



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI PELAT BIPOLAR
GRAFIT DENGAN ADITIF TEMBAGA (II) ASETAT
MONOHIDRAT**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

RENANTO PRAHASTIO PRATAMA

0405040597

FAKULTAS TEKNIK

DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JULI 2009

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Renanto Prahastio Pratama

NPM : 0405040597

Tanda Tangan :

Tanggal : 6 Juli 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Renanto Prahastio Pratama
NPM : 0405040597
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pembuatan dan Karakterisasi Pelat Bipolar Grafit dengan Aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Ir. Yunita Sadeli M.Sc ()
Pembimbing 2 : Dr.Ir.Bambang Prihandoko, M.T. ()
Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia Syahril, M.Sc ()
Penguji 2 : Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil.Eng. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbil'aalamin, dengan rendah hati dan syukur ke hadirat Allah swt, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan dengan harapan penelitian ini dapat membantu perkembangan dan penelitian lain tentang sumber energi alternatif, khususnya pada bidang *fuel cell* di Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ir. Yunita Sadeli, MSc., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, stamina, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini;
2. Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T., Andi Suhandi, S.Si. dan Pak Tomi Harianto dari Pusat Penelitian Fisika, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia yang telah menyediakan tempat, bahan baku serta alat, dan arahan dalam penelitian yang dilakukan oleh penulis;
3. Saudara Muhammad Zaki Azizi dan Ihsan Husaeni selaku rekan penulis dalam penelitian ini;
4. Kedua orang tua dan adik penulis yang telah memberikan semangat dan bantuan baik dukungan moral dan material;
5. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhirnya, semogalah penulisan skripsi ini dicatat sebagai amal shalih di sisi Allah dan bermanfaat adanya.

Depok, Juli 2009

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Renanto Prahastio Pratama

NPM : 0405040597

Departemen : Teknik Metalurgi dan Material

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI PELAT BIPOLAR GRAFIT DENGAN ADITIF TEMBAGA (II) ASETAT MONOHIDRAT

berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan 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 : 6 Juli 2009

Yang menyatakan

(Renanto Prahastio Pratama)

ABSTRAK

Nama : Renanto Prahastio Pratama
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pembuatan dan Karakterisasi Pelat Bipolar Grafit dengan Aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat

Fuel cell merupakan alat konversi energi kimia dari H₂ dan O₂ menuju energi listrik dengan air sebagai hasil sampingnya. Salah satu komponen utamanya adalah pelat bipolar, berfungsi untuk mendistribusikan gas H₂ dan O₂ serta mengalirkan arus listrik yang dihasilkan. Komposit pelat bipolar akan dibuat dengan *mixing* antara Epoxy Resin, Hardener, Grafit, Carbon Black dan 5 variabel penambahan aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat yaitu 0%, 5%, 10%, 15% dan 20% dari *filler* untuk meningkatkan konduktivitas. Pelat bipolar dihasilkan melalui metode *hot press*, dengan temperatur input 70 °C dan tekanan 300 kg/cm² selama 3 jam, pada cetakan berukuran 15x10 cm dan tebal 4 mm. Untuk mengidentifikasi sifat-sifatnya, akan dilakukan karakterisasi, yang terdiri atas pengujian XRD, SEM, EDX, densitas dan konduktivitas. Hasil pengujian menunjukkan, bahwa penambahan aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat akan menurunkan nilai konduktivitas dan menyebabkan kekuatan pelat bipolar menjadi sangat rendah. Konduktivitas dan densitas sampel dengan penambahan aditif mencapai titik optimum pada penambahan 5% aditif, yaitu 0.417 S/cm dan 2.307 gr/cm³.

Kata kunci:

Polymer electrolyte membrane fuel cell, pelat bipolar, komposit, grafit, konduktivitas, tembaga (II) asetat monohidrat

ABSTRACT

Name : Renanto Prahastio Pratama
Study Program: Metallurgical and Materials Engineering
Title : Fabrication and Characterization of Graphite Bipolar Plate with
the Addition of Copper (II) Acetate Monohydrate as the Additive

Fuel cell as the alternative energy resources, which converts the chemical energy of H₂ and O₂ directly into electrical energy with water as the main by-product from its reaction. One of its main components is bipolar plate, which uses to distribute H₂ and O₂ within the cell, also to carry electric current away. The composite bipolar plates were prepared by *mixing* between Epoxy Resin, Hardener, Graphite, Carbon Black and 5 different number of Copper (II) Acetate Monohydrate addition, namely 0%, 5%, 10%, 15% and 20% from filler, in expectation to increase the conductivity. Afterwards, the plates were made using hot press method, with 70 °C input temperature and pressured 300 kg/cm² for 3 hours, on a die with size 15x10 cm and 4 mm thick. The composite's properties were identified using characterization process; consist of XRD, SEM, EDX, density and conductivity testing. The results show that the addition of Copper (II) Acetate Monohydrate will reduce the conductivity and bringing down the strength of plate. The conductivity and density number of plates with additive addition, reach the optimum level at 5% addition, which are 0.417 S/cm and 2.307gr/cm³.

Keywords:

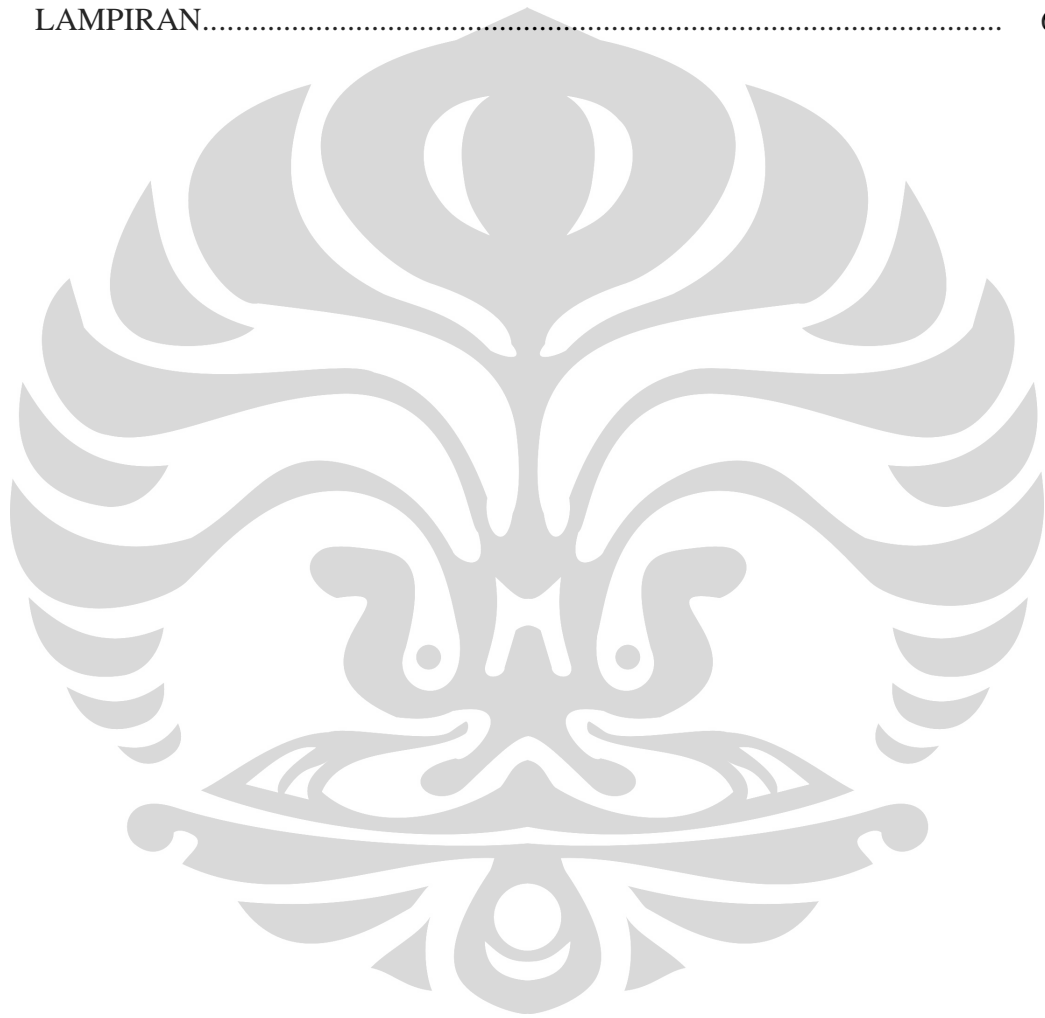
Polymer electrolyte membrane fuel cell, bipolar plate, composite, graphite, conductivity, copper (II) acetate monohydrate

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II DASAR TEORI PENELITIAN.....	6
2.1 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC).....	6
2.2 Pelat Bipolar Grafit sebagai Komponen Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell.....	11
2.3 Pelat Bipolar sebagai Komposit Matriks Polimer.....	15
2.4 Material Penyusun Komposit Pelat Bipolar.....	18
2.4.1 Epoxy Resin.....	18
2.4.2 Epoxy Hardener.....	21
2.4.3 Methanol.....	23
2.4.4 Grafit.....	24
2.4.5 Carbon Black.....	26
2.4.6 Tembaga (II) Asetat Monohidrat.....	27

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	30
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	30
3.2 Alat dan Bahan.....	31
3.3 Prosedur Pembuatan Pelat Bipolar.....	32
3.3.1 Ball Milling.....	32
3.3.2 Komposisi Material Penyusun Pelat Bipolar.....	33
3.3.3 Pencampuran.....	34
3.3.4 Pencetakan.....	35
3.3.5 Pembuatan Spesimen Pengujian.....	35
3.4 Karakterisasi Pelat Bipolar.....	36
3.4.1 Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i>	36
3.4.2 Pengamatan <i>Scanning Electron Microscope</i>	38
3.4.3 <i>Energy Dispersive X-Ray Analysis</i>	39
3.4.4 Pengujian Densitas.....	39
3.4.5 Pengujian Konduktivitas.....	41
BAB IV HASIL KARAKTERISASI DAN ANALISIS.....	42
4.1 Pengamatan Visual Sampel.....	42
4.1.1 Pengamatan Visual Sampel BP1.....	42
4.1.2 Pengamatan Visual Sampel BP2.....	42
4.1.3 Pengamatan Visual Sampel BP3.....	43
4.1.4 Pengamatan Visual Sampel BP4.....	44
4.1.5 Pengamatan Visual Sampel BP5.....	44
4.2 Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i>	45
4.3 Pengamatan dengan <i>Scanning Electron Microscope</i>	48
4.3.1 Hasil Pengamatan SEM Sampel BP1.....	48
4.3.2 Hasil Pengamatan SEM Sampel BP2.....	49
4.3.3 Hasil Pengamatan SEM Sampel BP3.....	50
4.3.4 Hasil Pengamatan SEM Sampel BP4.....	51
4.3.5 Hasil Pengamatan SEM Sampel BP5.....	52
4.4 Pengujian <i>Energy Dispersive X-Ray Analysis</i>	53
4.5 Pengujian Densitas.....	54
4.6 Pengujian Konduktivitas.....	56

4.7 Perbandingan Sifat Sampel Pelat Bipolar.....	57
4.8 Analisa Kegagalan Pembuatan Pelat Bipolar.....	59
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	62
DAFTAR ACUAN.....	63
LAMPIRAN.....	66



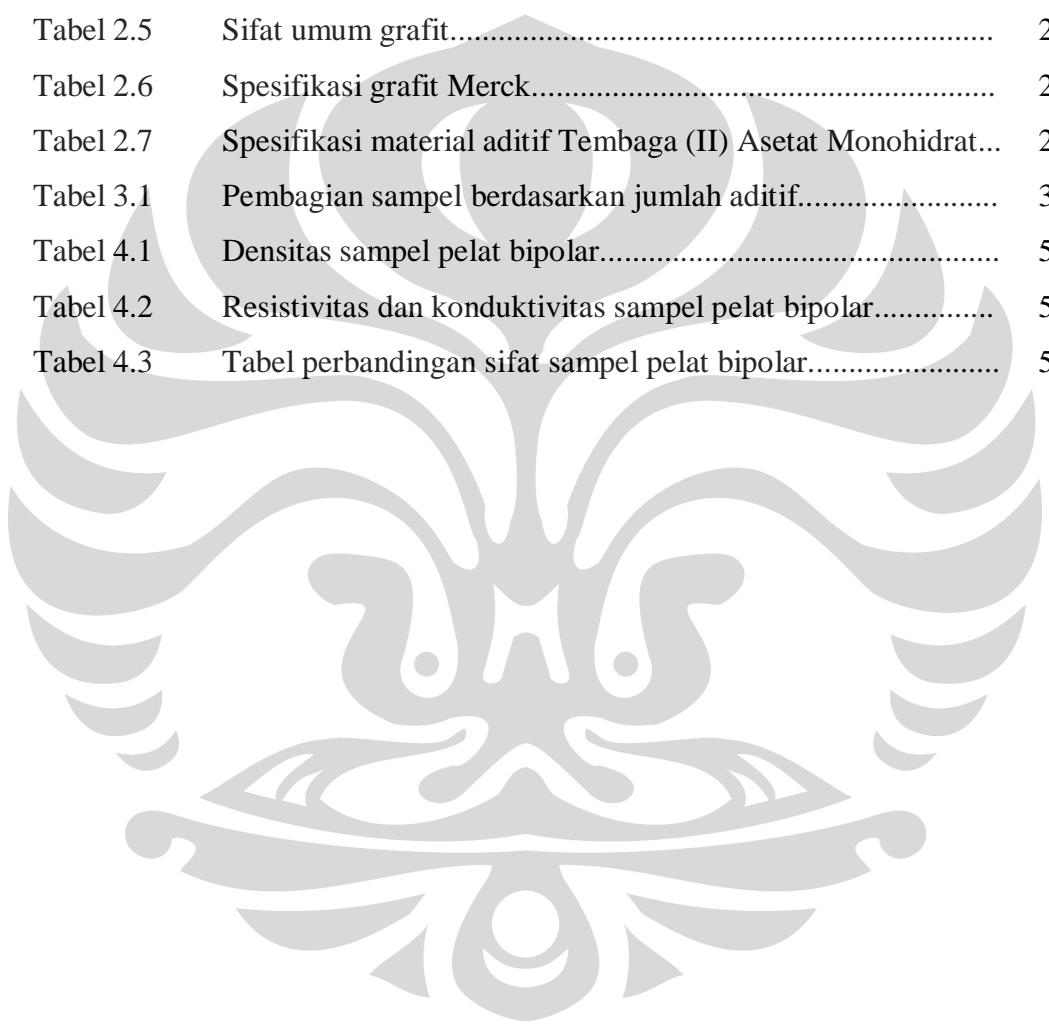
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Distribusi massa untuk satu <i>stack</i> PEMFC.....	2
Gambar 2.1	Bagan <i>single cell</i> PEMFC dengan detail elektroda positif dengan katalis dan <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL).....	7
Gambar 2.2	Struktur PEM <i>fuel cell</i>	8
Gambar 2.3	Proses <i>reforming</i> hidrogen.....	11
Gambar 2.4	Klasifikasi material untuk pelat bipolar PEMFC.....	13
Gambar 2.5	Proses pembuatan pelat bipolar.....	14
Gambar 2.6	<i>Filler Reinforce Composite</i>	15
Gambar 2.7	Struktur penyusun komposit.....	16
Gambar 2.8	Hasil pembasahan sesuai dengan <i>contact angle</i>	17
Gambar 2.9	Energi permukaan.....	17
Gambar 2.10	Contoh struktur kimia Epoxy Resin.....	19
Gambar 2.11	Struktur Epichlorhydrin dan Bisphenol A.....	19
Gambar 2.12	Reaksi pembentukan Epoxide.....	20
Gambar 2.13	Reaksi <i>curing</i> polimer.....	22
Gambar 2.14	Struktur senyawa Methanol.....	23
Gambar 2.15	Bijih dan struktur kristal grafit.....	24
Gambar 2.16	Klasifikasi alotropi karbon.....	25
Gambar 2.17	Mikrostruktur <i>carbon black</i> dalam komposit matriks polimer.....	27
Gambar 2.18	Struktur molekular Tembaga (II) Asetat Monohidrat.....	28
Gambar 2.19	Aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat.....	28
Gambar 3.1	Diagram alir pembuatan komposit pelat bipolar.....	30
Gambar 3.2	Diagram alir karakterisasi pelat bipolar.....	31
Gambar 3.3	<i>Ball mill</i> berbahan dasar alumina.....	33
Gambar 3.4	Skema alat difraktometer sinar-X.....	36
Gambar 3.5	Skematis perjalanan sinar X pada kisi benda.....	37
Gambar 3.6	Leo 420i <i>Secondary Electron</i> (SE) <i>Detector</i>	38

Gambar 3.7	Penimbangan sampel tercelup (<i>completely immersed</i>).....	40
Gambar 3.8	<i>Four Point Probe</i>	41
Gambar 3.9	Skema kerja <i>4-point probe</i>	41
Gambar 4.1	Sampel BP1 tanpa penambahan aditif.....	42
Gambar 4.2	Hasi pengamatan visual sampel BP2.....	43
Gambar 4.3	Sampel BP3 dengan aditif tembaga 10%.....	44
Gambar 4.4	Sampel BP4 dengan aditif tembaga 15%.....	44
Gambar 4.5	Sampel BP5 dengan berat 160 gr.....	45
Gambar 4.6	Grafik XRD sampel: (a) BP1, (b) BP2, (c) BP3, (d) BP4, dan (e) BP5.....	46
Gambar 4.7	Hasil pengamatan SEM sampel BP1 dengan perbesaran 2000X.....	48
Gambar 4.8	Hasil pengamatan SEM sampel BP2 dengan perbesaran 2000X.....	49
Gambar 4.9	Hasil pengamatan SEM sampel BP3 dengan perbesaran 2000X.....	50
Gambar 4.10	Hasil pengamatan SEM sampel BP4 dengan perbesaran 2000X.....	51
Gambar 4.11	Hasil pengamatan SEM sampel BP5 dengan perbesaran 2000X.....	52
Gambar 4.12	Hasil pengujian EDX.....	53
Gambar 4.13	<i>Composite Bulk Density</i>	55
Gambar 4.14	<i>Composite Bulk Conductivity</i>	56
Gambar 4.15	Struktur molekul Tembaga (II) Asetat Monohidrat.....	59

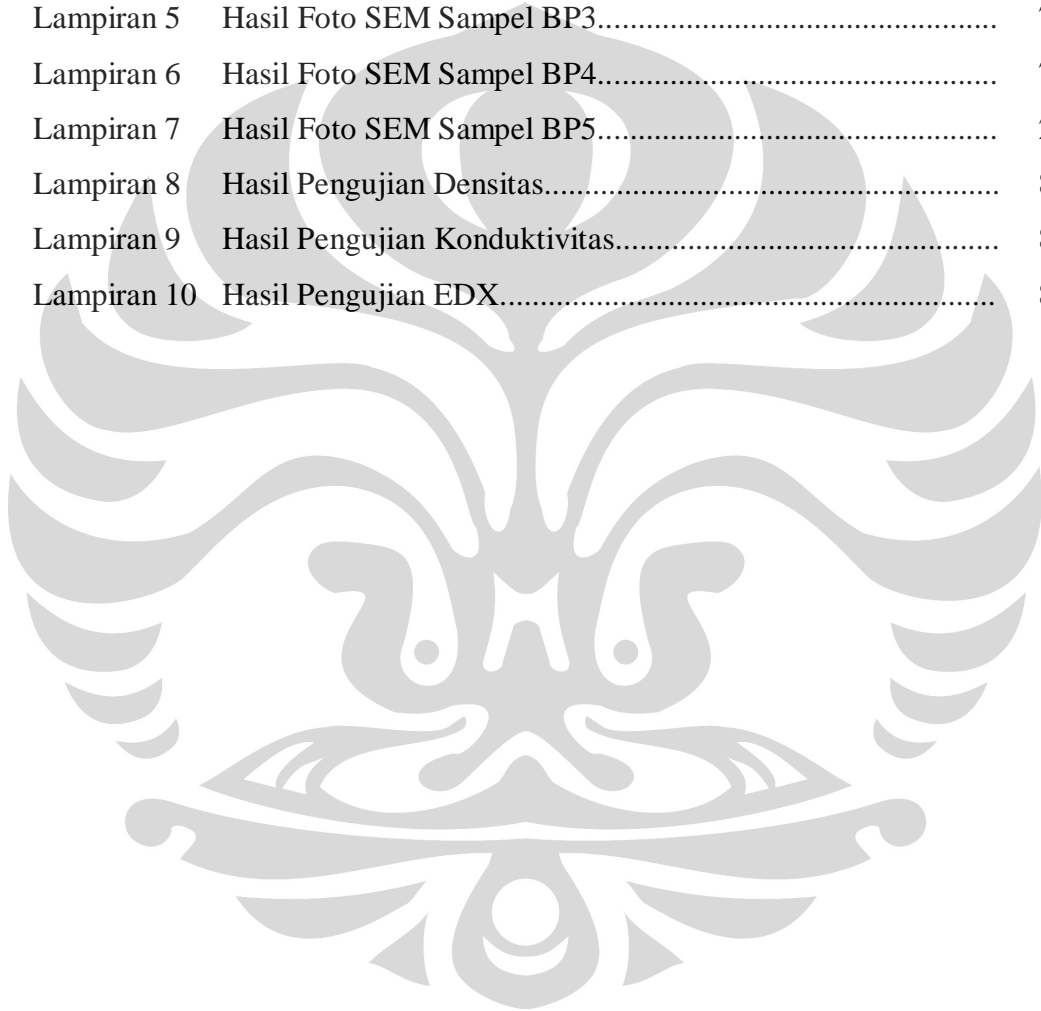
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat komposit yang dipengaruhi oleh <i>interface</i>	16
Tabel 2.2	Sifat umum Epoxy Resin.....	20
Tabel 2.3	Sifat umum Epoxy Hardener.....	22
Tabel 2.4	Sifat umum Methanol.....	23
Tabel 2.5	Sifat umum grafit.....	24
Tabel 2.6	Spesifikasi grafit Merck.....	26
Tabel 2.7	Spesifikasi material aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat...	29
Tabel 3.1	Pembagian sampel berdasarkan jumlah aditif.....	34
Tabel 4.1	Densitas sampel pelat bipolar.....	54
Tabel 4.2	Resistivitas dan konduktivitas sampel pelat bipolar.....	56
Tabel 4.3	Tabel perbandingan sifat sampel pelat bipolar.....	58



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Komposisi Material Penyusun Komposit Pelat Bipolar.....	66
Lampiran 2	Hasil Pengujian X-Ray Diffraction.....	67
Lampiran 3	Hasil Foto SEM Sampel BP1.....	71
Lampiran 4	Hasil Foto SEM Sampel BP2.....	73
Lampiran 5	Hasil Foto SEM Sampel BP3.....	75
Lampiran 6	Hasil Foto SEM Sampel BP4.....	77
Lampiran 7	Hasil Foto SEM Sampel BP5.....	29
Lampiran 8	Hasil Pengujian Densitas.....	81
Lampiran 9	Hasil Pengujian Konduktivitas.....	82
Lampiran 10	Hasil Pengujian EDX.....	84



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

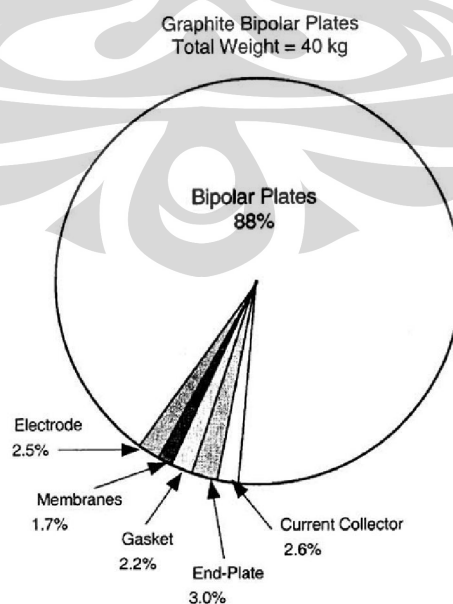
Energi listrik merupakan suatu bentuk energi yang sudah sangat umum digunakan dalam kehidupan kita sehari-hari. Walaupun demikian, sebagian dari energi listrik yang kita konsumsi masih dihasilkan dari proses pembakaran batu bara, minyak bumi, maupun gas alam dapat dipastikan menghasilkan produk samping yang menimbulkan polusi. Fuel Cell sebagai salah satu alternatif penghasil energi listrik, memiliki kelebihan-kelebihan dibandingkan alternatif lainnya terutama dari segi efisiensi, portabilitas, dan emisi yang dihasilkan. Hal inilah yang menjadi alasan mengapa Fuel Cell menjadi suatu sumber energi alternatif yang menjanjikan [1].

