0.999312	0.999299	0.999285	0.999272	0.999258

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