Fuel cell ditemukan oleh Francis Bacon (1904-1992), pria lulusan Cambridge University dan berkebangsaan Inggris. Bacon yang memulai penelitiannya sejak tahun 1930, menemukan fuel cell yang menggunakan elektrolit basa (KOH), yang kemudian disebut *alkaline fuel cell* (fuel cell basa). Berselang setelah itu, di tahun 1950-an, perusahaan Amerika, General Electric (GE), berhasil mengembangkan fuel cell tipe baru, dengan polimer membran sebagai elektrolitnya, yang kemudian disebut PEMFC. PEMFC yang ditemukan oleh GE mampu menghasilkan sekitar 1 KWatt, dan memiliki keunggulan pada design, lebih compact, bila dibandingkan fuel cell yang ditemukan oleh Francis Bacon saat itu.

Fuel cell merupakan alat konversi energi elektrokimia yang mengubah energi kimia dari hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) ke dalam energi listrik dan panas melalui reaksi reduksi elektrokimia masing-masing anoda (kutub positif) dan katoda (kutub negatif) dari sel dengan air (H_2O) sebagai hasil sampingnya [1].

Polymer Electrolyte Membrane (PEM) fuel cell adalah salah satu sumber energi bersih menjanjikan yang sedang marak dikembangkan. Keuntungan utamanya adalah efisiensi arus sampai dengan 60%, densitas energi yang tinggi dan kemampuan untuk mengolah bahan bakar tanpa adanya polutan yang dihasilkan [2]. Walaupun memiliki keunggulan-keunggulan tersebut, penetrasi PEMFC ke pasar terbatas oleh masalah harga dan reliabilitas. Penelitian dan pengembangan yang lebih luas untuk meningkatkan kemampuan katalis dan membran, juga studi mengenai sifat dan perilaku *fuel cell*, sejauh ini tidak mendapatkan hasil yang begitu sukses. Dan pada akhirnya, target penggunaan dan komersialisasi *fuel cell* secara luas, termasuk aplikasi pada fasilitas transportasi, ditunda dari 2010 ke 2015, karena masih banyak persoalan pasar dan teknis yang harus diatasi. Tantangan untuk para pengembang *fuel cell* termasuk: menentukan sumber bahan bakar yang tepat, regulasi industri, *safety* dan dukungan masyarakat sangat diperlukan [2].

Pengembangan *fuel cell* tipe PEMFC, menggunakan material dengan bahan membran polimer, katalis elektroda dan pelat bipolar grafit. Pelat bipolar merupakan bagian yang mendominasi dari suatu *fuel cell*, yaitu mengisi 80-90% volume dan berat dari *fuel cell*, serta memakan biaya 60% dari seluruh biaya PEMFC [1]. Distribusi massa untuk suatu susunan PEMFC ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Distribusi massa untuk satu *stack* PEMFC [1]

Dengan suatu rancangan pelat bipolar yang terdiri dari material pendukung ekonomis serta dapat menghasilkan sifat konduktivitas dan mekanis yang baik, dapat dihasilkan suatu PEMFC dengan biaya yang lebih rendah namun mempunyai kemampuan untuk menghasilkan listrik yang lebih tinggi. Metode untuk mereduksi biaya pelat bipolar yang akan ditempuh dalam penelitian ini adalah melalui penggunaan Grafit dan Epoxy Resin sebagai bahan dasarnya, serta penambahan aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat untuk meningkatkan nilai konduktivitasnya, semua untuk menghasilkan suatu pelat bipolar komposit matriks polimer yang ekonomis, kuat dan baik.

1.2 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Secara umum, penelitian ini akan dibagi dalam 3 tahapan yaitu :

1. Pembuatan pelat bipolar komposit yang terdiri atas Epoxy resin & Hardener sebagai matriks dasar, Grafit sintetis sebagai *reinforcement* berbentuk partikel, dan *Carbon Black* sebagai katalis dengan penambahan 5 jenis variabel aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat yaitu 0%, 5%, 10%, 15% dan 20% (dari total *filler*).
2. Pembuatan spesimen untuk karakterisasi, melalui pemotongan sampel pelat bipolar dan pengamplasan.
3. Tahap karakterisasi, yang terdiri dari beberapa pengujian, yaitu terdiri atas pengujian konduktivitas, pengambilan nilai densitas dari kelima sampel, pengamatan struktur mikro dengan SEM, pengidentifikasian unsur yang terdapat dalam sampel dengan EDX serta senyawa yang terbentuk pada sampel melalui XRD.

Penambahan aditif tembaga dimaksudkan untuk meningkatkan konduktivitas dari pelat bipolar agar PEMFC dapat menghasilkan jumlah listrik yang lebih besar dengan sifat mekanis yang lebih baik dan bahan dasar yang lebih ekonomis. Pada penelitian ini dibuat sejumlah pelat bipolar dengan variabel penambahan aditif

yang berbeda-beda, dengan tujuan untuk menentukan komposisi yang optimum antara grafit dan aditif tembaga, berdasarkan nilai konduktivitas yang didapatkan.

Dengan menganalisis hasil karakterisasi pelat bipolar, dapat diketahui apakah pelat bipolar dengan penambahan aditif tembaga mempunyai sifat mekanis yang baik serta konduktivitas yang dihasilkan dapat meningkat sesuai dengan ekspektasi sebelum penelitian.

1.3 Tujuan Penelitian

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

- a. mengidentifikasi apakah penambahan aditif tembaga dapat dilakukan pada pembuatan pelat bipolar yang terdiri dari Epoxy resin dan Grafit
- b. mengetahui adakah peningkatan konduktivitas yang dihasilkan dari penambahan aditif tembaga pada pelat bipolar
- c. mendapatkan komposisi yang optimal antara grafit dan aditif, untuk menghasilkan konduktivitas dengan nilai paling baik
- d. mengetahui kemampuan untuk diproduksi (*productability*) pelat bipolar grafit dengan penambahan aditif tembaga.

1.4 Sistematika Penulisan

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

Bab1 Pendahuluan

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

Bab 2 Dasar Teori

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

Bab 3 Metodologi Penelitian

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

Bab 4 Hasil Karakterisasi dan Analisis

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

Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Membahas mengenai kesimpulan dari hasil penelitian pembuatan pelat bipolar dengan aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat serta saran untuk mendapatkan pelat bipolar dengan sifat yang baik.

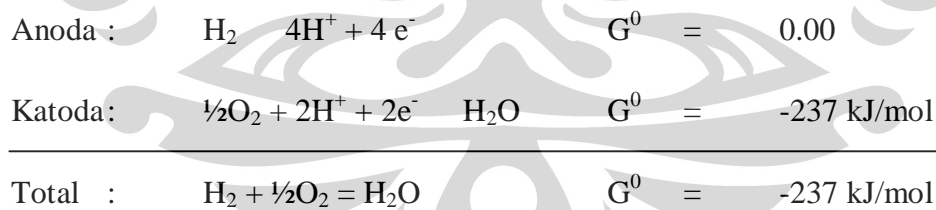
BAB II

DASAR TEORI PENELITIAN

2.1 *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)*

PEMFC adalah alat konversi energi elektrokimia yang akan mengubah hidrogen dan oksigen menjadi air, secara bersamaan menghasilkan energi listrik dan panas. Dalam prosesnya yang terdiri atas lapisan elektrolit, yang salah satu sisinya merupakan daerah kontak anoda berpori dengan katoda berpori pada sisi lainnya [1]. PEMFC dibagi menjadi 2 jenis menurut bahan bakar yang digunakan, yaitu *hydrogen fuel cell* dan *direct methanol fuel cell*. *Hydrogen fuel cell* menggunakan gas H₂ sebagai bahan bakar dan mempunyai performa *fuel cell* dan tingkat efisiensi yang sangat baik, sedangkan *direct methanol fuel cell* menggunakan methanol cair sebagai bahan bakar dengan performa dan efisiensi *fuel cell* yang cukup, namun menghilangkan kewajiban untuk menggunakan *reformer* sebagai penghasil hidrogen [2].

Reaksi setengah sel (*half cell reactions*) yang terjadi pada *hydrogen* PEMFC adalah sebagai berikut:



Persamaan perubahan energi bebas Gibbs terhadap reaksi kimia mempunyai korelasi dengan voltase tegangan yang akan dihasilkan pada sel [2]:

$$G = -n F V_0 \quad (2.1)$$

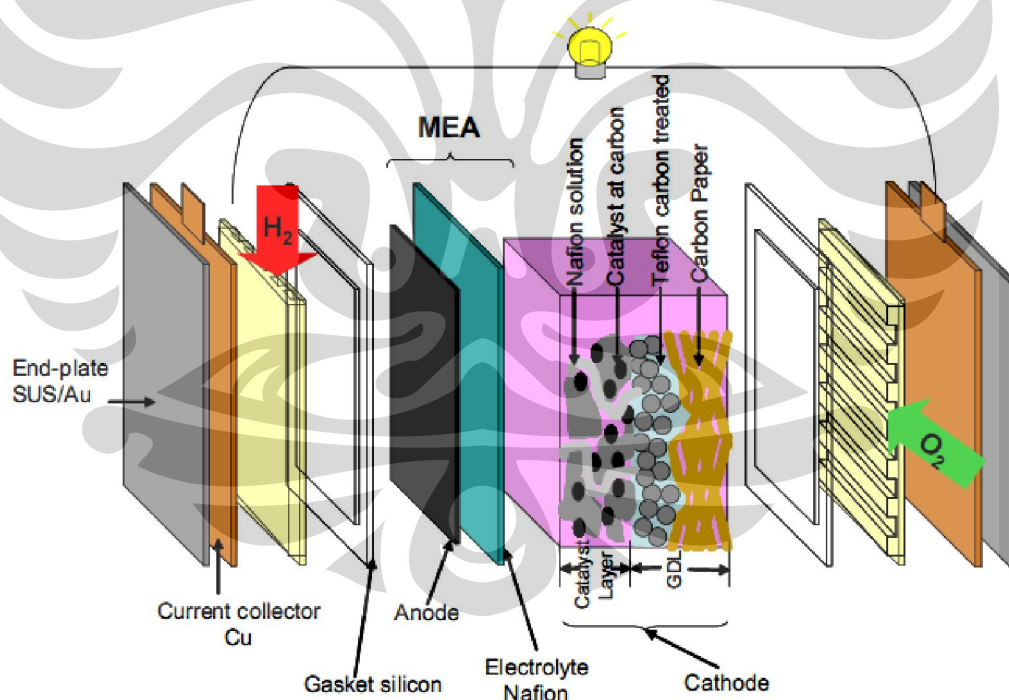
Dimana n adalah jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi, F adalah konstanta Faraday, dan V_0 adalah tegangan sel untuk kesetimbangan termodinamika tanpa adanya arus yang mengalir, contoh kesetimbangan pada kondisi sirkuit terbuka.

Karena itu, tegangan sel pada kesetimbangan, V_0 , pada temperatur 25 °C untuk sel bahan bakar hidrogen dapat ditemukan dari persamaan [2]:

$$V_0 = \frac{-\Delta G}{nF} = 1.23V \quad (2.2)$$

Nilai tegangan sel pada kesetimbangan ini adalah perbedaan dari potensial kesetimbangan elektroda antara katoda dan anoda. Komponen utama penyusun sebuah PEM *fuel cell* adalah [2]:

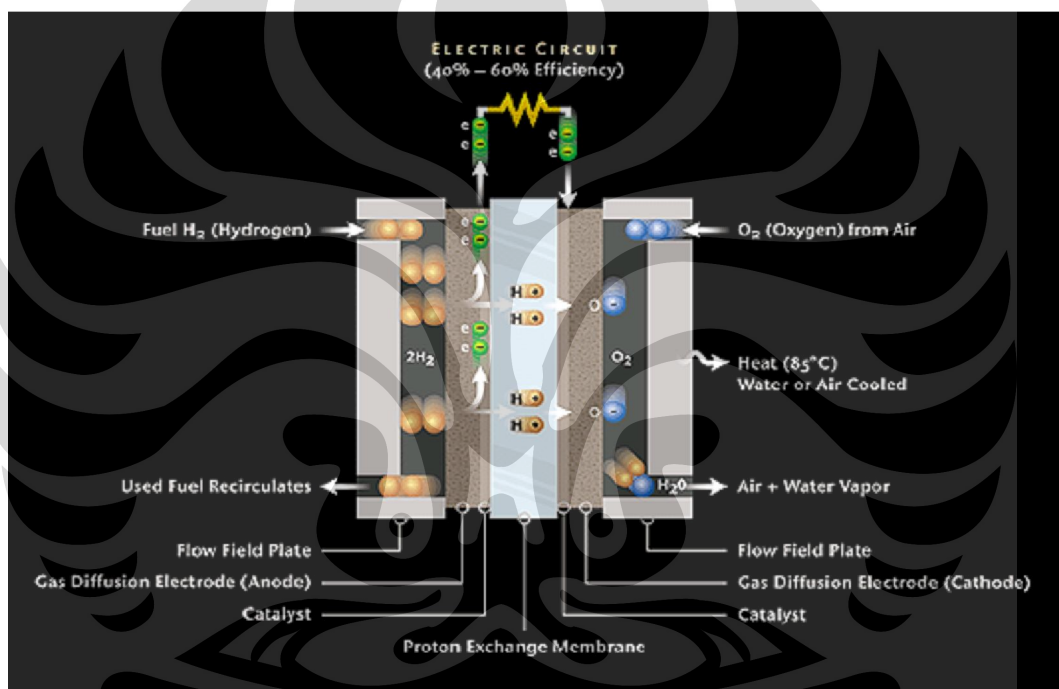
- i. Elektroda : Anoda dan Katoda
- ii. *Polymer Electrolyte Membrane* (PEM)
- iii. *Gas Diffusion Layer* (GDL)
- iv. *Collector Graphite Plates*



Gambar 2.1 Bagan *single cell* PEMFC dengan detail elektroda positif dengan katalis dan *Gas Diffusion Layer* (GDL) [2]

Pada Gambar 2.2 dibawah, akan terlihat bahwa bahan bakar dikonversikan menjadi proton (H^+) dan elektron (e^-) saat mencapai *interface* antara katalis anoda

(umumnya digunakan material dengan bahan dasar Platinum atau Nikel) dengan elektrolit [2]. Kemudian proton mengalir melalui *polymer electrolyte membrane* menuju daerah katoda, sedangkan elektron tidak dapat berdifusi melewati membran, ini merupakan sifat unik dari PEM karena hanya proton yang dapat berdifusi melewati membran [2]. Gas hidrogen tersebut melepaskan elektron dengan cara ionisasi pada katalis di anoda kemudian proton yang bermuatan positif menuju katoda dengan menembus membran tipis yang berpori, sementara itu elektron melalui sirkuit luar mengalir ke arah katoda dan dipergunakan sebagai sumber tenaga listrik [1].



Gambar 2.2 Struktur PEM *fuel cell* [1]

Elektron (e^-) yang terhalang oleh membran kemudian terpaksa mengalir melalui *external wire* menuju daerah katoda dan mengirimkan sebagian dari energi mereka untuk menghasilkan energi listrik. Pada katoda, proton dan elektron yang telah berkurang energinya bereaksi dengan oksigen untuk menghasilkan air [2]. Molekul oksigen tersebut akan bergabung dengan empat elektron, menjadi ion oksigen yang bermuatan negatif untuk selanjutnya bergabung lagi dengan proton yang mengalir dari anoda [1]. Setiap ion oksigen akan melepaskan kedua muatan negatifnya dan bergabung dengan dua proton, sehingga terjadi oksidasi menjadi air [1].

Secara teoritis, substansi apapun yang mempunyai kemampuan oksidasi kimia dapat digunakan secara kontinu sebagai bahan bakar pada anoda *fuel cell*. Pada katoda, cairan apapun yang dapat tereduksi secara sempurna dapat digunakan sebagai oksidan [2]. Namun, harga, ketersediaan, dan reaktivitas merupakan kunci dari pemilihan mereka.

Oksigen dalam bentuk gas atau udara bebas, adalah oksidan yang paling umum digunakan karena tingkat ketersediaan dan ekonomisnya yang cukup baik. Reaksi elektrokimia terjadi pada permukaan elektroda yang terlapis oleh lapisan karbon (*carbon paper/cloth*), yang disebut *gas diffusion layer* (GDL). Karbon yang bersifat konduktif dan berpori, menyediakan jalur kepada aliran gas dan elektron untuk melewati lapisan tersebut [2]. Partikel katalis yang terdispersi dalam material ionomerik dapat membantu menghantarkan proton. Membran dalam sel PEM umumnya adalah elektrolit padat yang disebut Nafion, suatu polimer asam *perfluorosulfonic* yang diproduksi oleh Dupont. Membran ini mengizinkan proton untuk berdifusi, tetapi menghalangi elektron untuk melewatinya [2]. Transfer proton melewati membran dibantu oleh adanya medan listrik yang tercipta pada membran. Performa suatu sel bahan bakar ditentukan oleh plot grafik antara *current density* (rapat arus) dengan *voltage* (tegangan). Hasil ini dapat digunakan untuk menggambarkan kemampuan *fuel cell*, dengan tujuan untuk pengembangan desain, dan optimisasi [2].

PEMFC mempunyai beberapa keunggulan utama [1].

- Memberikan densitas daya yang tinggi
- Mempunyai kelebihan dalam hal berat dan volume dibandingkan dengan sel bahan bakar jenis lain.
- Beroperasi pada temperatur yang relatif rendah, yaitu sekitar 80°C (176°F), rendahnya suhu operasi ini menyebabkan rendahnya waktu pemanasan (*warm-up time*).
- Penggunaan elektrolit sebagai membran polimer yang bentuknya tipis dan ringan, sehingga baik untuk aplikasi transportasi
- Tidak adanya penggunaan fluida yang bersifat korosif seperti jenis *fuel cell* lain.

- Memiliki kerapatan daya yang cukup tinggi, sehingga PEM banyak digunakan sebagai sumber daya bagi alat-alat elektronik *portable* dan fasilitas transportasi.

Keterbatasan dari PEMFC adalah: menggunakan gas hidrogen sebagai bahan bakar yang notabene sulit untuk dihasilkan dan elektroda platina dengan harga yang relatif cukup mahal [1]. Gas hidrogen juga mempunyai kesulitan untuk disimpan dan dipindahkan karena ukuran molekul yang sangat kecil sehingga sulit untuk dicairkan serta mudah terbakar [1]. Mengenai ongkos produksi dan operasi yang cukup mahal, beberapa riset dan penelitian telah berusaha untuk mencoba menggunakan metode serta material yang berbeda untuk menghasilkan komponen-komponen seperti MEA *Membrane Electrode Assembly* (elektroda, membran, elektrolit, *gas diffusion layer*, dan katalis) dan pelat bipolar supaya dapat lebih ekonomis [3].

Hidrogen yang merupakan bahan bakar *fuel cell*, didapat dengan cara melakukan reaksi dengan uap air. Reaksi yang terjadi antara bahan bakar seperti metan (gas bumi), methanol dan naphta yang diberi uap air pada proses *reforming*, sehingga terdapat *feed gas* atau hidrogen adalah sebagai berikut [4]:

- *Reforming* gas bumi (methan)

$$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$$
- *Reforming* methanol (methyl alcohol)

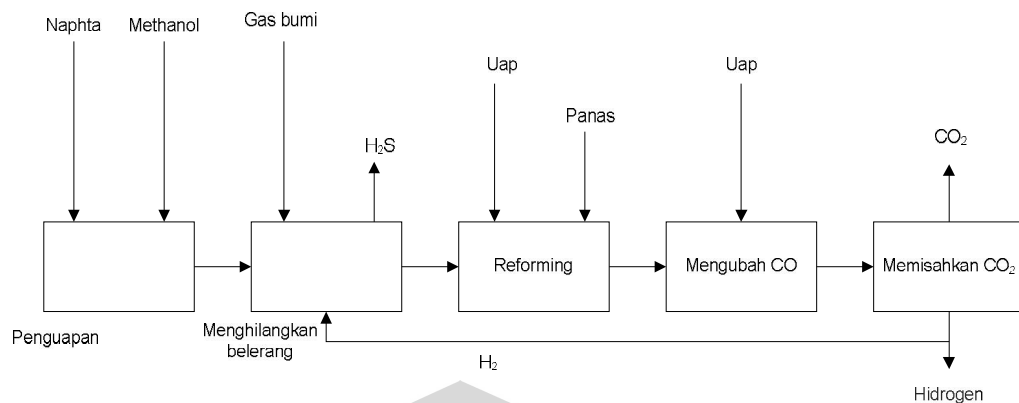
$$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$$
- *Reforming* Naphta

$$\text{C}_n\text{H}_m + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow n\text{CO} + (n + m/2) \text{H}_2$$
- Reaksi sampingan dan reaksi lanjutan

$$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$$

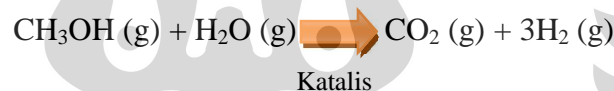
$$\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$$

Sedangkan proses yang terjadi pada saat *reforming* ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2.3 Proses *reforming* hidrogen [4]

Usaha memperoleh hidrogen dengan mudah juga sedang diusahakan dengan berbagai cara misalnya memperkecil reaktor reformer dengan bahan baku LPG atau gas methane, menguraikan metanol yang dibuat dari pabrik besar tetapi dalam bentuk cair sehingga mudah untuk ditransport [1]. Gas hidrogen dapat juga diperoleh dari methanol setelah diuraikan menjadi gas CO dan hidrogen, kemudian gas CO dioksidasi menjadi CO₂ dan air [1]. Metode yang sedang marak dikembangkan untuk menghasilkan H₂ adalah dari methanol melalui *steam reforming* pada kondisi menengah [5]:



Reforming dilakukan dengan bantuan penambahan katalis yaitu Cu (tembaga), M_xO_y atau Al₂O₃ [5].

2.2 Pelat Bipolar Grafit sebagai Komponen *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*

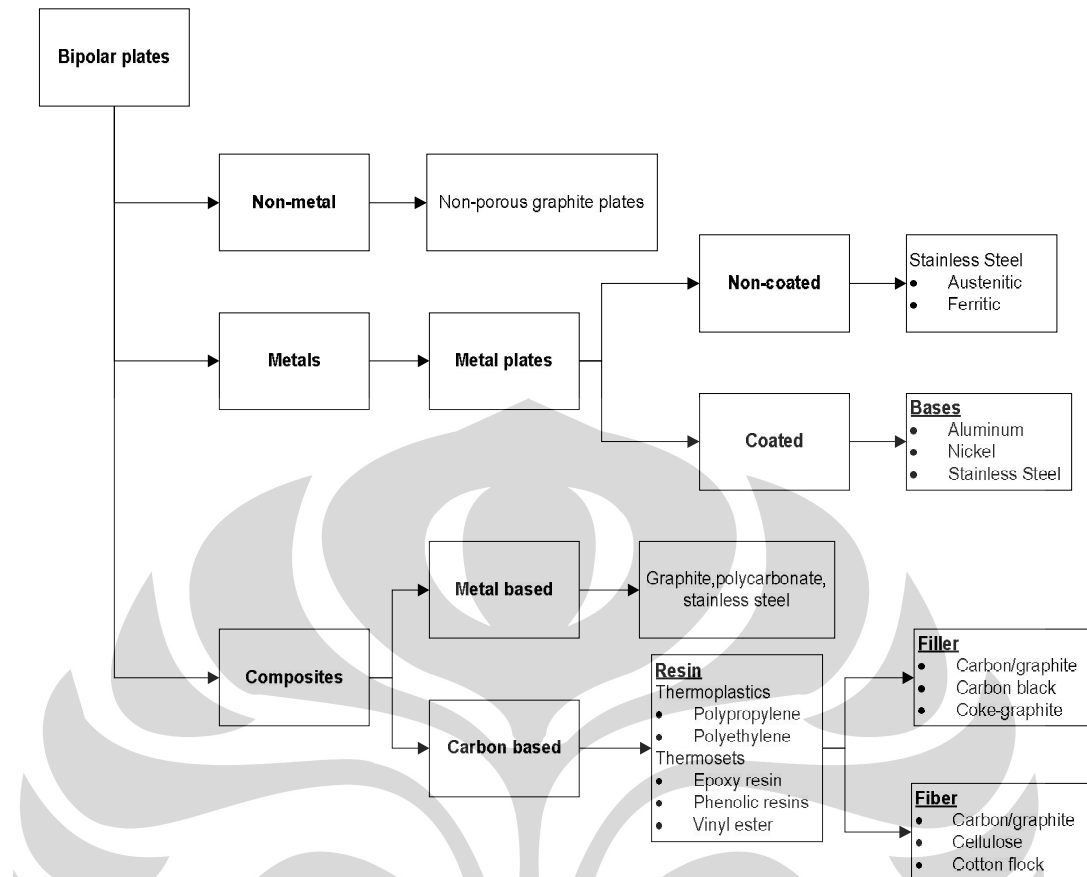
Pelat bipolar adalah komponen yang paling utama dalam *polymer electrolyte membrane fuel cell* (PEMFC), dikatakan tersebut karena beratnya mendominasi 70-90% dari berat total sebuah PEMFC dan harganya memakan 30-60% dari harga total sebuah susunan (*stack*) yang terdiri dari beberapa buah PEMFC. Fungsi pelat bipolar dalam PEMFC adalah [3]:

- a) Mendistribusi dan mengalirkan gas hidrogen (bahan bakar) dan oksigen didalam sel
- b) Sebagai pemisah antara satu sel dengan sel yang lain dalam sebuah susunan yang terdiri dari beberapa buah sel bahan bakar
- c) Untuk mengalirkan arus listrik yang dihasilkan keluar dari sel
- d) Memfasilitasi kontrol dan pengaturan air yang terdapat didalam sel
- e) Mengendalikan panas yang timbul akibat reaksi elektrokimia

Agar dapat berfungsi secara baik, material yang digunakan untuk menghasilkan pelat bipolar harus memiliki sifat mekanis dan kimia yang memenuhi persyaratan untuk menjalankan fungsi-fungsi diatas, berikut syarat-syarat ideal dari sebuah pelat bipolar [3]:

- ü Konduktivitas elektrik à suatu pelat bipolar harus mempunyai nilai konduktivitas diatas 10 S/cm dan resistivitas dibawah 0.01 Ω -cm.
- ü Konduktivitas thermal à setinggi mungkin (semakin tinggi lebih baik)
- ü Densitas à nilai densitas (rapat massa) harus lebih kecil dari 5 gr/cm³
- ü Permeabilitas gas/hidrogen à pelat bipolar yang baik memiliki nilai permeabilitas gas lebih rendah dari 10⁻⁴ cm³/s cm²
- ü Kekuatan tekan (*compressive strength*) à pelat bipolar yang kuat harus memiliki nilai kekuatan lebih besar dari 22 lb/in²
- ü Ketahanan korosi (*corrosion resistance*) à harus mampu menahan laju korosi pada nilai dibawah 0.016 mA/cm².

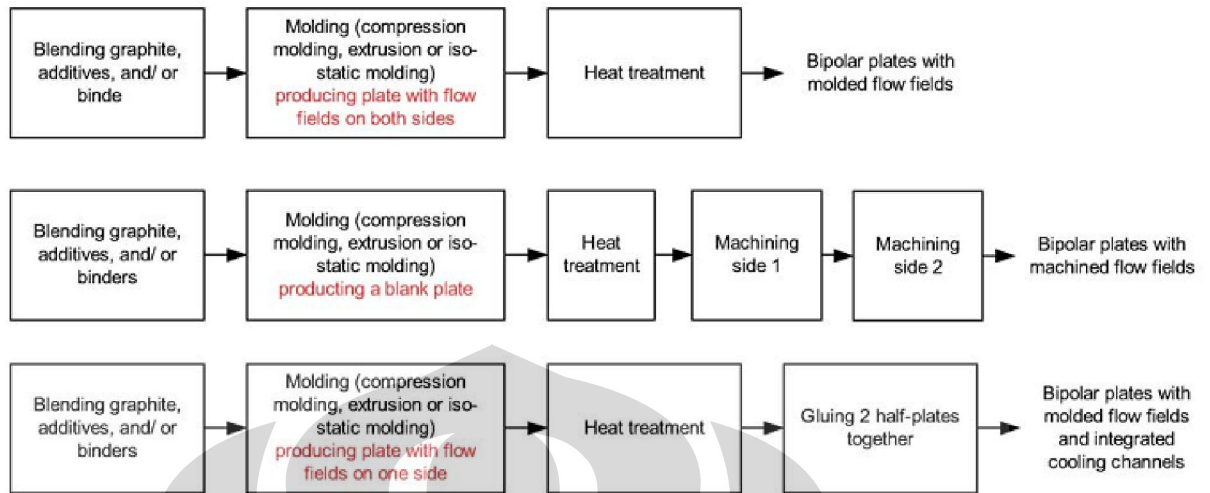
Material yang dapat digunakan untuk menghasilkan pelat bipolar diklasifikasikan menjadi 3 jenis, klasifikasi material penyusun pelat bipolar secara detail akan ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Klasifikasi material untuk pelat bipolar PEMFC [6]

Material yang umum digunakan untuk menghasilkan pelat bipolar adalah grafit karena konduktivitas dan stabilitas kimianya yang baik [3]. Tetapi terdapat beberapa kekurangan pada grafit yaitu, harganya yang cukup tinggi, kekuatan mekanis yang rendah, dan tingkat kesulitan pada proses *machining* untuk membuat *gas flow channels* (saluran alir gas) karena sifatnya yang sangat getas. Untuk menghasilkan pelat bipolar yang lebih efisien, ekonomis dan ringan maka digunakan material berbeda yaitu komposit, bisa berupa Komposit Matriks Logam (*Metal Matrix Composite*) dan Komposit Matriks Polimer (*Polymer Matrix Composite*). Pada Gambar 2.5 berikut adalah pemaparan 3 jenis metode pembuatan pelat bipolar grafit beserta langkah kerjanya.

GRAPHITE PLATES



Gambar 2.5 Proses pembuatan pelat bipolar [7]

Komposit matriks polimer dengan unsur penguat (*reinforcement*) grafit dan karbon, digunakan dalam penelitian ini karena sifat polimer yang mempunyai rasio kekuatan-berat yang tinggi (*high strength-to-weight ratio*), ketahanan korosi dan keuletan yang sangat baik, dan kemampuan untuk dibentuknya sangat mudah sehingga akan menurunkan biaya produksi [8]. Komposit dengan epoxy resin sebagai matriks, epoxy hardener sebagai katalis dan grafit sebagai unsur penguat digunakan dalam penelitian ini. Material-material tersebut sangat umum dan mudah didapatkan di pasar.

Pelat Bipolar harus dibuat setipis dan seringan mungkin, ekonomis, dan mudah dibentuk serta di-*machining* [9]. Juga harus mempunyai kestabilan thermal dan sifat mekanis yang baik, karena fungsi utamanya untuk menghubungkan sel-sel secara elektrik dan menyalurkan gas pada Fuel Cell [9].

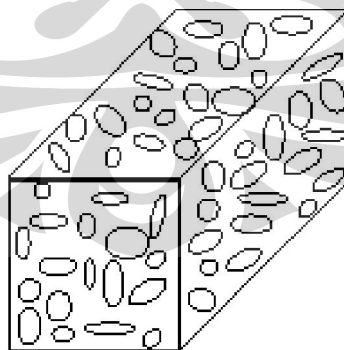
Sifat BPP yang diharapkan akan dihasilkan setelah dilakukan beberapa pengujian dan karakterisasi adalah sebagai berikut:

- Ukuran butir dan persebaran butir yang optimum, ukuran yang diharapkan tidak mencapai nanometer karena dikhawatirkan akan terjadi aglomerasi (maksimal 200 nm)
- Kontak permukaan antara epoxy dan grafit yang besar

- Tingkat porositas yang terdapat dalam pelat bipolar harus seminimal mungkin
- Densitas bipolar plate yang cukup besar
- Mempunyai kekuatan yang baik terhadap tekanan dan gesekan.

2.3 Pelat Bipolar sebagai Komposit Matriks Polimer

Komposit merupakan kombinasi dari dua material atau lebih yang memiliki fasa yang berbeda menjadi suatu material baru yang memiliki sifat lebih baik dari keduanya, jika perpaduan ini terjadi dalam skala makroskopis maka disebut sebagai komposit [8]. Pelat bipolar yang akan digunakan dalam penelitian ini merupakan jenis Komposit Matriks Polimer atau Polymer Matrix Composite, dengan Epoxy resin sebagai matriks polimer thermoset dan keramik grafit sebagai fasa penguat (*reinforcement phase*), grafit ditambahkan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan (*strength and stiffness*), konduktivitas listrik dan thermal serta kemampuan untuk diaplikasikan pada temperatur tinggi pada komposit [8]. Jenis komposit pelat bipolar yang akan dihasilkan dalam penelitian ini berdasarkan klasifikasi bentuk *reinforce*-nya adalah *particle reinforce composite*, dengan Grafit sebagai penguat *filler* seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.6. Sifat yang dimiliki material dengan penyusun ini adalah isotropi.



Gambar 2.6 *Filler Reinforce Composite* [8]

Selain beberapa keuntungan dasar menggunakan polimer sebagai matriks seperti stabilitas dimensi dan *moisture resistance* yang baik, fungsi matriks polimer dalam komposit adalah [8]:

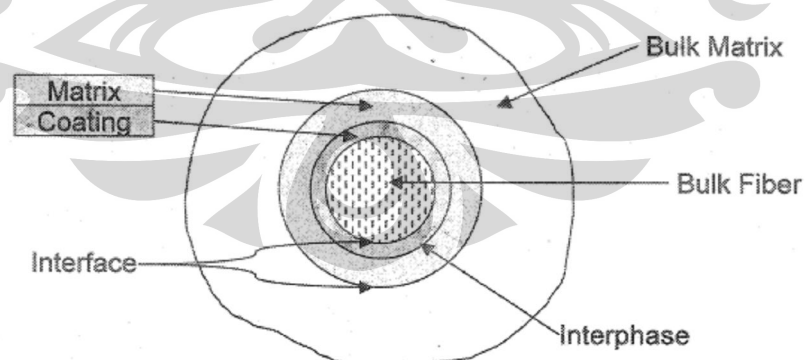
- Mendistribusikan/transfer tegangan antara penguat dan penguat lainnya
- Memproteksi dari pengaruh lingkungan yang buruk seperti zat korosif
- Melindungi permukaan penguat dari gaya gesek/abrasi eksternal

Adapun sifat dan kekuatan dari komposit matriks polimer ditentukan oleh faktor-faktor berikut:

- a) *Interface*, atau *interfacial bond* merupakan permukaan antara unsur penguat dan matriks yang menentukan proses transfer tegangan dari matriks – *reinforcement* – matriks, akan mempunyai pengaruh pada sifat mekanis dan fisik komposit contohnya:

Tabel 2.1 Sifat komposit yang dipengaruhi oleh *interface*

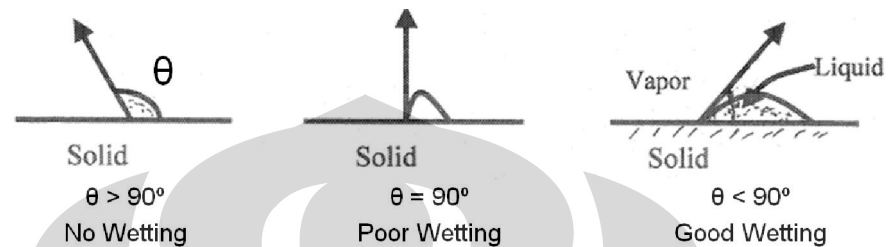
<i>Composite strength</i>	<i>Critical fiber length</i>
<i>Modes of failure</i>	<i>Environmental resistance</i>
<i>Young's modulus</i>	<i>Structural stability at elevate temperatures</i>
<i>Interlaminar shear strength</i>	<i>Fracture and fatigue behaviour</i>
<i>Compressive strength</i>	<i>specific strength</i>
<i>creep resistance</i>	<i>specific stiffness</i>



Gambar 2.7 Struktur penyusun komposit [8]

- b) *Wetability*, adalah kemampuan matriks Epoxy untuk membasahi seluruh permukaan grafit agar terjadi kekuatan ikatan yang baik dan mereduksi jumlah porositas. Agar terjadi pembasahan yang baik, ketika *contact angle*

antara matriks dan penguat $> 90^\circ$, perlu ditambahkan *wetting agent* untuk mengurangi tegangan/energi permukaan (*surface tension*). Karena semakin tinggi *surface tension*, pembasahan dan perlekatan antara grafit dengan epoxy akan menjadi semakin sulit. *Contact angle* yang baik untuk terjadi pembasahan harus $< 90^\circ$.

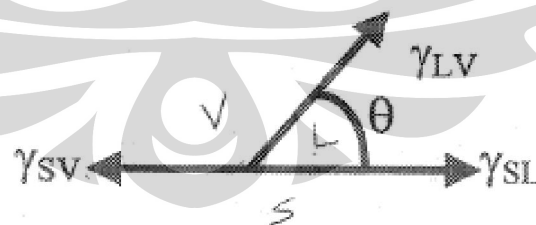


Gambar 2.8 Hasil pembasahan sesuai dengan *contact angle* [8]

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

$$W_A = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \quad (2.3)$$

dimana γ = surface free energy



Gambar 2.9 Energi permukaan [8]

- c) Karakteristik Matriks dan Penguat, dua fungsi utama epoxy resin sebagai matriks adalah untuk melindungi unsur penguat dan mentransfer/membagi beban yang diaplikasikan terhadap komposit.

- d) Perbandingan volume fraksi antara resin-penguat dalam komposit, komposisi penguat dan matriks dalam komposit mempengaruhi karakteristik komposit tersebut. Semakin banyak jumlah suatu material dalam komposit, maka semakin besar pengaruh material tersebut terhadap sifat komposit. Pengaruh komposisi terhadap sifat komposit ini diturunkan dengan menggunakan hukum campuran (*rule of mixture*), untuk memprediksi sifat akhir komposit [8].

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.4)$$

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

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

$$\rho_c = \frac{m_c}{v_c} = \frac{m_f + m_m}{v_f + v_m + v_v} = \frac{\rho_f v_f + \rho_m v_m}{v_f + v_m + v_v} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{1} \quad (2.5)$$

dimana ρ = Densitas (komposit (c), penguat (f), matriks (m))

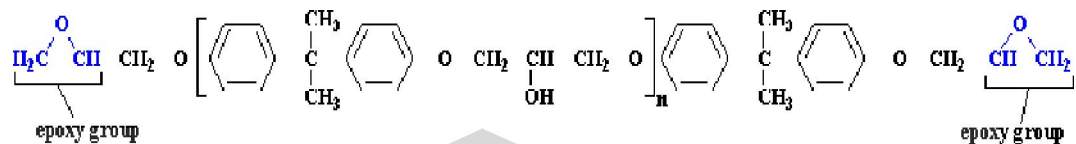
2.4 Material Penyusun Komposit Pelat Bipolar

Material-material penyusun pelat bipolar sebagai komposit matriks polimer mempunyai beberapa sifat dan keunggulan serta kekurangan tersendiri yang akan mempengaruhi kekuatan dan sifat akhir dari komposit pelat bipolar yang akan dihasilkan. Berikut adalah data dan spesifikasi dari material-material yang akan digunakan untuk menyusun komposit pelat bipolar.

2.4.1 Epoxy Resin

Epoxy resin adalah suatu senyawa reaktif polimer thermoset dengan karakteristik khusus yaitu adanya golongan Oxirane. Material Epoxy digunakan sebagai matriks dasar polimer dalam komposit pelat bipolar yang dihasilkan

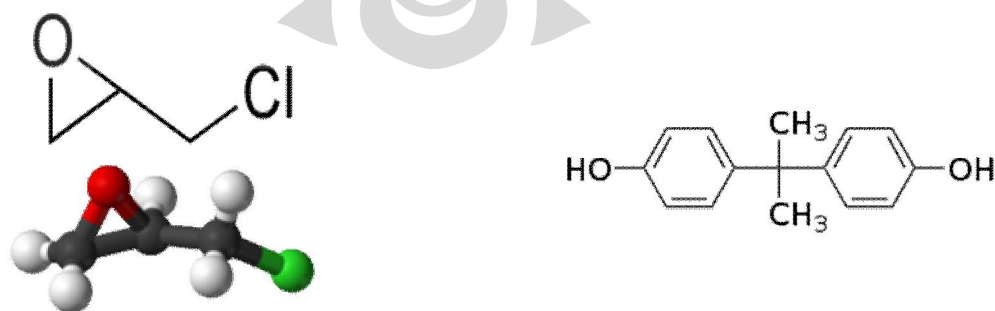
dalam penelitian ini. Epoxy dapat direaksikan dengan Epoxy Hardener agar menghasilkan reaksi *curing* dan menjadi 'hard' polimer, mempunyai fungsi utama untuk membasahi seluruh permukaan grafit (*reinforce*) agar terjadi ikatan *interface* yang baik.



Gambar 2.10 Contoh struktur kimia Epoxy Resin [10]

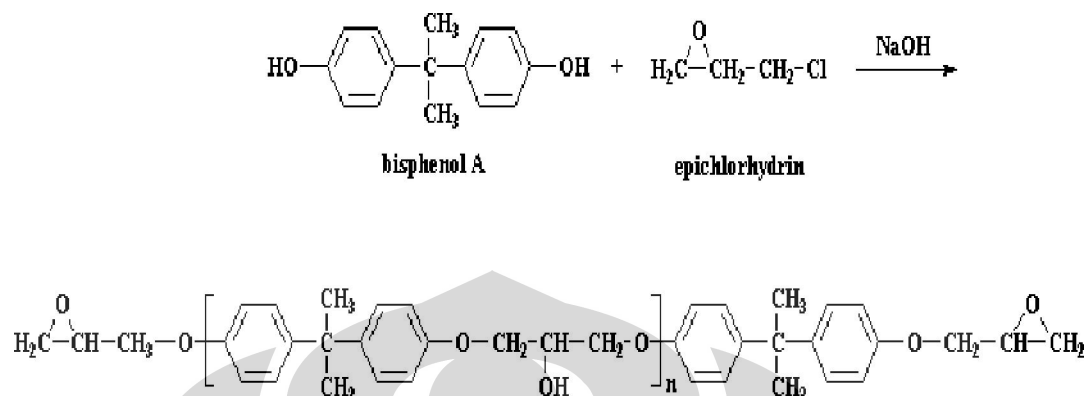
Epoxy resin mempunyai struktur thermoset berarti resin memiliki stabilitas thermal dan *chemical resistance* yang baik serta tingkat *creep* dan *stress relaxation* yang lebih rendah [10]. Walaupun sebagai material thermoset, epoxy juga memiliki beberapa hambatan seperti: ketahanan impak yang buruk, regangan yang rendah sampai terjadinya kegagalan dan umur penyimpanan yang terbatas pada temperatur ruang.

Polimer ini akan mengalami *curing*, yaitu proses pengerasan/pembekuan akibat reaksi kimia, ketika dicampur dengan agen katalis atau *hardener* [10]. Hasil reaksi ini akan membentuk matriks *cross-linked* dengan kekuatan tinggi dan kekuatan adhesi yang baik. Epoxy Resin yang paling umum digunakan adalah hasil reaksi antara epichlorhydrin dan bisphenol A. Aplikasi yang paling umum untuk material epoxy adalah untuk *coating*, *adhesive* dan material komposit dengan penguat *carbon fiber* dan fiberglass.



Gambar 2.11 Struktur Epichlorhydrin dan Bisphenol A [10]

Skema reaksi kimia pembentukan Epoxy Resin antara Epichlorhydrin dan Bisphenol A dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Reaksi pembentukan Epoxide [11]

Epoxy yang akan digunakan sebagai matriks komposit dan akan dipadu dengan unsur penguat akan memiliki sifat material seperti ditunjukkan Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sifat umum Epoxy Resin [11]

Mechanical Properties		Conditions		
		State 1	State 2	ASTM
Elastic Modulus (MPa)	20700	tensile		D638
Tensile Strength (MPa)	35 - 138	at break		D638
Thermal Properties		Conditions		
		Pressure	State	ASTM
Coef of Thermal Expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	11 - 50			D696
Processing Properties		Conditions		
		Type		ASTM
Processing Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	138 - 194	compression molding		
	138 - 194	transfer molding		

Sifat Epoxy ditentukan oleh struktur kimia dan berbagai macam variasi proses terhadap reaksi *curing* polimer tersebut. Keunggulan yang dimiliki Epoxy adalah [12]:

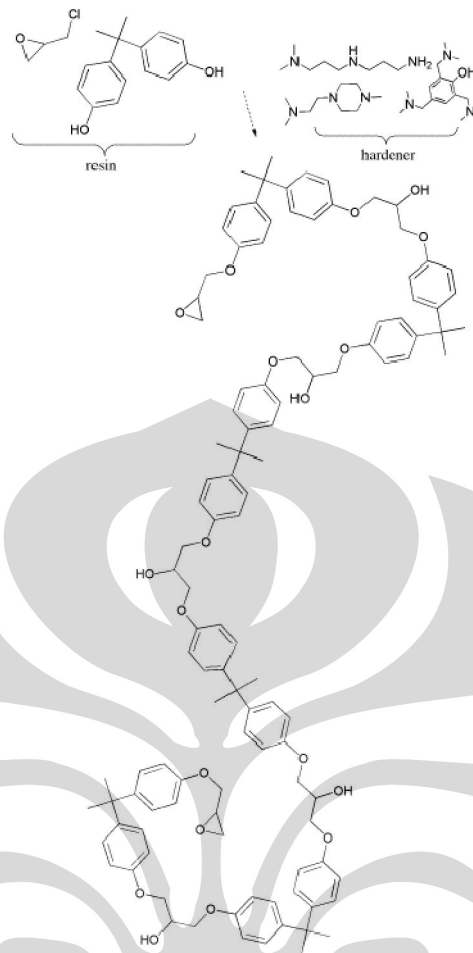
- Kekuatan adhesi yang sangat baik
- Ketahanan yang baik terhadap panas dan zat kimia lain

- *Moisture Resistance*
- Sifat mekanis yang cukup baik (tergantung jenis Epoxy tersebut)
- Sifat *electrical insulating* (isolator listrik) yang sangat baik
- Kemampuan untuk pemodifikasian sifatnya sangat mudah (contohnya: konduktivitas listrik dapat mudah ditingkatkan dengan penambahan aditif/filler yang mampu menghantarkan listrik dengan baik).

Epoxy resin termasuk zat kimia beracun yang berbahaya, namun perlu diketahui, polimer keras hasil *curing* Epoxy dan hardener hampir tidak berbahaya terhadap kesehatan sama sekali, tetapi Epoxy Resin dan Hardener yang belum tercampur dan terekspos terhadap pemakai dapat membahayakan kesehatan manusia [13]. Epoxy dan Hardener dapat menyebabkan sesitisasi sehingga dapat mengakibatkan alergi pada manusia, juga diduga menjadi penyebab kerusakan kelenjar endokrin dan beberapa jenis Epoxy bersifat karsinogen karena dapat menyebabkan kanker pankreas.

2.4.2 Epoxy Hardener

Epoxy Hardener akan dicampurkan dengan Epoxy Resin untuk menghasilkan reaksi *curing* agar didapatkan *hardenend polymer* yang kuat dan mempunyai sifat mekanis baik sebagai matriks dasar komposit matriks polimer pelat bipolar. Hardener adalah suatu senyawa reaktif *aliphatic amine* yang mempunyai sifat *curing time* yang sangat cepat bila direaksikan pada temperatur ruang. Skema reaksi kimia proses *curing* antara epoxy resin dan epoxy hardener untuk menghasilkan polimerisasi dan pembentukan *crosslink* diperlihatkan dengan detail pada Gambar 2.13.

Gambar 2.13 Reaksi *curing* polimer [12]

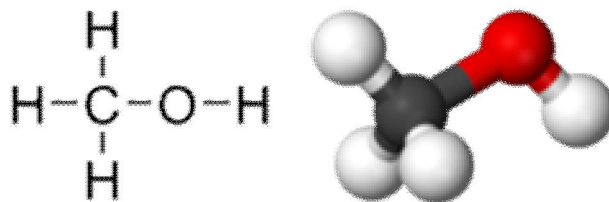
Tabel 2.3 dibawah ini menunjukkan data sifat-sifat umum dari Epoxy Hardener.

Tabel 2.3 Sifat umum Epoxy Hardener [14]

Mechanical Properties	Metric
Tensile Strength @ Break	75.8 MPa
Electrical Properties	Metric
Volume Resistivity	2.80e+16 ohm-cm @Temperature 25.0 °C
Processing Properties	Metric
Cure Time	240 - 480 min

<http://www.matweb.com/Search/MaterialGroupSearch.aspx?GroupID=84> (telah diolah kembali)

2.4.3 Methanol



Gambar 2.14 Struktur senyawa Methanol [15]

Methanol digunakan sebagai pelarut dan pengencer untuk Epoxy Resin serta Epoxy hardener (yang awalnya sangat kental), agar dapat bercampur dengan grafit sehingga pembasahan permukaan grafit bisa lebih baik dan menjangkau area yang lebih luas. Methanol sebenarnya adalah zat kimia beracun dengan formula CH_3OH [15]. Tabel 2.4 berikut akan menunjukkan sifat methanol yang akan digunakan sebagai *solvent*.

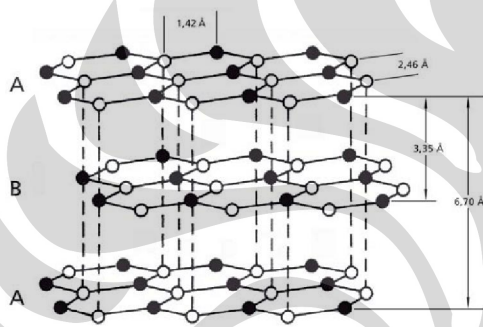
Tabel 2.4 Sifat umum Methanol

Molecular formula	CH_3OH
Molar mass	32.05 g/mol
Appearance	colorless liquid
Density	0.7918 g/cm ³
Melting point	-97 °C, -142.9 °F (176 K)
Boiling point	64.7 °C, 148.4 °F (337.8 K)
Solubility in water	miscible

<http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol> (telah diolah kembali)

2.4.4 Grafit

Tabel 2.5 Sifat umum grafit



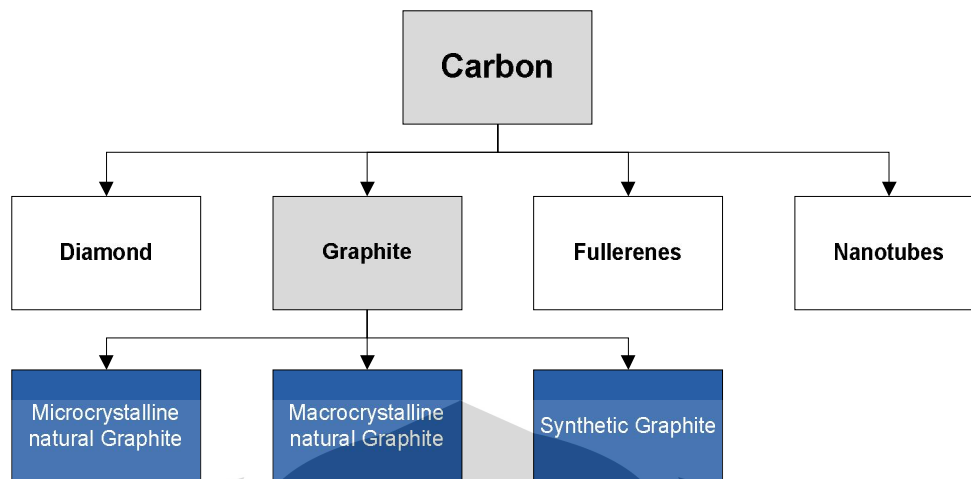
Formula	C
System:	Hexagonal
Lustre:	Sub-Metallic
System:	Hexagonal
Lustre:	Sub-Metallic
Hardness (Mohs):	1 - 2
Hardness (Vickers):	VHN ₁₀ =7 - 11 kg/mm ²
Modulus of Elasticity:	4.80 GPa
Density (measured):	2.09 - 2.23 g/cm ³
Density (calculated):	2.26 g/cm ³
Molecular Weight:	12.011 g/mol
Specific Surface Area:	1.00 m ² /g

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3f64b985402445c0a5af91113590934>

4 (telah diolah kembali)

Gambar 2.15 Bijih dan struktur kristal grafit [16]

Grafit dengan bijih serta struktur kristal seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.15, berasal dari kata Yunani kuno “*graphein*”, yaitu ‘untuk menulis’, dinamakan oleh kimiawan asal Jerman bernama A. G. Werner pada tahun 1789 [17]. Grafit merupakan salah satu allotropi dari karbon, pada Gambar 2.16 berikut akan dijabarkan klasifikasi allotropi karbon.



Gambar 2.16 Klasifikasi alotropi karbon [18]

Grafit biasanya ditemukan dalam bentuk *flakes* pada batuan yang kaya akan unsur karbon, bersifat sangat anisotropik, umumnya digunakan sebagai pelumas pada industri, penguat pada baja, *'lead'* pada pensil dan *reinforce* untuk komposit dengan kekuatan tinggi [19].

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

Grafit sintetis yang digunakan dalam penelitian ini merupakan produksi MERCK, berikut spesifikasi material tertera pada Tabel 2.6 [20].

Tabel 2.6 Spesifikasi grafit Merck

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

http://www.merck-chemicals.com/is-bin/INTERSHOP.enfinity/WFS/Merck-ID-Site/id_ID/-/IDR
(telah diolah kembali)

Grafit mampu menghantarkan arus listrik karena jumlah delokalisasi elektron yang sangat banyak di antara lapisan-lapisan karbon [21]. Elektron valensi ini bebas untuk bergerak, jadi dapat menghantarkan arus listrik. Namun, listrik hanya dapat dihantarkan didalam bidang *carbon layers* [21].

Kandungan grafit pada komposit pelat bipolar sangat menentukan sifat mekanis dan konduktivitas dari suatu sel bahan bakar. Semakin tinggi kandungannya, maka konduktivitas akan semakin meningkat namun diiringi oleh meningkatnya kesulitan pemrosesan [9].

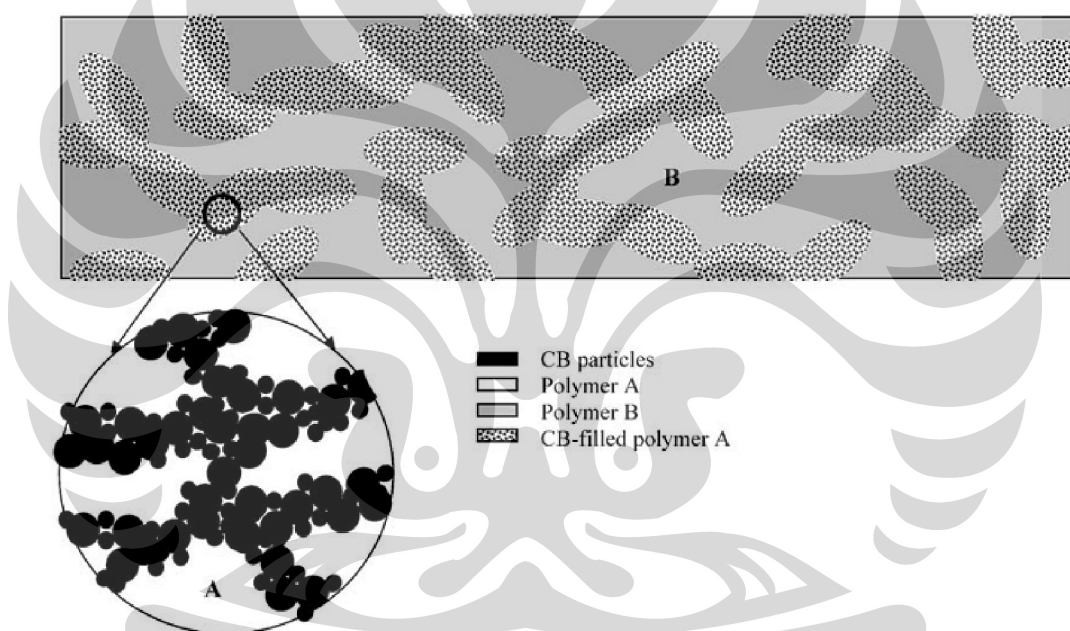
Selain itu, grafit mempunyai ketahanan korosi dan *low bulk resistivity* yang baik sedangkan keterbatasannya yaitu *processability* yang rendah (sulit dilakukan proses permesinan) dan kegetasan [9]. Karena kegetasan inilah, pelat bipolar yang dihasilkan memerlukan ketebalan tertentu, agar dapat meningkatkan kekuatan serta ketahanannya terhadap retak yang membuatnya jadi sedikit lebih berat [9].

2.4.5 Carbon Black

Carbon black (berat molekul = 12) adalah partikel koloidal dengan unsur karbon murni, yang dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna atau dekomposisi

thermal senyawa hidrokarbon (minyak/gas bumi) [22]. Ada 2 jenis teknik manufaktur *carbon black*, yaitu *furnace black* dan *thermal black*, kedua teknik ini digunakan untuk menghasilkan hampir seluruh jenis *carbon black* yang ada di dunia, dengan *furnace black* sebagai teknik yang paling umum [22].

Umunya digunakan sebagai *reinforce* pada ban untuk meningkatkan kekakuan, *high performance coating*, *toner* serta tinta untuk printer dan *conductive powder* untuk komposit matriks polimer [8]. *Carbon black* mempunyai *surface area to volume ratio* yang tinggi, walaupun masih lebih rendah daripada karbon aktif [23]. Pada Gambar 2.17 dapat dilihat skema mikrostruktur *carbon black* saat digunakan sebagai *filler* untuk suatu *polymer blend composite*.

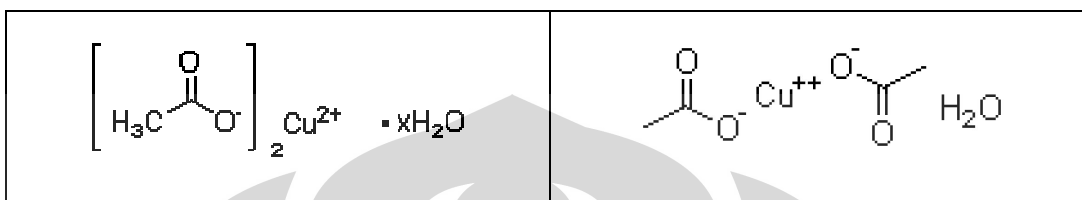


Gambar 2.17 Mikrostruktur *carbon black* dalam komposit matriks Polimer [24]

2.4.6 Tembaga (II) Asetat Monohidrat

Tembaga (II) Asetat Monohidrat, $\text{Cu}(\text{CO}_2\text{CH}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, atau nama IUPAC-nya *copper diacetate hydrate* dengan struktur molekul seperti Gambar 2.18, mempunyai warna *dark green crystals*, berat molekul 199.65 g/mol, dan densitas 1.88 g/cc [25]. Senyawa ini mempunyai temperatur leleh 115 °C dan *boiling point* sebesar 240 °C serta dapat larut dengan sempurna pada larutan methanol, dietileter dan aseton. Dapat diproduksi dengan mudah antara reaksi larutan asam asetat

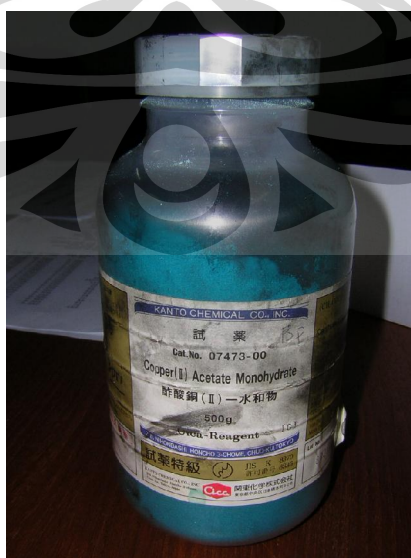
dengan Tembaga (II) Karbonat atau Tembaga (II) Hidroksida, atau dapat juga dengan reaksi antara Tembaga (II) Oksida dengan asam asetat panas [25]. Umumnya digunakan sebagai katalis untuk reaksi polimerisasi dari material organik dan sebagai *mordant* untuk produksi tekstil. Juga berfungsi sebagai *ceramic pigment* dan *fungicide* [25].



Gambar 2.18 Struktur molekular Tembaga (II) Asetat Monohidrat [26]

Tembaga (II) Asetat Monohidrat digunakan sebagai aditif dalam pembuatan pelat bipolar komposit untuk meningkatkan konduktivitas pelat bipolar, ini dilakukan karena sifat tembaga yang mempunyai konduktivitas elektrik yang sangat tinggi (dari semua unsur logam murni, hanya perak yang mempunyai konduktivitas lebih baik dari tembaga) [26]. Tembaga juga tahan terhadap korosi yang disebabkan oleh adanya *moisture* [26].

Aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat yang digunakan dalam penelitian merupakan produksi Kanto Chemical Japan, Gambar 2.19 dan Tabel 2.7 menunjukkan spesifikasi material tersebut [27].



Gambar 2.19 Aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat

Tabel 2.7 Spesifikasi material aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat

SPESIFIKASI		
Product Name: Copper (II) Acetate Monohydrate		
Item	Unit	Specification
Purity	%	min. 99.0
Chloride (Cl)	%	max. 0.003
Sulfate (SO ₄)	%	max. 0.01
Nitrogen compounds (as N)	%	max. 0.05
Sodium (Na)	%	max. 0.2
Potassium (K)	%	max. 0.01
Calcium (Ca)	%	max. 0.01
Zinc (Zn)	%	max. 0.002
Lead (Pb)	%	max. 0.005
Iron (Fe)	%	max. 0.002
Nickel (Ni)	%	max. 0.002

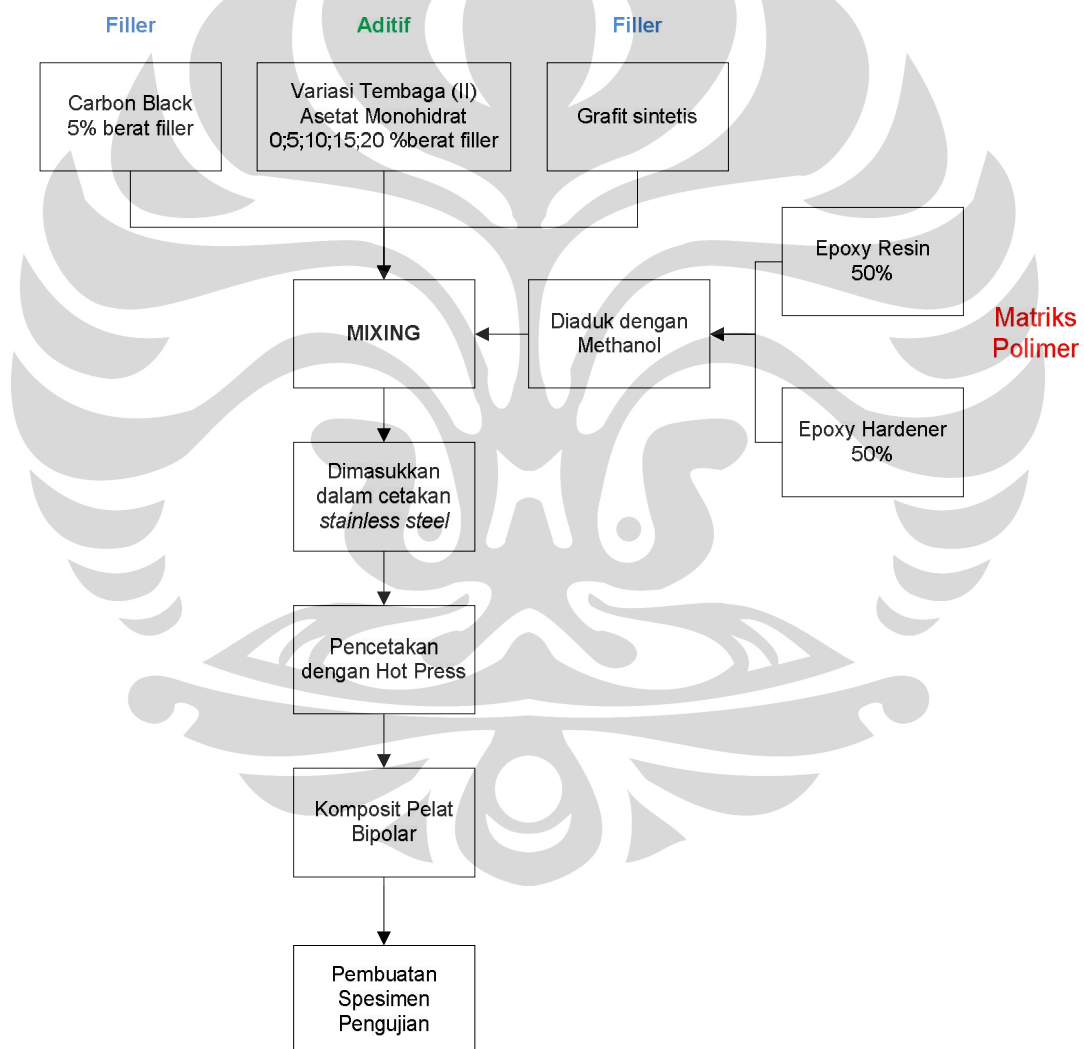
http://www3.kanto.co.jp/catalog/spec/E_D074730.pdf (telah diolah kembali)

BAB III

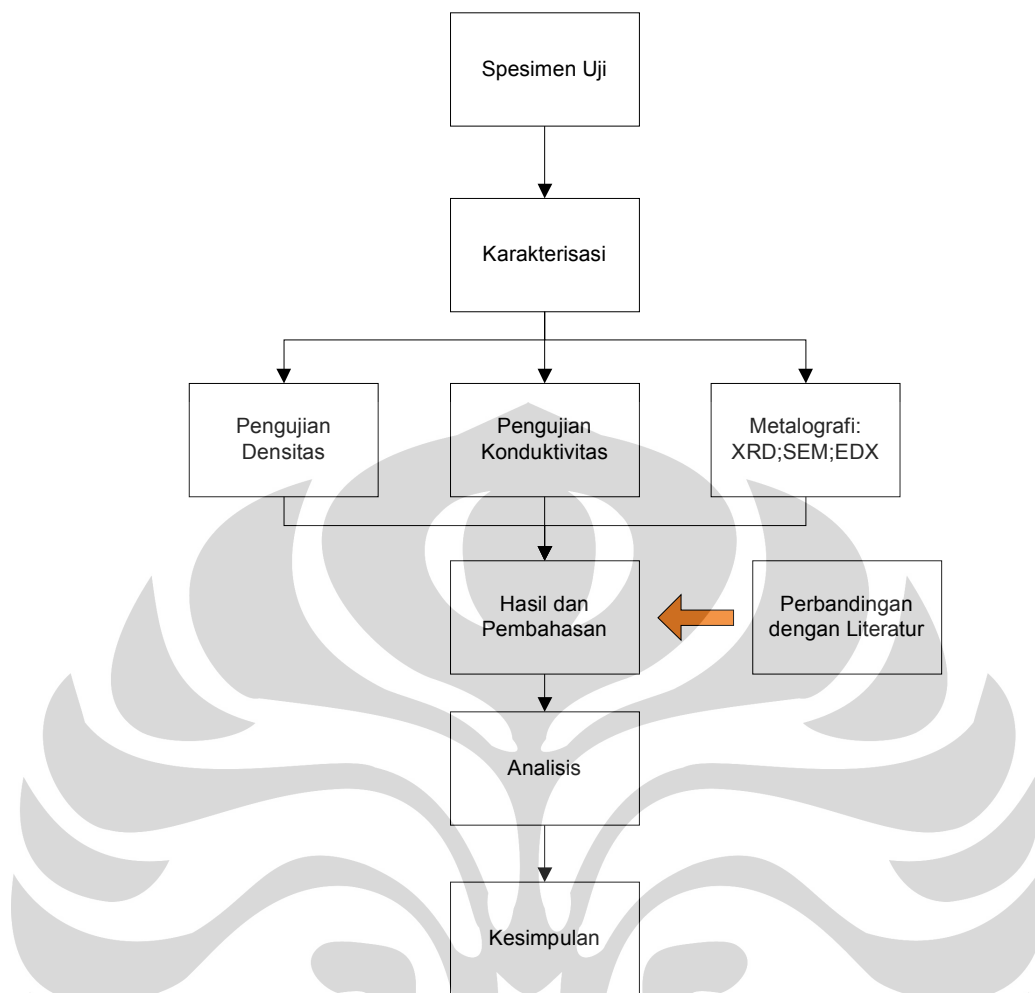
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini akan dibagi dalam 2 tahap yaitu, tahap pertama pembuatan sampel pelat bipolar dan tahap kedua tahap karakterisasi pelat bipolar. Diagram alir penelitian dibawah ini akan menggambarkan kedua tahap tersebut.



Gambar 3.1 Diagram alir pembuatan komposit pelat bipolar



Gambar 3.2 Diagram alir karakterisasi pelat bipolar

3.2 Alat dan Bahan

Bahan-bahan dasar yang digunakan dalam pembuatan pelat bipolar ini adalah:

1. Epoxy Resin dan Epoxy Hardener produksi Eposchon
2. Grafit sintetis produksi Merck
3. Aditif *Copper (II) Acetate Monohydrate* (CH_3COO)₂Cu.H₂O produksi Kanto Chemical Co., Inc.
4. *Carbon Black*
5. Methanol teknis produksi Brastaco

Peralatan yang digunakan untuk pembuatan dan karakterisasi pelat bipolar adalah:

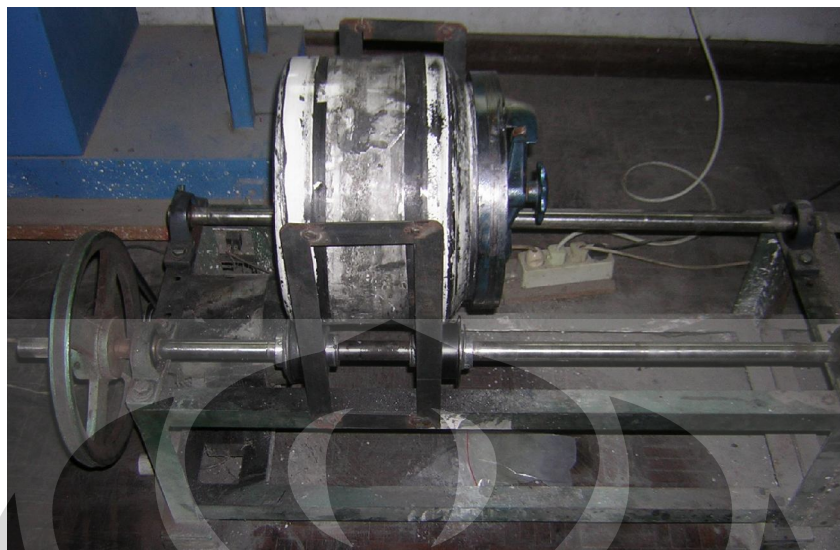
1. Ball Mill (*alumina jar and alumina particles*)
2. Timbangan digital
3. Beaker glass 1 liter
4. Mixer
5. Mesin Hot Plate
6. Cetakan Stainless Steel 10 x 15 cm
7. Mesin Hot Press
8. Gergaji besi
9. Kertas Amplas #500 dan #1200
10. Philips Analytical X-Ray B.V.
11. Leo 420i *Secondary Electron (SE) Detector*
12. Veeco FPP 5000- *four point probe detector*

3.3 Prosedur Pembuatan Pelat Bipolar

3.3.1 Ball Milling

Carbon black yang digunakan sebagai serbuk konduktif dan katalis akan dihaluskan terlebih dahulu untuk menghasilkan butir yang lebih kecil & halus sehingga dapat memudahkan pada proses pencampuran komposit.

Proses *milling* dilakukan dalam proses kering berarti tanpa pengencer Xylene atau cairan apapun, hanya menggunakan bola penghancur dan toples berkapasitas 2 liter berbahan dasar alumina, seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 *Ball mill* berbahan dasar alumina

Variabel *ball mill* yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Ø Waktu *milling*: 2 x 24 jam
- Ø Rasio antara jumlah total berat serbuk (*carbon black*) dengan berat bola alumina = (1 : 10)

Grafit yang digunakan untuk pembuatan pelat bipolar tidak dilakukan proses *milling*, karena menurut literatur dan diskusi, grafit dengan ukuran butir lebih kecil akan menurunkan konduktivitas pelat bipolar.

3.3.2 Komposisi Material Penyusun Pelat Bipolar

Dalam penelitian ini akan dibuat 4 sampel pelat bipolar dengan berat masing-masing pelat 120gr dan 1 pelat lainnya dengan berat 160gr, total ada 5 pelat yang akan dibuat dengan komposisi material penyusun yang berbeda.

Perbedaan utama antara kelima pelat bipolar ditentukan berdasarkan atas perbedaan jumlah kadar aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat yang ditambahkan. Pembagian sampel-sampel tersebut akan dijelaskan melalui Tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1 Pembagian sampel berdasarkan jumlah aditif

Kode Sampel	Jumlah aditif (% dari total berat <i>filler</i>)
BP1	0%
BP2	5%
BP3	10%
BP4	15%
BP5	20%

Komposisi material penyusun komposit pelat bipolar yang lebih detail akan dijelaskan pada Lampiran 1.

3.3.3 Pencampuran

Setelah dilakukan penimbangan terhadap material-material yang akan digunakan untuk menyusun pelat bipolar dengan timbangan digital, maka proses selanjutnya adalah pencampuran (*mixing*). Proses ini dilakukan untuk mendapatkan struktur komposit yang lebih homogen. Berikut urutan prosesnya:

- 1) Grafit, *Carbon Black* dan aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat dimasukkan kedalam *beaker glass* dengan kapasitas 1 liter.
- 2) Alat *mixer* disiapkan, lalu *beaker glass* ditutup dengan plastik yang telah dilubangi agar ujung pengaduk *mixer* dapat masuk dan proses pengadukan dapat berlangsung. Fungsi dari penutupan ini adalah agar Grafit yang sedang diaduk tidak bertebaran dan terbang ke udara.
- 3) Lalu dilakukan *mixing* selama 5 menit.
- 4) Epoxy Resin diencerkan dengan 30 ml Methanol, lalu dimasukkan ke dalam *beaker glass* berisi adonan, lalu *mixing* selama 5 menit.

- 5) Hardener diencerkan dengan 30 ml Methanol, lalu dimasukkan ke dalam *beaker glass* berisi adonan, lalu *mixing* kembali selama 10 menit.
- 6) *Beaker glass* dipindahkan ke atas mesin Hot Plate dengan temperatur 100 °C, lalu *mixing* dilanjutkan selama 10 menit.
- 7) *Beaker glass* dipindahkan dari mesin Hot Plate, kemudian dilakukan *mixing* kembali selama 5 menit.

3.3.4 Pencetakan

Adonan yang telah tercampur lalu dipindahkan dari *beaker glass* menuju cetakan dengan ukuran 10 x 15 cm dan tebal 4 mm, lalu permukaannya diratakan. Setelah itu cetakan ditutup dan dimasukkan ke dalam mesin Hot Press.

Mesin Hot Press menggunakan tekanan sebesar 300 Kg/cm² dan temperatur input sebesar 70 °C. Proses penekanan cetakan dengan temperatur berlangsung selama 3 jam.

Pengeluaran pelat bipolar dari cetakan harus dilakukan ±12 jam setelah cetakan keluar dari mesin Hot Press, karena pelat bipolar akan mengalami perubahan dimensi serta melengkung bila langsung dikeluarkan dari cetakan.

3.3.5 Pembuatan Spesimen Pengujian

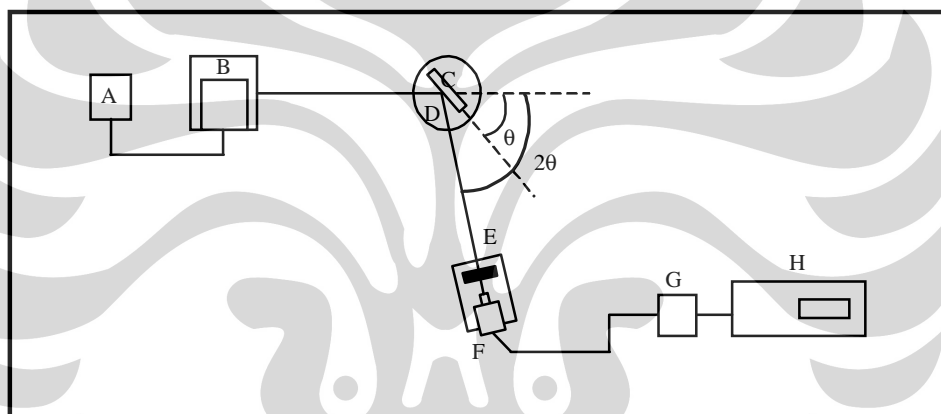
Untuk melakukan 5 jenis karakterisasi yaitu: pengujian konduktivitas, analisa densitas, pengujian SEM, XRD dan EDX, pelat bipolar perlu dipotong untuk dijadikan spesimen uji. Setelah dipotong, spesimen uji dihaluskan dengan kertas amplas kasar #500 dan halus #1200.

3.4 Karakterisasi Pelat Bipolar

3.4.1 Pengujian *X-Ray Diffraction*

Pengamatan struktur kristal sampel pelat bipolar menggunakan alat XRD dilakukan di Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. Pengujian ini diutamakan untuk mendeteksi senyawa-senyawa yang terbentuk akibat reaksi antara aditif tembaga, matriks Epoxy dan grafit, melalui pengamatan struktur kristal dari sampel pelat bipolar.

X-Ray Diffractometer merupakan alat yang memberikan data-data difraksi dan kuantitas intensitas difraksi pada sudut-sudut dari suatu bahan. Secara umum Difraktometer Sinar-X dapat ditunjukkan oleh Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Skema alat difraktometer sinar-X

Keterangan dan prosedur penggunaan alat difraktometer sinar-X adalah sebagai berikut:

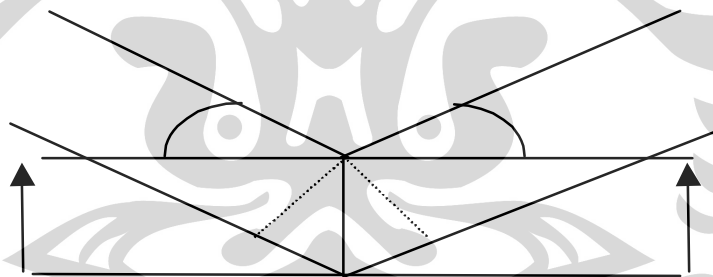
1. (A) adalah generator tegangan tinggi yang berfungsi sebagai catu daya sumber sinar-X (B).
2. Sampel (C) diletakkan di atas alas (D) yang dapat diputar.
3. Sinar-X dari sumber (B) didifraksi oleh sampel menjadi berkas sinar konvergen yang terfokus di celah (E), kemudian masuk ke alat pencacahan.

4. (D) dan (F) dihubungkan secara mekanis. Jika (F) berputar sebesar 2θ maka (D) akan berputar sebesar θ .
5. Intensitas difraksi sinar-X yang masuk dalam alat pencacah (F) dikonversikan dengan alat kalibrasi (G) dalam signal tegangan yang sesuai dan direkam oleh alat rekam (H) dalam bentuk kurva.

Analisa hasil dari patron XRD digunakan metoda Bragg atau teori Bragg dengan persamaan:

$$n\lambda = 2 \times d \times \sin\theta \quad (3.1)$$

dimana λ = panjang gelombang [\AA]
 d = jarak antara dua kisi [\AA]
 θ = sudut datang
 n = urutan sinar (dalam bilangan bulat)



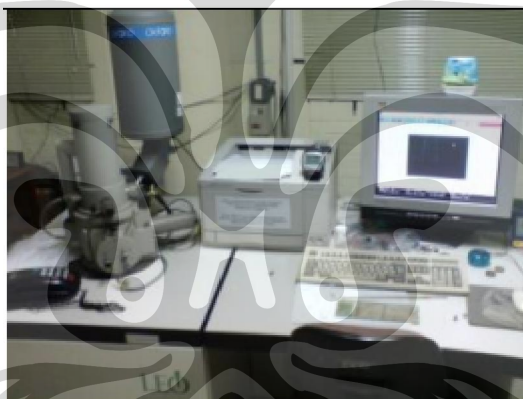
Gambar 3.5 Skematis perjalanan sinar X pada kisi benda

Untuk mengetahui senyawa yang terdapat dalam sampel, dilakukan dengan cara membandingkan jarak antara kisi (d) yang terukur dengan nilai (d) pada data dari referensi [28]. Dalam metode Hanawalt digunakan nilai d (jarak bidang kisi) dari nilai terbesar dan nilai I (intensitas). Ketiga nilai itu merupakan nilai pertama, kedua dan ketiga terbesar dinamakan sebagai d_1 , d_2 , d_3 . Kemudian nilai intensitas yang terdapat didalam pola difraksi dibandingkan terhadap nilai yang terbesar menjadi I / I_0 .

3.4.2 Pengamatan *Scanning Electron Microscope*

SEM mempunyai prinsip kerja bahwa suatu berkas insiden elektron yang sangat halus di-*scan* menyilangi permukaan sampel dalam sinkronisasi dengan berkas tersebut dalam tabung sinar katoda [29]. Elektron-elektron yang terhambur digunakan untuk memproduksi sinyal yang memodulasi berkas dalam tabung sinar katoda, yang memproduksi suatu citra dengan kedalaman medan yang besar dan penampakan yang hampir tiga dimensi. Dalam penelitian morfologi permukaan SEM terbatas pemakaiannya, tetapi memberikan informasi yang bermanfaat mengenai topologi permukaan dengan resolusi sekitar 100 \AA [29].

Pengujian SEM dilakukan di Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. Gambar 3.6 menunjukkan alat Leo 420i yang digunakan untuk pengujian SEM.



Gambar 3.6 Leo 420i *Secondary Electron (SE) Detector*

Pengujian SEM mempunyai tujuan untuk:

- Menganalisa morfologi permukaan pelat bipolar
- Mengetahui porositas yang terbentuk pada struktur komposit
- Mengetahui daya pembasahan matriks terhadap grafit
- Mengidentifikasi bentuk struktur butir dan persebaran butir dalam sampel

Sampel potongan pelat bipolar tidak perlu di-*coating* terlebih dahulu dengan unsur Au-Pd, karena sampel sudah cukup konduktif untuk menghantarkan elektron dengan baik. Proses *pumping* untuk sampel pelat bipolar pada *vacuum chamber* harus dilakukan lebih lama karena sampel yang sangat berpori.

3.4.3 *Energy Dispersive X-Ray Analysis*

Pengujian dilakukan di Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. Tujuan dari pengamatan dengan EDX adalah untuk mengetahui unsur-unsur utama yang terdapat dalam sampel pelat bipolar.

Prinsip kerja alat ini adalah menembakkan sinar X-Ray menuju sampel, lalu sebagian dari sinar akan dipantulkan oleh sampel dan sebagian lagi akan diserap atau menembus sampel. Dengan adanya perbedaan besarnya sinar yang dipantulkan atau diserap, maka komposisi unsur penyusun sampel akan diketahui.

3.4.4 Pengujian Densitas

Pengujian dilakukan menggunakan peralatan uji densitas di Pusat Penelitian Fisika LIPI, Puspiptek, Serpong berdasarkan prosedur pengujian yang direkomendasikan pada ASTM D792.

Densitas (kerapatan massa) adalah ukuran massa suatu benda per unit volume, densitas dinyatakan dalam satuan kg/m^3 dilambangkan dengan ρ .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

dimana: ρ = densitas (kg/m^3)

m = massa (kg)

V = volume (m^3)

Perhitungan *bulk density* penting dalam mempengaruhi karakteristik sifat keramik. Densitas pada bentuk yang kompleks ditentukan dengan menggunakan

prinsip Archimedes, yaitu membandingkan perbedaan berat di udara dengan berat dalam cairan. Berikut persamaan untuk menentukan densitas sampel:

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

dimana: ρ = *bulk density* (gr/cm³)

A = massa sampel kering (gr)

B = massa sampel tergantung dalam air (gr)

ρ_{air} = rapat massa air (0,9775 gr/cm³)

Prosedur pengujian densitas dengan metode Archimedes adalah sebagai berikut:

1. Sampel pelat bipolar ditimbang pada timbangan digital, dan nilainya dicatat sebaga massa sampel di udara (A)
2. Lalu sampel dicelupkan dalam gelas berisi *aquades*, pencelupan sampel harus dilakukan secara menyeluruh pada area sampel hingga semua permukaan sampel benar-benar tercelup di dalam *aquades* tetapi tidak boleh menyentuh dasar dan pinggir gelas, seperti dapat dilihat oleh Gambar 3.7 dibawah.



Gambar 3.7 Penimbangan sampel tercelup (*completely immersed*)

3. Setelah sampel tercelup, sampel ditimbang dan nilainya adalah (B)

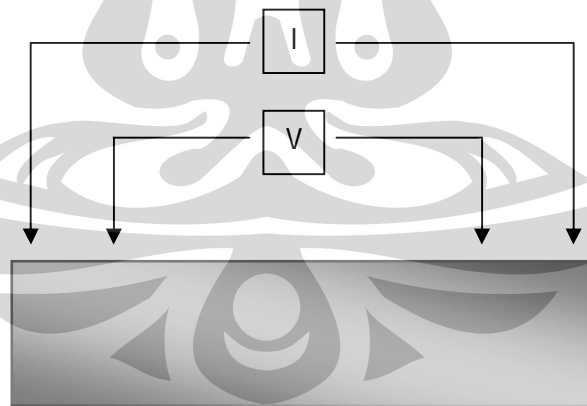
3.4.5 Pengujian Konduktivitas

Pengujian dilakukan di Pusat Penelitian Fisika LIPI, Puspiptek, Serpong dengan alat Veeco FPP 5000 - *four point probe* yang dapat dilihat di Gambar 3.8.



Gambar 3.8 *Four point probe*

Sampel diletakkan kedalam alat kemudian nilai ketebalan sampel tersebut dimasukkan dalam satuan cm. Setelah itu kedua *probe* terluar pada alat akan memberikan potensial arus pada sampel, lalu dua *probe* terdalam akan mengukur nilai tegangan. Skema kerja alat tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Skema kerja *4-point probe*

Akan didapatkan nilai resistivitas sampel (ρ) dalam satuan $\Omega\text{-cm}$, untuk mendapatkan nilai konduktivitas (σ) dalam satuan S/cm pada sampel, maka konduktivitas merupakan kebalikan dari resistivitas [30]:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (3.4)$$

BAB IV

HASIL KARAKTERISASI DAN ANALISIS

4.1 Pengamatan Visual Sampel

4.1.1 Pengamatan Visual Sampel BP1

Pembuatan sampel BP1 dilakukan tanpa penambahan aditif tembaga, Gambar 4.1 dibawah ini menunjukkan hasil pengamatan visual sampel BP1.



Gambar 4.1 Sampel BP1 tanpa penambahan aditif

Sampel BP1 yang dihasilkan memiliki kekerasan yang sangat baik, kokoh, tidak mudah patah dan terlihat cukup kering. Bentuk sampel BP1 juga sesuai dengan cetakan dan memiliki permukaan yang halus.

4.1.2 Pengamatan Visual Sampel BP2

Pembuatan sampel BP2 dengan penambahan 5% aditif Tembaga dari jumlah total *filler* menghasilkan sampel dengan kondisi fisik yang dapat dilihat pada Gambar 4.2.



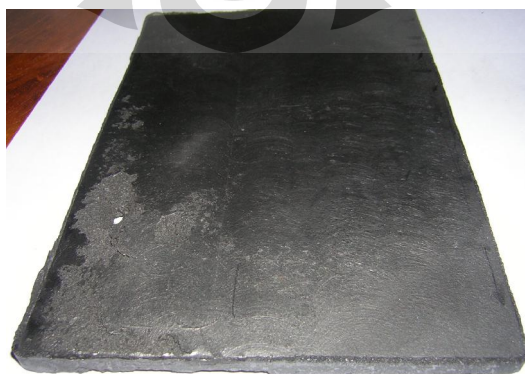
Gambar 4.2 Hasil pengamatan visual sampel BP2

Sampel BP2 memiliki kekerasan dan kekokohan yang cukup baik, terlihat cukup kering serta sesuai dengan bentuk cetakan. Namun permukaan sampel ini sangat kasar dan berpori, hal ini menyebabkan permukaan sampel sangat tidak rata. Permukaan sampel yang berpori kemungkinan disebabkan oleh pelapisan oli yang terlalu banyak pada cetakan sehingga permukaan yang terisi oleh oli tidak dapat diisi oleh komposit.

Selain itu, terdapat lapisan berwarna coklat pada permukaan sampel yang diduga merupakan produk korosi. Lapisan ini dihasilkan oleh produk korosi pada cetakan *stainless steel*, yang terlepas dan menempel pada sampel pelat bipolar. Hal ini disebabkan karena sebelum pemakaian cetakan, pembersihan cetakan kurang dilakukan dengan benar.

4.1.3 Pengamatan Visual Sampel BP3

Pembuatan sampel BP3 dengan penambahan aditif tembaga sebesar 10% dari total *filler*, menghasilkan sampel dengan visual pada Gambar 4.3 dibawah ini.



Gambar 4.3 Sampel BP3 dengan aditif Tembaga 10%

Sampel memiliki kekerasan yang tidak baik, agak lembek sehingga mudah patah dan terlihat belum cukup kering karena masih terasa lembab. Permukaan sampel juga terlihat buruk, karena terdapat lubang yang sampai menembus ke bagian belakang sampel.

4.1.4 Pengamatan Visual Sampel BP4

Pembuatan sampel BP4 dengan aditif tembaga sebanyak 15% dari total *filler* yang telah dilakukan menghasilkan visual permukaan sampel seperti dapat terlihat pada Gambar 4.4 berikut.

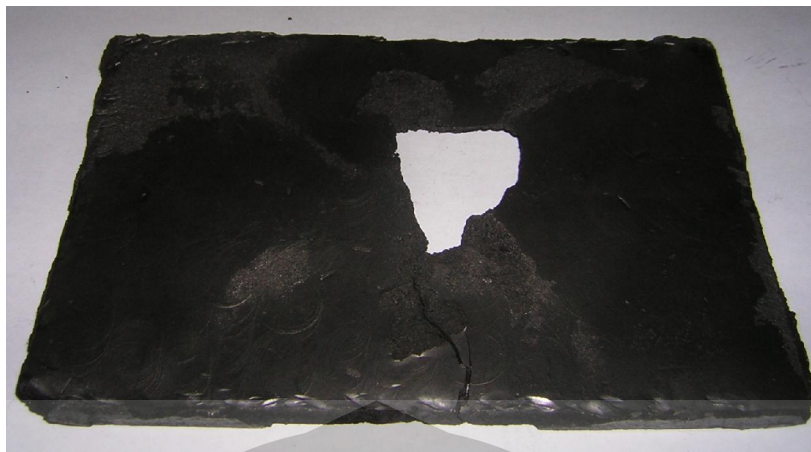


Gambar 4.4 Sampel BP4 dengan aditif Tembaga 15%

Sampel terasa lunak dan terlihat sangat lembab. Selain memiliki kondisi fisik yang tidak baik, bentuk sampel tidak sesuai dengan cetakan karena ada bagian yang tidak terisi oleh adonan komposit. Sampel nyaris hancur saat dikeluarkan dari cetakan karena terlalu lunak dan akan melengkung jika digenggam dengan tangan di kedua sisinya.

4.1.5 Pengamatan Visual Sampel BP5

Pembuatan sampel BP5 dilakukan dengan penambahan aditif Tembaga sebanyak 20% dari total *filler* atau 16% dari keseluruhan berat grafit. Sampel tersebut memiliki visual seperti dapat dilihat pada Gambar 4.5 dibawah ini.



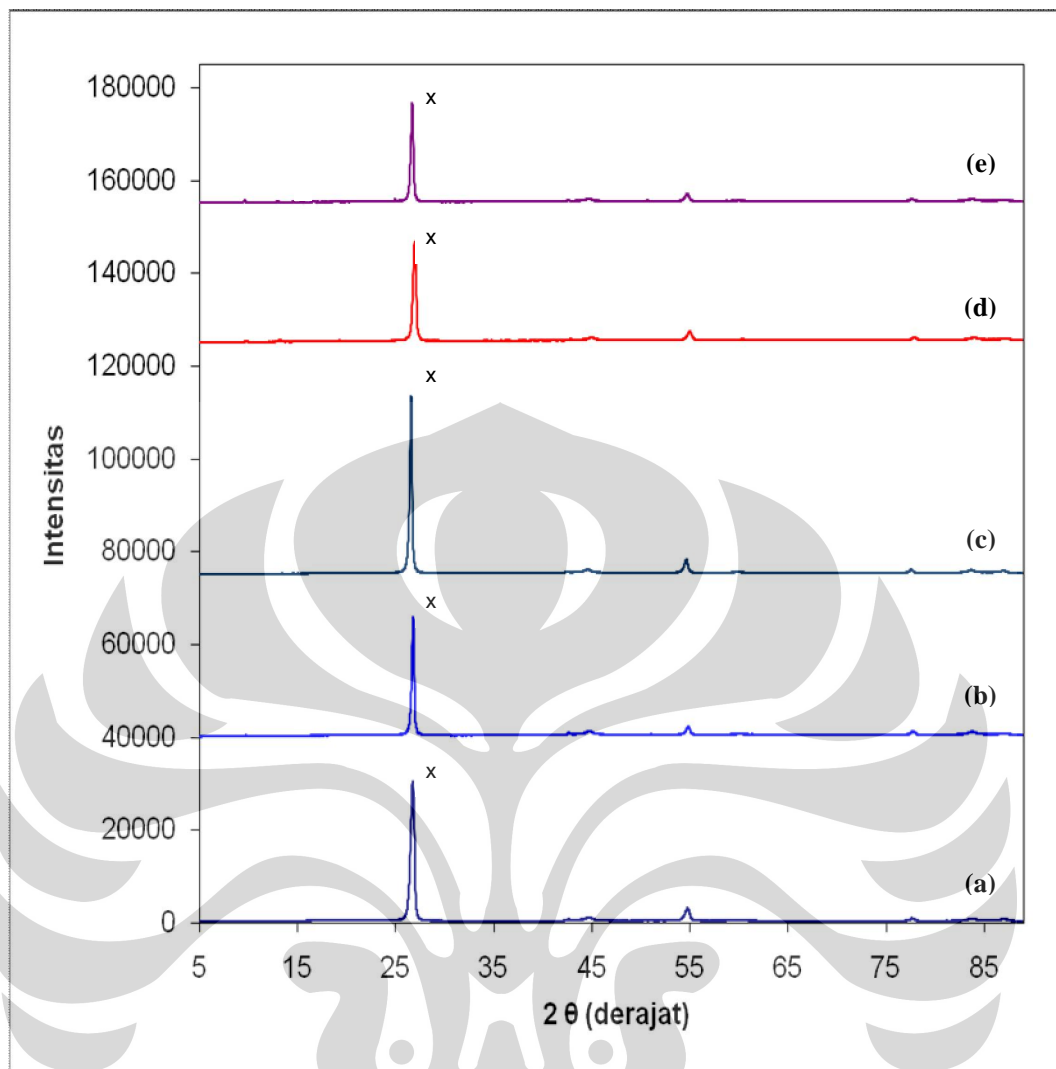
Gambar 4.5 Sampel BP5 dengan berat 160gr

Sampel BP5 yang dihasilkan sangatlah lunak dan lembab. Karena terlalu lembek, saat dikeluarkan dari cetakan sampel terbelah menjadi 2 bagian, gambar diatas diambil dengan menggabungkan kedua belahan sampel yang terpisah satu sama lain. Selain kekuatannya yang sangat buruk dan sangat mudah patah, pada bagian tengah sampel BP5 lubang yang sangat besar dan menyebabkan retak secara vertikal. Permukaan sampel juga terlihat kasar karena ketebalan sampel berbeda-beda di beberapa bagian.

4.2 Pengujian *X-Ray Diffraction*

Pengujian Powder Diffraction menggunakan radiasi sinar X-Ray untuk mengidentifikasi senyawa-senyawa yang terdapat dalam sampel pelat bipolar. Dari data hasil pengujian XRD pada kelima sampel akan dianalisa dengan mengambil nilai d-value rata-rata beserta *relative intensity*, untuk dibandingkan dengan nilai d-value referensi [28]. Pencocokkan nilai d-value antara eksperimen dengan literatur dilakukan untuk mengidentifikasi senyawa yang terdapat dalam sampel. Hasil perbandingan nilai d-value hasil percobaan XRD dengan d-value referensi dari Hanawalt Method, dapat dilihat lebih detail pada Lampiran 2.

Dari hasil pencocokan nilai d-value tersebut dapat teridentifikasi senyawa-senyawa yang terdapat dalam sampel, sehingga diketahui rentang-rentang serta puncak difraksi yang menandakan adanya senyawa tersebut. Hasil karakterisasi menggunakan difraksi sinar-X untuk mengetahui senyawa-senyawa yang terdapat dalam sampel diperlihatkan pada Gambar 4.6.



Petunjuk Gambar:
 x : Grafit
 : Karbon
 : Tembaga (II) Asetat Monohidrat

Gambar 4.6 Grafik XRD sampel: (a) BP1, (b) BP2, (c) BP3, (d) BP4, dan (e) BP5

Terlihat bahwa kelima sampel memperlihatkan intensitas puncak-puncak difraksi yang tajam dan signifikan, hal ini menunjukkan bahwa sampel pelat bipolar telah memiliki fasa kristal dengan tingkat kristalinitasnya cukup tinggi.

Pada hasil XRD sampel BP1, dapat terlihat puncak-puncak difraksi yang tampak dengan intensitas tinggi merupakan milik grafit sintesis. Sedangkan puncak yang lain menunjukkan senyawa karbon yang berasal dari *carbon black*.

Pada sampel BP2, dapat dilihat bahwa puncak difraksi dengan intensitas tertinggi adalah tetap merupakan intensitas dari grafit sintetis. Senyawa tembaga (II) asetat monohidrat mulai terdeteksi pada sampel BP2 ini, walaupun memiliki intensitas yang masih sangat rendah.

Hasil pengujian XRD pada sampel BP3 menunjukkan bahwa jumlah senyawa tembaga (II) asetat monohidrat pada sampel tersebut meningkat dibandingkan sampel BP2, walaupun tidak dengan intensitas yang cukup tinggi. Senyawa tersebut ternyata tidak menghilang walaupun sudah dilakukan proses penekanan dengan temperatur di mesin *hot press*. Puncak difraksi dengan intensitas yang tinggi masih didominasi oleh grafit sintetis, walaupun pada komposisi sampel jumlahnya semakin berkurang.

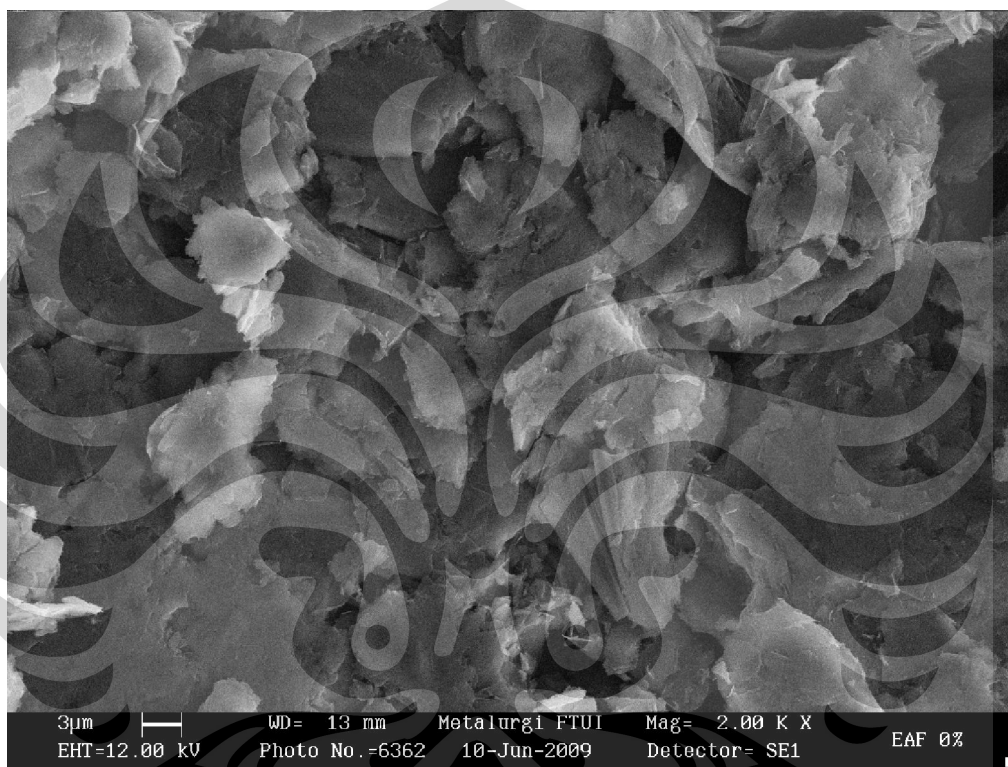
Senyawa tembaga (II) asetat monohidrat pada sampel BP4 kembali mengalami peningkatan yang cukup tinggi dibandingkan dengan sampel BP3. Intensitas senyawa tersebut juga lebih tinggi dari intensitas senyawa pada sampel BP3 dan BP2. Ini membuktikan bahwa semakin meningkatnya penambahan aditif tembaga (II) asetat monohidrat pada pembuatan sampel, maka senyawa tembaga (II) asetat monohidrat yang masih 'tersisa' dalam sampel juga mengalami peningkatan. Walaupun demikian, puncak-puncak difraksi masih menunjukkan adanya senyawa grafit sintetis dengan intensitas tertinggi.

Kandungan senyawa tembaga (II) asetat monohidrat yang cukup tinggi terdapat pada sampel BP5, karena nilai d-value yang diambil dari referensi cocok dengan nilai d-value yang didapatkan dari hasil pengujian XRD. Dengan adanya penambahan aditif sebanyak 20% pada sampel BP5, maka senyawa tembaga (II) asetat monohidrat yang didapatkan melalui pengujian XRD menunjukkan nilai tertinggi dibandingkan dengan sampel-sampel sebelumnya.

4.3 Pengamatan dengan *Scanning Electron Microscope*

Pengamatan dengan SEM bertujuan untuk mengidentifikasi mikrostruktur yang terbentuk, tingkat porositas, serta morfologi permukaan dan struktur butir pada komposit. Pengambilan gambar diambil pada bagian sisi samping spesimen atau pada daerah perpotongan/patahan antar spesimen.

4.3.1 Hasil Pengamatan SEM Sampel BP1

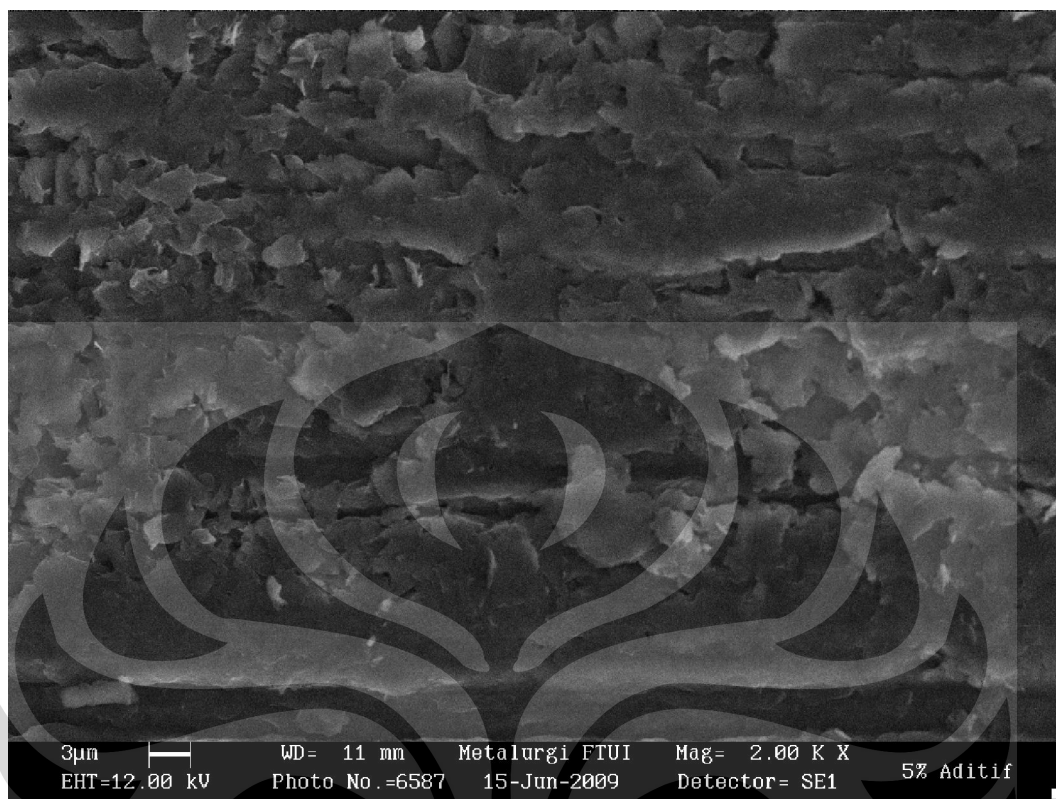


Gambar 4.7 Hasil pengamatan SEM sampel BP1 dengan perbesaran 2000X

Pada gambar hasil SEM sampel BP1, terlihat bahwa persebaran partikel grafit terjadi secara merata dan ukuran grafit yang terdispersi cukup homogen antara satu sama lain. Dengan persebaran partikel yang merata ke seluruh bagian komposit tersebut, maka kekuatan material akan semakin kuat karena Grafit sebagai *reinforce* tersebar dengan sangat baik.

Pengaruh kemampuan *wetability* Epoxy Resin untuk membasahi seluruh permukaan grafit dapat juga terlihat, pembasahan terlihat merata di sekeliling area grafit yang menyebabkan terjadi *interface* yang cukup baik antara matriks dan unsur penguat.

4.3.2 Hasil Pengamatan SEM Sampel BP2

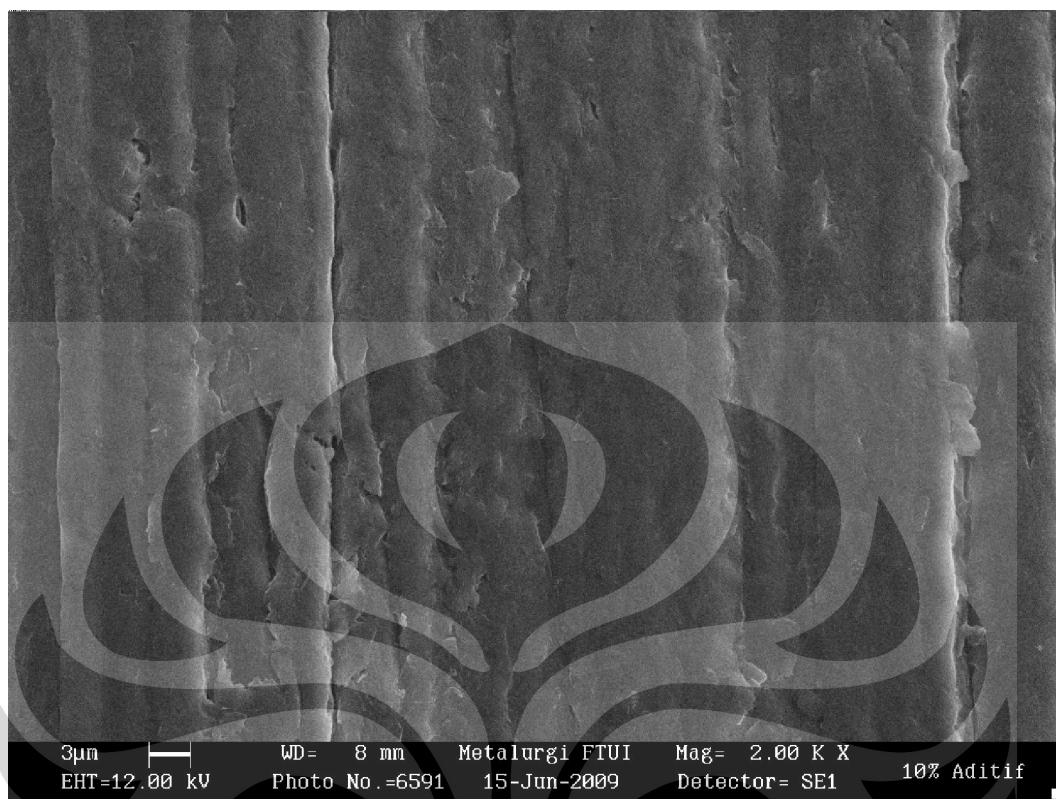


Gambar 4.8 Hasil pengamatan SEM sampel BP2 dengan perbesaran 2000X

Sampel BP2 dengan perbesaran 100X (dapat dilihat di Lampiran 4) terlihat mempunyai struktur yang cukup halus, namun ketika dilakukan perbesaran 2000X seperti dapat dilihat pada Gambar 4.8, baru dapat terlihat dengan jelas bahwa ikatan antara Grafit dan Epoxy tidak terjadi dengan baik akibat kurang tingginya tingkat pembasahan. Hal ini menyebabkan jumlah porositas pada sampel BP2 yang terlihat pada permukaan sangat banyak, porositas ini terjadi akibat resin tidak mampu membasahi seluruh permukaan Grafit dengan sempurna sehingga masih terdapat ruang *void* yang dapat menurunkan kekuatan mekanis.

Walaupun terdapat porositas yang cukup banyak, kekuatan sampel BP2 termasuk cukup baik, ini dihasilkan karena tingkat penyebaran Grafit cukup tinggi sehingga sampel mampu mendapatkan kekerasan dan kekakuan yang baik, walaupun tidak sekuat sampel BP1.

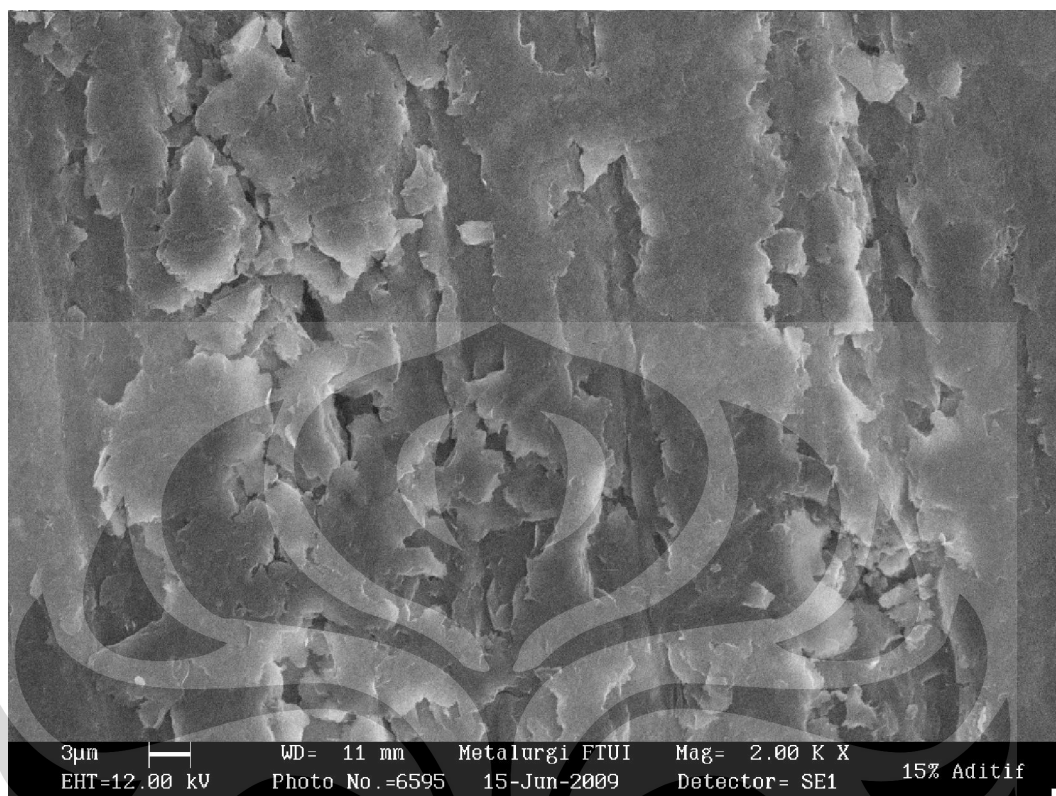
4.3.3 Hasil Pengamatan SEM Sampel BP3



Gambar 4.9 Hasil pengamatan SEM sampel BP3 dengan perbesaran 2000X

Permukaan sampel BP3 pada gambar perbesaran 100X (dapat dilihat di Lampiran 5) terlihat cukup terang dan sangat halus. Namun pada perbesaran 2000X seperti pada Gambar 4.9 diatas, terlihat bahwa tingkat penyebaran Grafit sebagai unsur penguat tidak terlihat cukup baik. Grafit cenderung terikat antara satu sama lain membentuk beberapa lapisan tipis dengan sedikit porositas. Susunan grafit yang halus dan membentuk lapisan-lapisan kapilar tersebut diduga memiliki sifat yang lunak dan tidak kokoh, sehingga jika diberikan tekanan maka dia akan cenderung berubah bentuk (terdeformasi) mengikuti arah tegangan tersebut dan tidak kembali ke bentuk semula.

4.3.4 Hasil Pengamatan SEM Sampel BP4

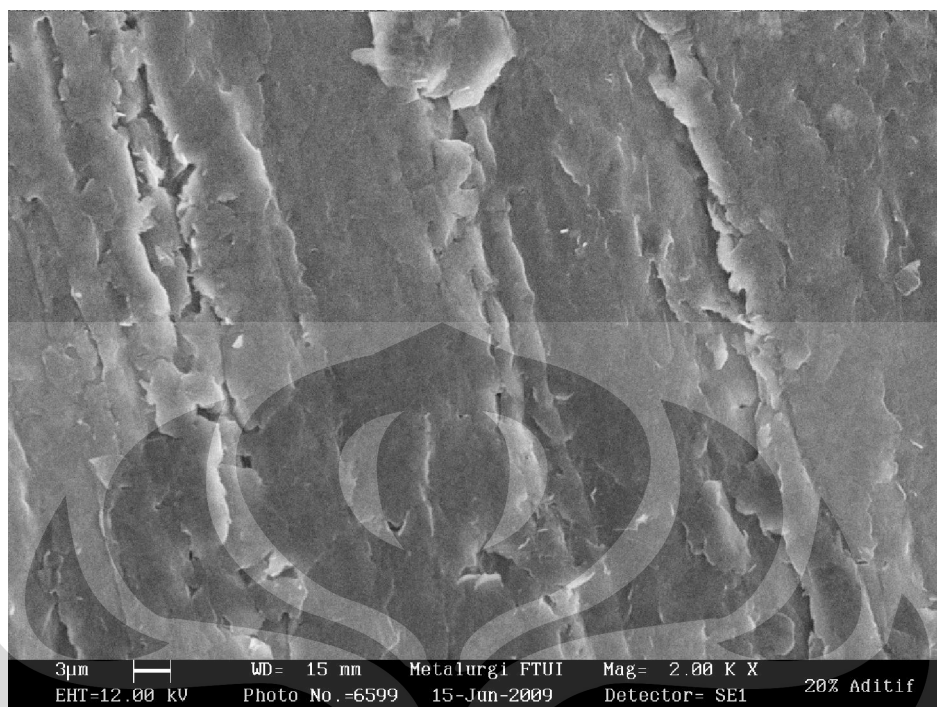


Gambar 4.10 Hasil pengamatan SEM sampel BP4 dengan perbesaran 2000X

Hasil visual SEM pada sampel BP4 hampir sama dengan penampakan pada sampel BP3, namun pada sampel BP4 grafit-grafit yang terlihat seperti tersusun membentuk barisan mempunyai struktur yang jauh lebih kasar. Susunan lapisan-lapisan grafit yang kasar ini membuat sampel BP4 mempunyai kekuatan yang sangat rendah, karena selain kasar susunan tersebut memiliki jumlah lapisan penyusun yang lebih banyak dari sebelumnya. Jadi dengan lapisan-lapisan grafit yang saling menumpuk satu sama lain, mekanisme *interlocking* antara Grafit dengan Epoxy menjadi sangat rendah.

Selain itu pada perbesaran 2000X, jumlah porositas sampel BP4 jauh meningkat daripada jumlah porositas sampel BP3. Ini terjadi karena pengikatan Grafit oleh Epoxy tidak berlangsung dengan baik.

4.3.5 Hasil Pengamatan SEM Sampel BP5



Gambar 4.11 Hasil Pengamatan SEM Sampel BP5 Perbesaran 2000X

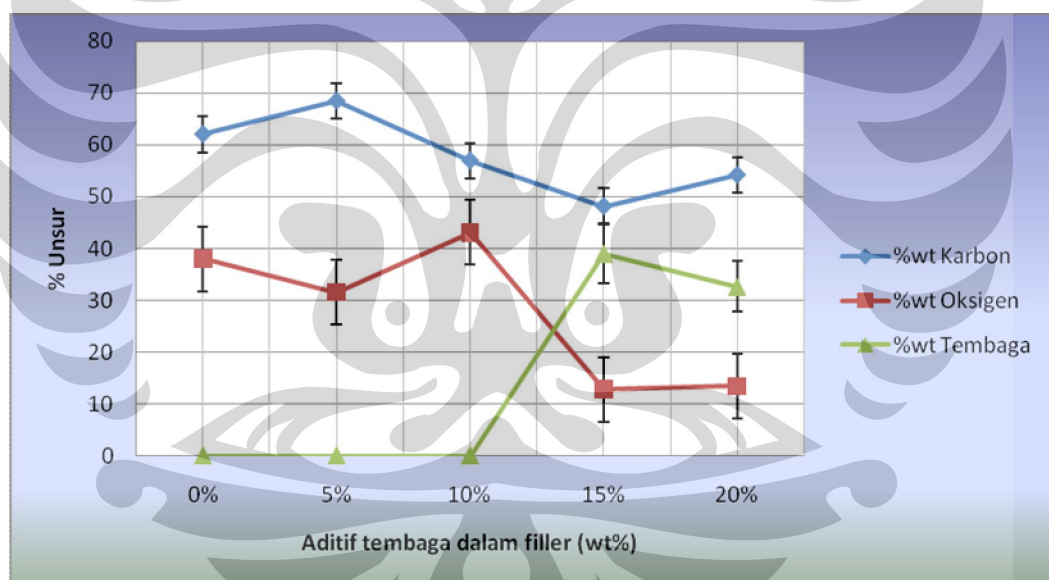
Pada perbesaran 100X (dapat dilihat pada Lampiran 7) terlihat bahwa sampel BP5 mempunyai struktur yang sangat tidak tersusun dengan rapih. Pada perbesaran 2000X dapat terlihat bahwa Grafit yang sangat kasar tidak terdispersi dengan baik di dalam komposit, melainkan menempel satu sama lain membentuk lapisan-lapisan tebal yang sangat rapuh. Diantara lapisan-lapisan tersebut terdapat jarak yang cukup lebar, ruas tersebut berbentuk seperti lorong kosong yang terdiri dari *void-void* yang jumlahnya sangat banyak. Ruang-ruang kosong ini menyebabkan kemampuan grafit sebagai unsur penguat tidak dapat diaplikasikan dengan baik.

Hal ini membuktikan bahwa Epoxy tidak dapat membasahi seluruh permukaan Grafit untuk mendapatkan kontak permukaan dan *wetability* yang baik, sehingga kekuatan mekanis sampel yang dihasilkan rendah dan cenderung sangat lunak. Dugaan terkuat Epoxy pada komposit belum mengering secara sempurna akibat bereaksi dengan aditif Tembaga, namun karena pengujian SEM tidak bisa mendeteksi senyawa atau unsur yang mengandung H (sangat *volatile*, mudah menguap), hipotesis ini belum dapat untuk disimpulkan.

4.4 Pengujian *Energy Dispersive X-Ray Analysis*

Pengujian EDX menggunakan energi e^- yang lebih tinggi dari pengujian SEM, EDX menggunakan energi 458 pA sedangkan SEM hanya menggunakan energi sebesar 14 pA. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui unsur-unsur mayoritas yang terdapat pada kelima sampel. Peralatan EDX tidak dapat menangkap unsur H, karena unsur tersebut bersifat *volatile* atau mudah menguap.

Pada kelima sampel, unsur yang akan coba disandingkan adalah perbandingan antara unsur karbon, oksigen dan tembaga (Cu), ini dilakukan karena dengan adanya penambahan aditif tembaga maka diharapkan kandungan unsur tembaga akan meningkat dan pada sebaliknya, unsur karbon dan oksigen akan berkurang. Hasil pengujian EDX dapat dilihat sebagaimana pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Hasil Pengujian EDX

Pada hasil pengujian EDX, jumlah unsur tembaga pada sampel dengan aditif 5% dan 10% berada pada jumlah yang sangat sedikit sekali sehingga tidak terbaca pada tabel hasil unsur-unsur yang terdeteksi oleh EDX. Kandungan unsur tembaga baru terdeteksi pada sampel BP4 (aditif 15%) dan BP5 (aditif 20%), dan nilainya secara spontan langsung berada pada titik yang cukup tinggi. Tidak terdeteksinya unsur tembaga pada sampel BP2 dan BP3 kemungkinan diakibatkan oleh terhalang unsur karbon dan oksigen yang sangat mendominasi, serta

kemungkinan kedua pada sampel BP2 dan BP3 terjadi gejala *charging*, yaitu ada bagian pada sampel tersebut yang tidak cukup konduktif untuk menghantarkan elektron sehingga proses pengidentifikasian unsur pada sampel tersebut memiliki tingkat kesalahan yang cukup besar.

Tren grafik yang cenderung fluktuatif ditampilkan oleh ketiga unsur yang terdeteksi oleh EDX, yaitu C, O dan Cu. Hal ini tidak sesuai dengan komposisi sampel yang dibuat sesuai prosedur dan penetapan jumlah kandungan masing-masing unsur yang tepat. Hasil yang seharusnya terjadi adalah menurunnya kadar karbon dalam komposit serta diikuti oleh meningkatnya kadar tembaga. Hal itu yang seharusnya terjadi, karena pada setiap dilakukan penambahan aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat maka jumlah Grafit (C) pada sampel akan berkurang.

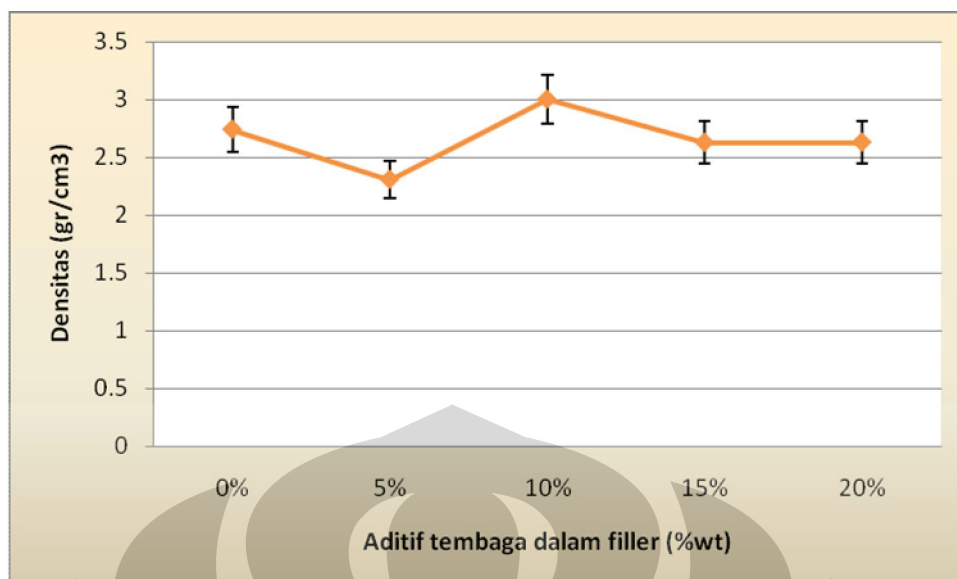
Kandungan tembaga yang seharusnya paling banyak terdapat pada sampel BP5 (penambahan aditif 20%), namun berdasarkan analisa hasil EDX, sampel BP4 (dengan aditif 15%) memiliki kandungan tembaga yang paling banyak dibandingkan sampel lainnya. Sedangkan kandungan karbon yang paling banyak seharusnya terjadi saat tidak dilakukan penambahan aditif tembaga yaitu sampel BP1, namun yang terjadi justru pada sampel BP2 (aditif 5%) memiliki kandungan karbon tertinggi yaitu 68,423%.

4.5 Pengujian Densitas

Hasil dari pengujian untuk mendapatkan nilai densitas dari kelima sampel pelat bipolar ditunjukkan oleh Tabel 4.6 dan Gambar 4.13 dibawah.

Tabel 4.1 Densitas sampel pelat bipolar

Sampel	BP1 (0% aditif)	BP2 (5% aditif)	BP3 (10% aditif)	BP4 (15% aditif)	BP5 (20% aditif)
Densitas (gr/cm ³)	2.74	2.31	3	2.627	2.63



Gambar 4.13 *Composite Bulk Density*

Hasil pengujian densitas menunjukkan hasil yang cukup fluktuatif, nilai densitas yang didapatkan berkisar antara 2.3 – 3 gr/cm³. Dengan adanya penambahan aditif tembaga, nilai densitas komposit mengalami penurunan yang cukup signifikan pada penambahan 5% aditif tembaga yaitu dari 2.74 gr/cm³ menuju 2.3 gr/cm³, namun kembali meningkat secara drastis menjadi 2.99 gr/cm³ pada penambahan 10% aditif. Sirkulasi yang cenderung turun-naik ini kembali berlanjut pada penambahan aditif sampel-sampel berikutnya.

Hal ini bertentangan dengan literatur yang menyatakan bahwa penambahan aditif tembaga (II) asetat monohidrat dengan densitas 1.88 gr/cm³ yang semakin banyak seharusnya menurunkan densitas komposit secara keseluruhan, karena jumlah kandungan grafit dengan densitas lebih besar yaitu 2.2 gr/cm³ akan semakin menurun [9]. Hukum densitas ini berlaku karena jumlah material dengan densitas yang lebih kecil terus bertambah, sedangkan jumlah material dengan densitas lebih besar terus menurun. Hasil pengujian dikatakan bertentangan karena nilai densitas komposit mengalami peningkatan pada variabel penambahan aditif tembaga 10% (BP3) dan 20% (BP5).

Nilai densitas pelat bipolar akan mempengaruhi berat total suatu *fuel-cell stack* [9]. Dimana, untuk menghasilkan *fuel cell* yang ringan nilai densitas pelat bipolar yang didapatkan harus serendah mungkin [9]. Berdasarkan pengujian

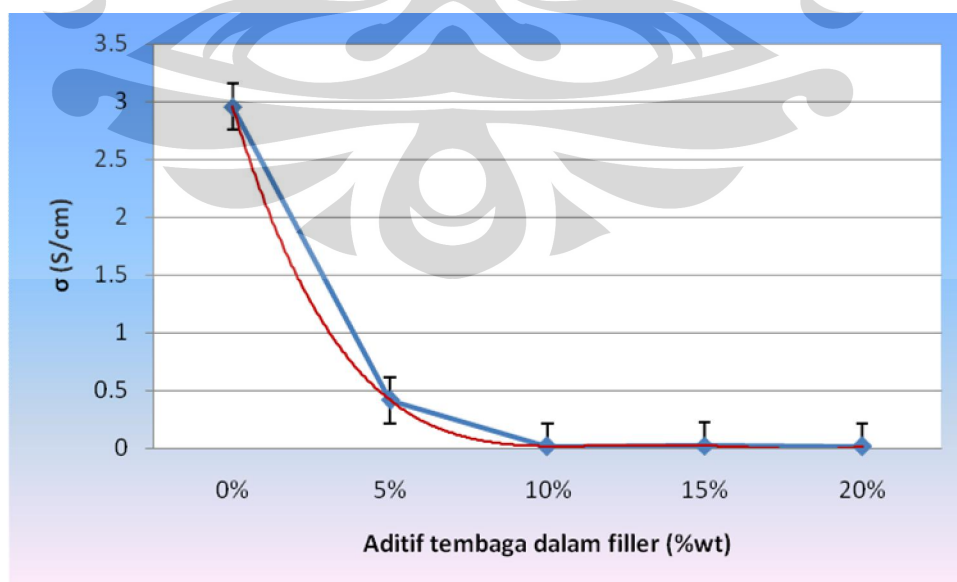
densitas yang telah dilakukan, nilai densitas yang paling optimum didapatkan pada sampel dengan penambahan aditif tembaga sebesar 5% (BP1), yaitu sebesar 2.3 gr/cm^3 .

4.6 Pengujian Konduktivitas

Dari hasil pengukuran resistivitas yang dilakukan oleh alat *four point probe* akan didapatkan nilai konduktivitas (S/cm) komposit pelat bipolar untuk mengetahui kemampuan komposit pelat bipolar untuk menghantarkan listrik, seperti dapat dilihat sebagaimana pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.14.

Tabel 4.2 Resisitivitas dan konduktivitas sampel pelat bipolar

Sampel	BP1 (0% aditif)	BP2 (5% aditif)	BP3 (10% aditif)	BP4 (15% aditif)	BP5 (20% aditif)
Resistivitas ($\Omega\text{-cm}$)	0.338	2.4	60.2	46.67	62.73
Konduktivitas (S/cm)	2.95	0.417	0.017	0.02	0.016



Gambar 4.14 Composite Bulk Conductivity


Hasil pengujian untuk mendapatkan nilai resistivitas dan konduktivitas menunjukkan bahwa penambahan aditif tembaga mempengaruhi kemampuan pelat bipolar untuk menghantarkan listrik. Namun, hasil yang didapat sangat mengejutkan, dimana penambahan aditif tembaga yang diharapkan dapat meningkatkan konduktivitas dan menurunkan resistivitas pelat bipolar, ternyata tidak terjadi. Penambahan aditif ternyata akan menurunkan konduktivitas dan meningkatkan resistivitas pelat bipolar.

Dengan semakin meningkatnya jumlah aditif tembaga dalam komposisi pelat bipolar, maka konduktivitasnya cenderung menurun, walaupun sempat mengalami peningkatan pada penambahan 15% aditif. Tingkat konduktivitas yang paling baik dihasilkan justru pada saat penambahan aditif tidak dilakukan alias pada sampel BP1, sedangkan penambahan aditif tembaga yang paling optimum untuk meningkatkan konduktivitas yaitu sebesar 5%, dimana didapatkan nilai 2.955 S/cm.

Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa, penambahan aditif tembaga dinilai tidak efektif karena akan menurunkan konduktivitas komposit. Hal ini terjadi akibat pembentukan *electrical conductive matrix* oleh grafit, yang akan meningkatkan konduktivitas pelat bipolar jika kandungan grafit diatas 65%, tidak terjadi [9]. Kegagalan pembentukan tersebut disebabkan oleh reaksi Grafit dengan senyawa $C_4H_6CuO_4.H_2O$ yang terdapat dalam aditif tembaga, akan menghalangi formasi matriks konduktif yang dibentuk antara Grafit dengan Epoxy Resin.

4.7 Perbandingan Sifat Sampel Pelat Bipolar

Berdasarkan pengamatan visual maka urutan kekokohan yang dimiliki oleh sampel adalah sebagai berikut:

Kekokohan Sampel	<p style="text-align: center;">BP1 > BP2 > BP3 > BP4 > BP5</p> <p style="text-align: center;">  Semakin baik </p>
------------------	--

Dapat dilihat bahwa kekokohan sampel akan semakin menurun seiring semakin meningkatnya penambahan aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat. Dengan semakin banyaknya penambahan aditif, sampel yang dihasilkan akan menjadi lebih lunak, lembab, mengalami penurunan kekakuan, mudah patah serta semakin sulit untuk dibuat, ini menunjukkan *processability* sampel dengan penambahan aditif lebih banyak akan menjadi semakin rendah karena kemungkinan sampel gagal semakin tinggi dan untuk mendapatkan kekuatan mekanis yang baik akan semakin sulit.

Berdasarkan hasil karakterisasi, maka perbandingan sifat-sifat sampel yang dihasilkan akan ditunjukkan oleh Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Tabel perbandingan sifat-sifat sampel pelat bipolar

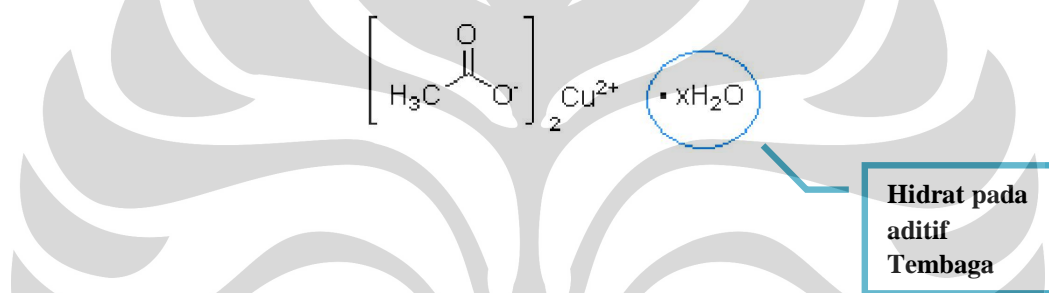
Sampel →	BP1	BP2	BP3	BP4	BP5
Pengujian ↓					
Resistivitas (Ω -cm)	0.338	2.4	60.2	46.67	62.73
Konduktivitas (S/cm)	2.95	0.417	0.017	0.02	0.016
Densitas (gr/cm ³)	2.74	2.3	3	2.627	2.63
SEM	Persebaran Grafit baik	Banyak porositas	Halus dan terstruktur	Lebih kasar dan padat	Struktur paling kasar
% Karbon	62,02	68,423	56,923	48,13	54,153
% Oksigen	37,98	31,5767	43,0767	12,81	13,393
% Tembaga	0	0	0	39,06	32,62

Dapat dilihat bahwa sampel BP1 memiliki nilai konduktivitas tertinggi dan resistivitas terendah, ini menunjukkan bahwa sampel tersebut paling baik untuk menghantarkan arus listrik. Sedangkan sampel BP2 dengan aditif 5%, mempunyai densitas yang paling rendah dibandingkan dengan sampel lain. Dari hasil pengujian EDX, sampel BP2 memiliki kandungan karbon terbesar, sampel BP3

dengan kandungan oksigen terbesar dan sampel BP4 mengandung kandungan tembaga yang paling banyak.

4.8 Analisa Kegagalan Pembuatan Pelat Bipolar

Kekuatan mekanis yang buruk pada sampel BP3, BP4 dan BP5, sekaligus tingkat porositas yang sangat tinggi pada sampel BP2, mempunyai korelasi dengan adanya penambahan aditif tembaga pada keempat sampel tersebut. Terutama dengan adanya senyawa hidrat yang dimiliki oleh aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat yang dapat dilihat pada Gambar 4.15 berikut.



Gambar 4.15 Struktur molekul Tembaga (II) Asetat Monohidrat

<http://www.americanelements.com/cuono.html> (telah diolah kembali)

Senyawa hidrat yang terkandung dalam aditif tembaga ternyata tidak hilang/tereliminasi saat dilakukan proses penekanan dengan temperatur pada mesin *hot press*, ini disebabkan karena temperatur input pada mesin ternyata belum cukup untuk menghilangkan senyawa tersebut dari sampel [31]. Karena temperatur yang digunakan pada mesin hanya 70 °C, sedangkan temperatur minimal yang dibutuhkan agar terjadi dehidrasi Tembaga (II) Asetat Monohidrat adalah sebesar 353 – 406 K (80-133 °C) [31]. Hal ini terbukti dari ditemukannya senyawa tersebut melalui hasil pengujian XRD. Senyawa tersebut ditemukan pada sampel BP2, BP3, BP4 dan BP5. Pada ketiga sampel terakhir, jumlah senyawa yang ditemukan sangat tinggi, ini yang diduga menyebabkan buruknya kekuatan mekanis ketiga sampel tersebut.

Senyawa hidrat yang tidak menguap pada saat di-*press*, bereaksi dengan campuran Epoxy Resin dan Hardener dengan cara mencegah/memperlambat reaksi mereka untuk terjadinya *curing*. Epoxy masih berada dalam kondisi cair atau basah saat sampel dikeluarkan dari mesin, sehingga tingkat kelembapan sangat tinggi pada sampel.

'*Hard polymer*' sebagai matriks polimer untuk komposit pelat bipolar, yang seharusnya dihasilkan melalui reaksi *curing*, tidak dapat dihasilkan dengan baik karena adanya senyawa H₂O dalam sampel. Senyawa ini menyebabkan Epoxy masih berada dalam kondisi cair pada saat seharusnya dia memadat/membeku saat bereaksi dengan Hardener.

Sebagai konsekuensinya, matriks polimer yang tidak terbentuk dengan baik, tak mampu membasahi seluruh permukaan grafit dan menghasilkan *interface* yang buruk akibat kemampuan pembasahannya rendah. Mekanisme interaksi antara matriks dengan *reinforcement* yang tidak berjalan dengan sempurna akan mengakibatkan sifat mekanis, kimia dan elektrik sampel yang dihasilkan buruk. Dengan kekuatan mekanis sampel yang buruk dan tidak merata di seluruh bagian komposit, sebagian sisi dari sampel akan hancur saat diaplikasikan tekanan dan temperatur dalam mesin *hot press*, sehingga sebagian sampel mengalami kerusakan pada permukaannya.

Selain itu, adanya senyawa air dalam komposit menyebabkan terbentuknya ruang-ruang yang terisi oleh air tersebut sehingga tidak bisa diisi oleh *filler* komposit dan akan menghasilkan porositas dan *void* pada bagian tersebut.

BAB V

KESIMPULAN & SARAN

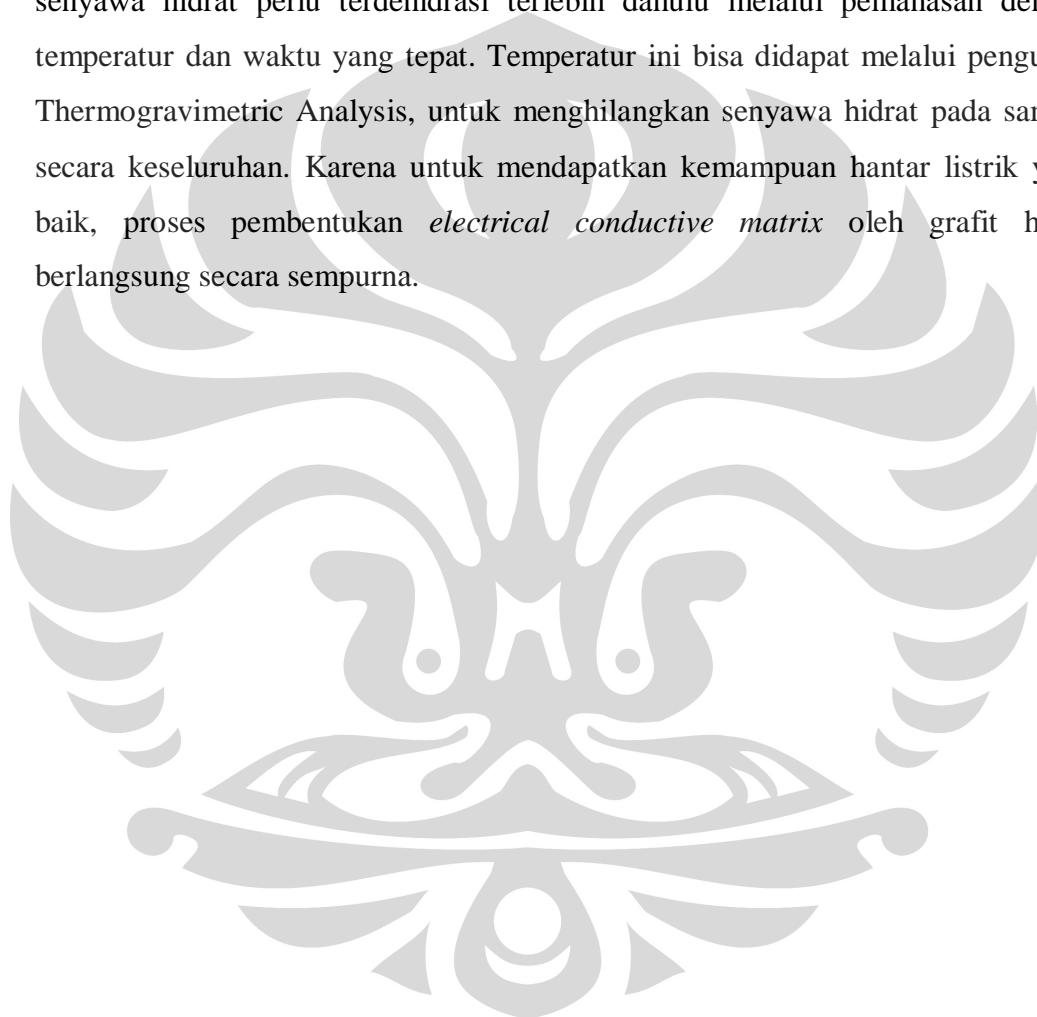
5.1 Kesimpulan

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

1. Penambahan aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat akan menghasilkan sampel dengan kekuatan mekanis yang lemah dan permukaan sampel yang kasar. Dapat disimpulkan bahwa, aditif tembaga tidak dapat diaplikasikan pada pembuatan pelat bipolar komposit.
2. Sampel dengan penambahan aditif tembaga tidak mengalami peningkatan konduktivitas, bahkan mengalami penurunan konduktivitas dan peningkatan resistivitas.
3. Komposisi yang paling optimal antara grafit dan aditif terjadi pada sampel BP2, dengan penambahan aditif tembaga sebesar 5%. Sampel tersebut mempunyai nilai konduktivitas sebesar 0.417 S/cm dan densitas 2.3 gr/cm³, namun konduktivitas masih lebih rendah dibandingkan sampel tanpa penambahan aditif.
4. *Productability* pelat bipolar dengan penambahan aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat cukup rendah, karena dalam pembuatan sampel resiko terjadinya kegagalan cukup tinggi dan sampel yang dihasilkan mempunyai sifat mekanis yang buruk.

5.2 Saran

Untuk mendapatkan pelat bipolar dengan konduktivitas yang lebih baik, aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat tidak dapat digunakan sebagai aditif untuk meningkatkan konduktivitas. Agar penambahan aditif dapat menghasilkan sampel dengan kekuatan yang baik dan peningkatkan konduktivitas, perlu digunakan aditif yang tidak mengandung senyawa hidrat. Atau jika tetap ingin digunakan, senyawa hidrat perlu terdehidrasi terlebih dahulu melalui pemanasan dengan temperatur dan waktu yang tepat. Temperatur ini bisa didapat melalui pengujian Thermogravimetric Analysis, untuk menghilangkan senyawa hidrat pada sampel secara keseluruhan. Karena untuk mendapatkan kemampuan hantar listrik yang baik, proses pembentukan *electrical conductive matrix* oleh grafit harus berlangsung secara sempurna.

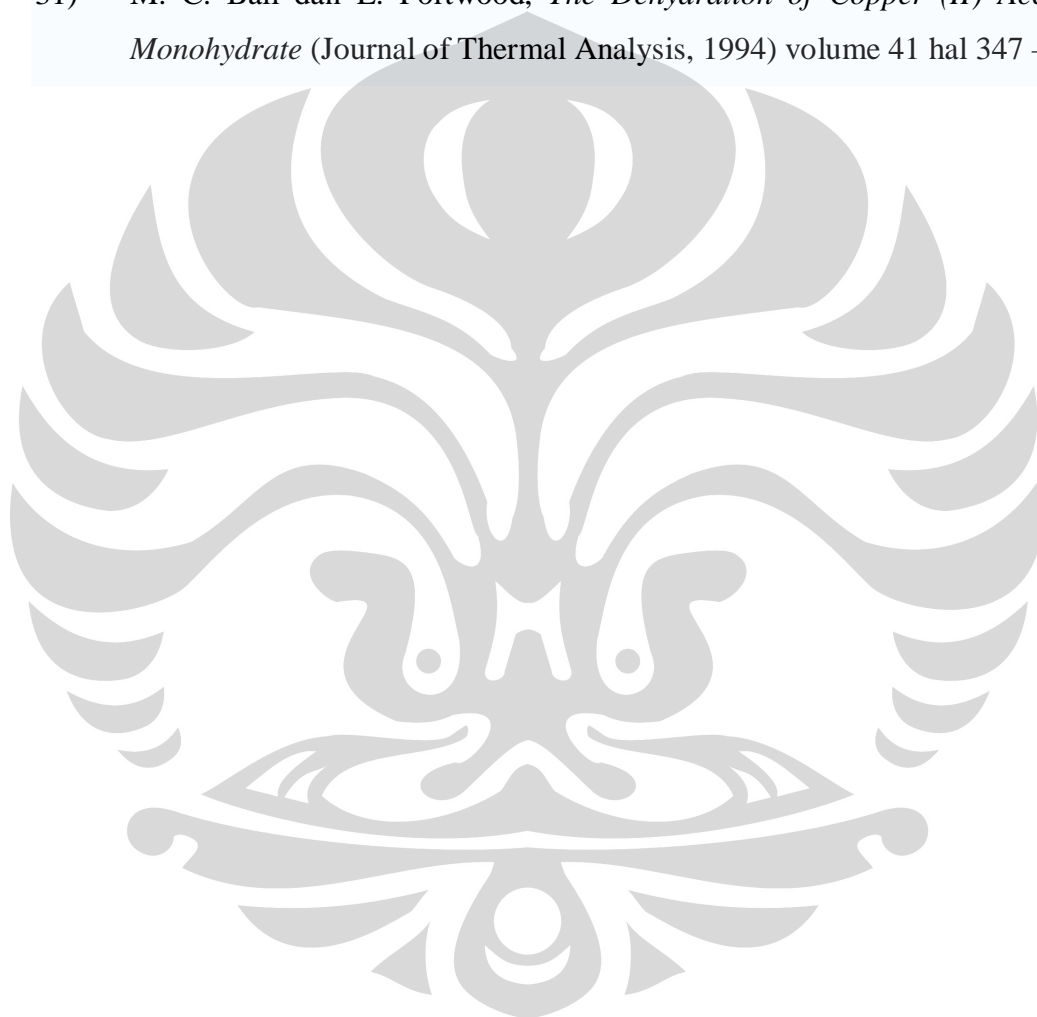


DAFTAR ACUAN

- 1) J.H. Hirschenhofer, D.B. Stauffer, R.R. Engleman, and M.G. Klett, *Fuel Cell Handbook Fourth Edition* (Parsons Corporation, 1998)
- 2) Nikhil H. Jalani, *Development of Nanocomposite Polymer Electrolyte Membrane for Higher Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (Worcester Polytechnique Institute)
- 3) A. Suhandi, N. Indayaningsih, B. Prihandoko, A. Subhan, *Research on PEMFC Graphite Composite Bipolar Plate Influenced by Composition of Filler and Binder* (Research Centre of Physics – Indonesia Institute of Sciences)
- 4) Hendrata Suhada, *Fuel Cell sebagai Penghasil Energi Abad 21* (Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra)
- 5) B. Prijamboedi dan Veinardi Suendo, *Penelitian tentang Sel Bahan Bakar Padatan dan Membran Polimer serta Komponen Pendukungnya di KK Kimia Fisik dan Anorganik* (Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung)
- 6) Allen Hermann, Tapas Chaudhuri and Priscila Spagnol, *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A Review* (Elsevier, 2005)
- 7) Joyce S. Cooper, *Design Analysis of PEMFC Bipolar Plates Considering Stack Manufacturing and Environment Impact* (Elsevier, 2003)
- 8) Anne Zulfia, *Diktat Kuliah Teknologi Komposit MMF420803* (Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2009)
- 9) 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)

- 10) <http://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy>
- 11) <http://www.efunda.com/>
- 12) http://www.huntsman.com/advanced_materials/index.cfm?PageID=5865
- 13) *Hazard Evaluation System and Information Service* (Department of Health Services, Richmond, California, 1989)
- 14) <http://www.matweb.com/Search/MaterialGroupSearch.aspx?GroupID=84>
- 15) <http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol>
- 16) <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3f64b985402445c0a5af911135909344>
- 17) <http://www.mindat.org/show.php?id=1740&ld=1&pho=>
- 18) Technical Information: *Graphite for Polymer Materials*, GK KROPFMUHL.
- 19) <http://www.galleries.com/minerals/elements/graphite/graphite.htm>
- 20) http://www.merck-chemicals.com/is-bin/INTERSHOP.enfinity/WFS/Merck-ID-Site/id_ID/-/IDR
- 21) <http://en.wikipedia.org/wiki/Graphite>
- 22) <http://carbon-black.org/>
- 23) http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_black
- 24) Man Wu and Leon L. Shaw, *A Novel Concept of Carbon-filled Polymer Blends for Applications in PEM Fuel Cell Bipolar Plates* (Elsevier, 2004)
- 25) H. Wayne Richardson, *Handbook of Cooper Compounds and Applications*
- 26) <http://www.americanelements.com/cuono.html>
- 27) http://www3.kanto.co.jp/catalog/spec/E_D074730.pdf

- 28) *Powder Diffraction File: Alphabetical Indexes and Search Manual Hanawalt Method for Inorganic Phases* (JCPDS – International Centre for Diffraction Data, 1990)
- 29) *Evaluasi, karakterisasi, dan analisis polimer*. Kimia Polimer.
- 30) http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_conductivity
- 31) M. C. Ball dan L. Portwood, *The Dehydration of Copper (II) Acetate Monohydrate* (Journal of Thermal Analysis, 1994) volume 41 hal 347 – 3



Lampiran 1 Komposisi Material Penyusun Komposit Pelat Bipolar

Material	Satuan	Kode Sampel				
		BP1	BP2	BP3	BP4	BP5
Epoxy Resin (matriks)	% wt	10	10	10	10	10
	gr	12	12	12	12	16
Epoxy Hardener (matriks)	% wt	10	10	10	10	10
	gr	12	12	12	12	16
Aditif Tembaga (II) Asetat Monohidrat	% wt	0	4	8	12	16
	gr	0	4.8	9.6	14.4	25.6
Grafit sintetik (filler)	% wt	76	72	68	64	60
	gr	91.2	86.4	81.6	76.8	96
Carbon black (filler)	% wt	4	4	4	4	4
	gr	4.8	4.8	4.8	4.8	6.4
Total	gr	120	120	120	120	160

Lampiran 2 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction

(a) Perbandingan nilai d-value pengujian dengan d-value referensi dengan menggunakan Hanawalt Method untuk sampel BP1.

Eksperimen		Referensi		Referensi	
average d-value	Rel. int [%]	d-value C/Graphite, syn	Intensity	d-value Carbon	Intensity
3,32975	100	3,35	100%		
2,1177	0,6			2,11	100%
2,02645	1,3	2,03	20%		
1,8045	0,1			1,93	40%
1,6759	4,4	1,67	10%		
1,5449	0,2	1,54	10%		
1,23015	0,7	1,23	10%		
1,15535	0,5	1,15	10%		
1,1206	0,5			1,16	20%

(b) Perbandingan nilai d-value pengujian dengan d-value referensi dengan menggunakan Hanawalt Method untuk sampel BP2.

Eksperimen		Referensi		Referensi		Referensi	
average d-value	Rel. int [%]	d-value $C_4H_6CuO_4 \cdot H_2O$	Int.	d-value Graphite, syn	Int.	d-value C	Int.
5,3845	0,1	5,38	30%				
3,34935	100			3,35	100%		
2,5212	0,1						
2,13055	0,6					2,14	30%
2,0824	0,4					2,08	100%
2,03745	1			2,03	20%		
2,0284	1					2,01	60%
1,7997	0,1						
1,6791	3,8			1,67	10%		
1,5413	0,2			1,54	10%		
1,2313	0,7			1,23	10%		
1,15555	0,4			1,15	10%		
1,1202	0,4					1,16	20 %

Lampiran 2 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction (lanjutan)

(c) Perbandingan nilai d-value pengujian dengan d-value referensi dengan menggunakan Hanawalt Method untuk sampel BP3.

Eksperimen		Referensi		Referensi		Referensi	
average d-value	Rel. int [%]	d-value $C_4H_6CuO_4 \cdot H_2O$	Int.	d-value Graphite, syn	Int.	d-value C	Int.
9,0753	2						
6,7765	0,5						
5,3442	0,2	5,38	30%				
4,62935	0,5						
3,32425	100			3,35	100%		
3,10125	0,1						
2,47585	0,1						
2,31985	0,3	2,29	10%				
2,12005	1,2					2,11	100%
2,0284	1,9			2,03	20%		
2,0192	1,9					2,03	100%
1,7913	0,1						
1,6746	3,8			1,67	10%		
1,5407	0,2			1,54	10%		
1,4462	0						
1,32785	0					1,32	20%
1,2294	1,3			1,23	10%		
1,2258	0,6					1,24	40%
1,15505	0,9			1,15	10%		
1,12035	0,3					1,08	30%

Lampiran 2 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction (lanjutan)

(d) Perbandingan nilai d-value pengujian dengan d-value referensi dengan menggunakan Hanawalt Method untuk sampel BP4.

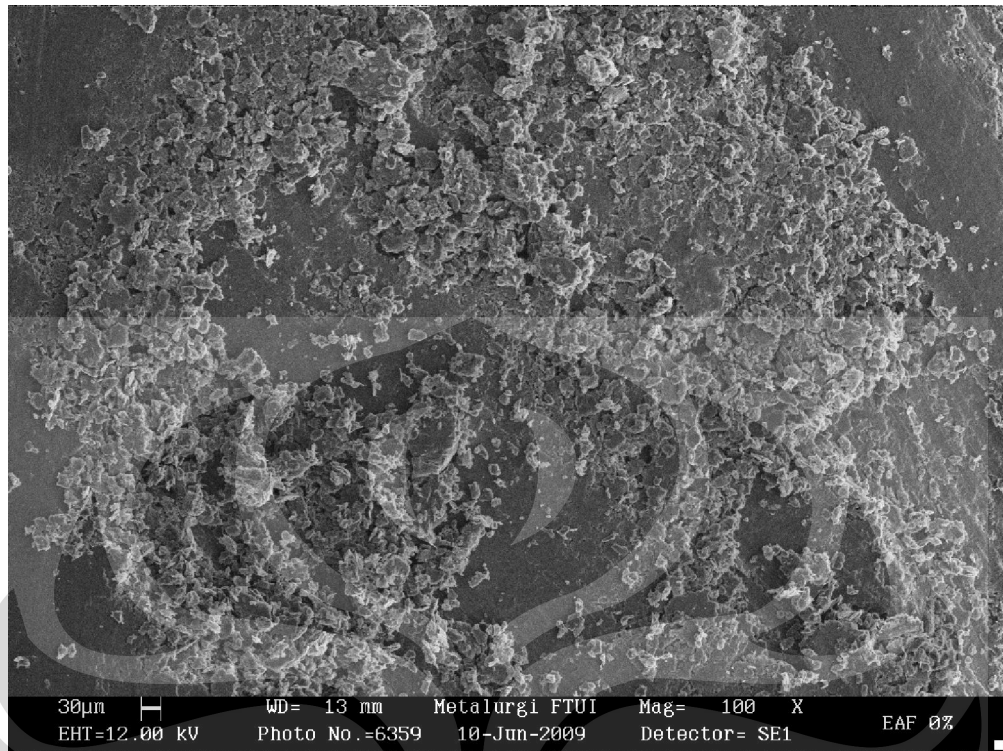
Eksperimen		Referensi		Referensi		Referensi	
average d-value	Rel. int [%]	d-value $C_4H_6CuO_4 \cdot H_2O$	Int.	d-value Graphite, syn	Int.	d-value C	Int.
8,9743	2,8						
6,7534	2,7						
6,66485	4						
6,00625	0,4						
5,83715	1,2	5,87	30%				
5,7284	0,5	5,75	20%				
5,5762	0,4						
5,2608	0,6						
4,6032	0,7						
3,5348	1,1	3,53	20%				
3,4685	1,3						
3,40725	3,4						
3,3103	100			3,35	100%		
3,0928	0,3						
2,62175	0,1						
2,47485	0,2						
2,3653	0,3						
2,30955	0,2	2,29	10%				
2,2677	0,3						
2,19785	0,6						
2,1118	0,9					2,11	100%
2,0175	1,8			2,03	20%		
1,91895	0,3					1,93	40%
1,78135	0,1						
1,66855	4			1,67	10%		
1,5324	0,2			1,54	10%		
1,4152	0,1						
1,22765	0,9			1,23	10%		
1,1999	0,1					1,26	30%
1,17085	0					1,16	20%
1,15235	0,7			1,15	10%		
1,11785	0,4					1,08	20%

Lampiran 2 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction (lanjutan)

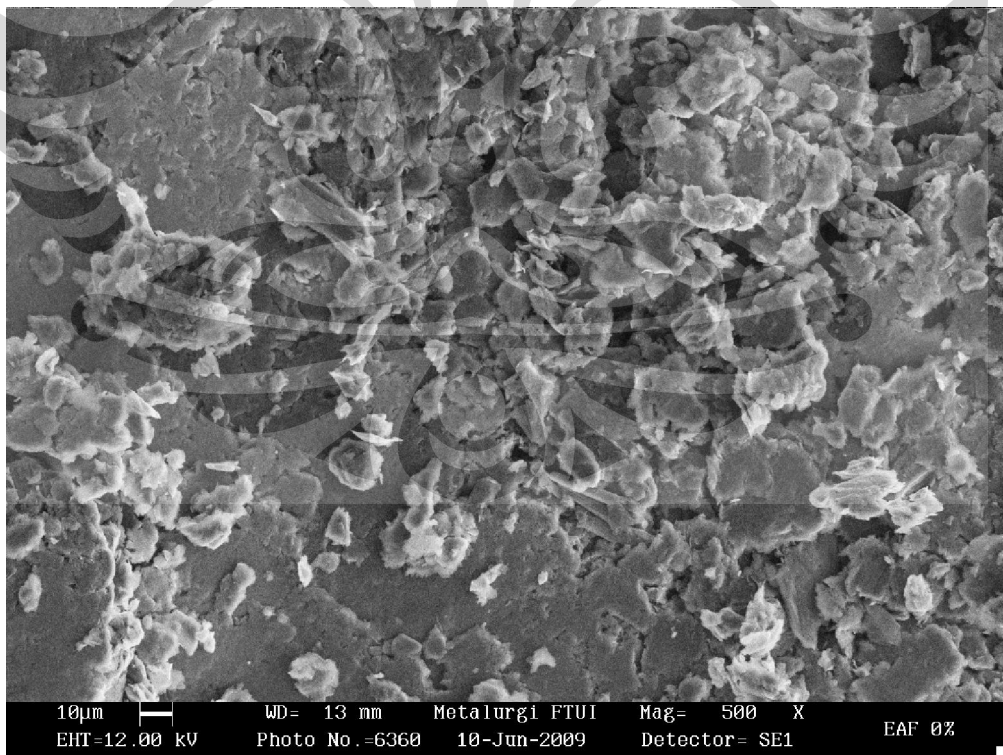
(e) Perbandingan nilai d-value pengujian dengan d-value referensi dengan menggunakan Hanawalt Method untuk sampel BP5.

Eksperimen		Referensi		Referensi		Referensi	
average d-value	Rel. int [%]	d-value $C_4H_6CuO_4 \cdot H_2O$	Int.	d-value Graphite, syn	Int.	d-value C	Int.
16,5251	0,1						
9,1173	5,4						
6,79465	3,2						
6,1134	0,9	6,17	40%				
5,78225	1,3	5,75	20%				
5,349	1,1	5,38	30%				
4,64375	1,1						
4,23605	0,2						
3,57175	2,5	3,53	20%				
3,33705	100			3,35	100%		
3,11125	0,5						
2,7832	0,1						
2,71345	0,1						
2,62435	0,3						
2,53395	0,3						
2,4778	0,4						
2,4202	0,1						
2,37705	0,2						
2,3285	0,2						
2,27375	0,3	2,29	10%				
2,20895	0,3					2,18	30%
2,1241	0,9					2,11	100%
2,0284	1,8			2,03	20%		
1,92335	0,2					1,93	40%
1,8678	0,1						
1,803	0,7						
1,6767	3,8			1,67	10%		
1,55795	0,2			1,54	10%		
1,5433	0,2						
1,4464	0						
1,22995	0,8			1,23	10%		
1,15525	0,7			1,15	10%		
1,1206	0,4					1,16	20%

Lampiran 3 Hasil Foto SEM Sampel BP1

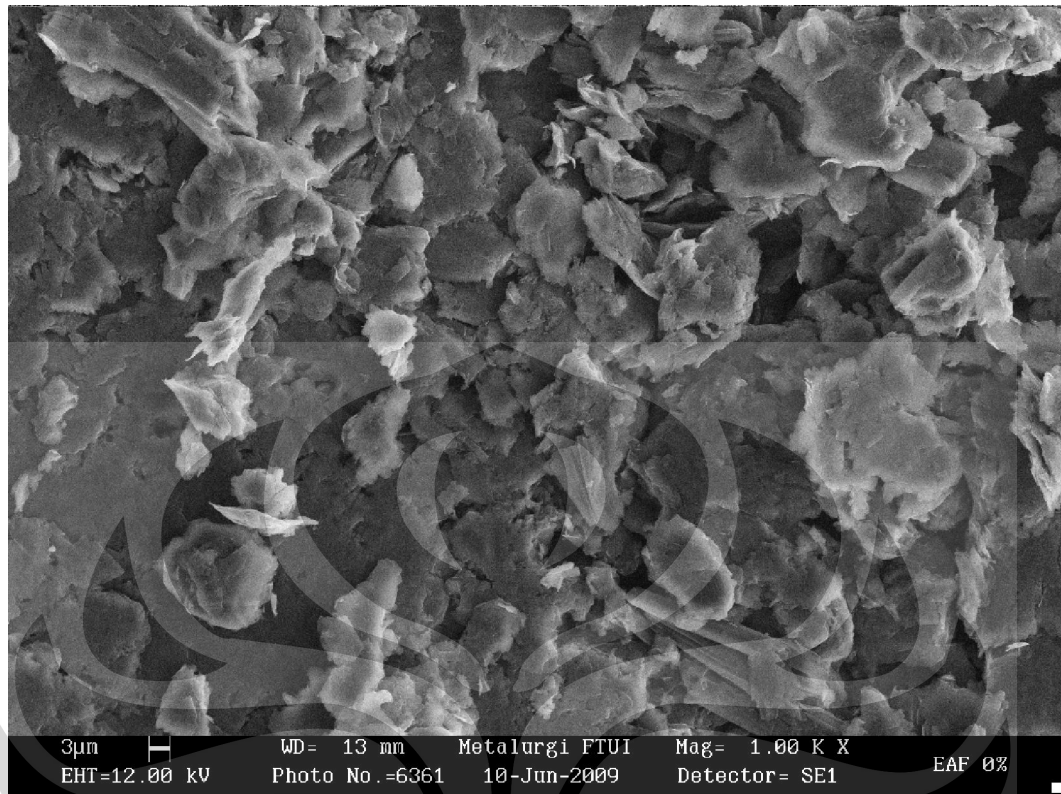


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP1 Perbesaran 100X

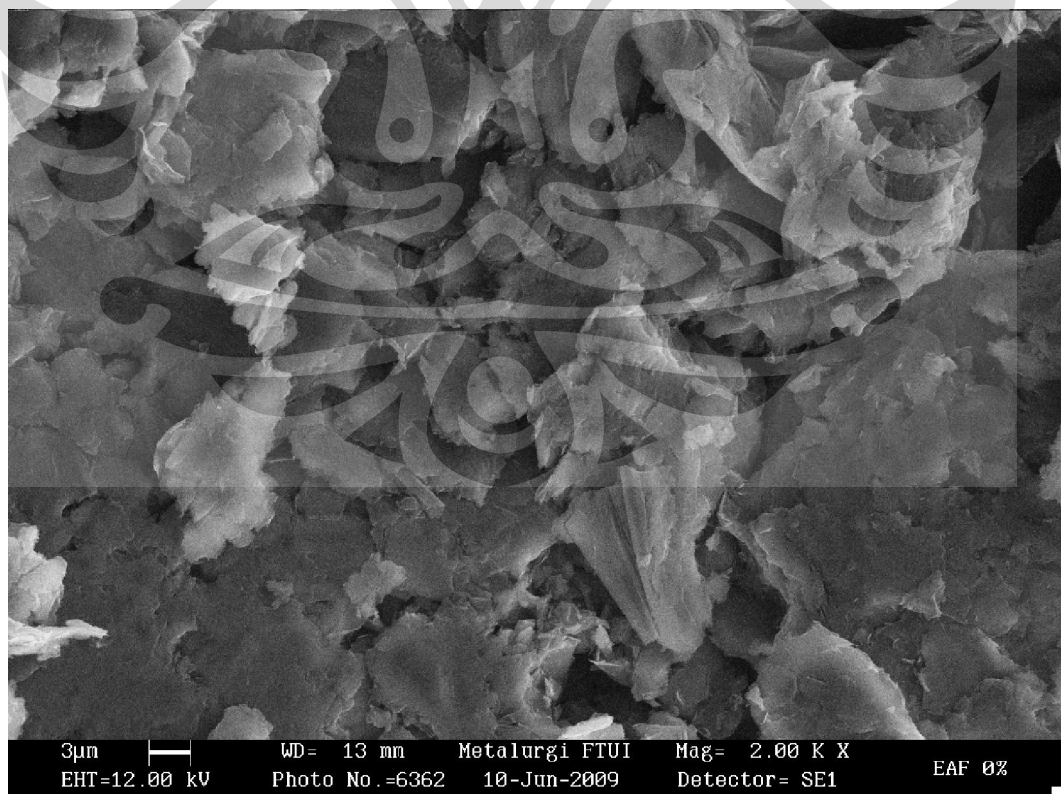


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP1 Perbesaran 500X

Lampiran 3 Hasil Foto SEM Sampel BP1 (lanjutan)

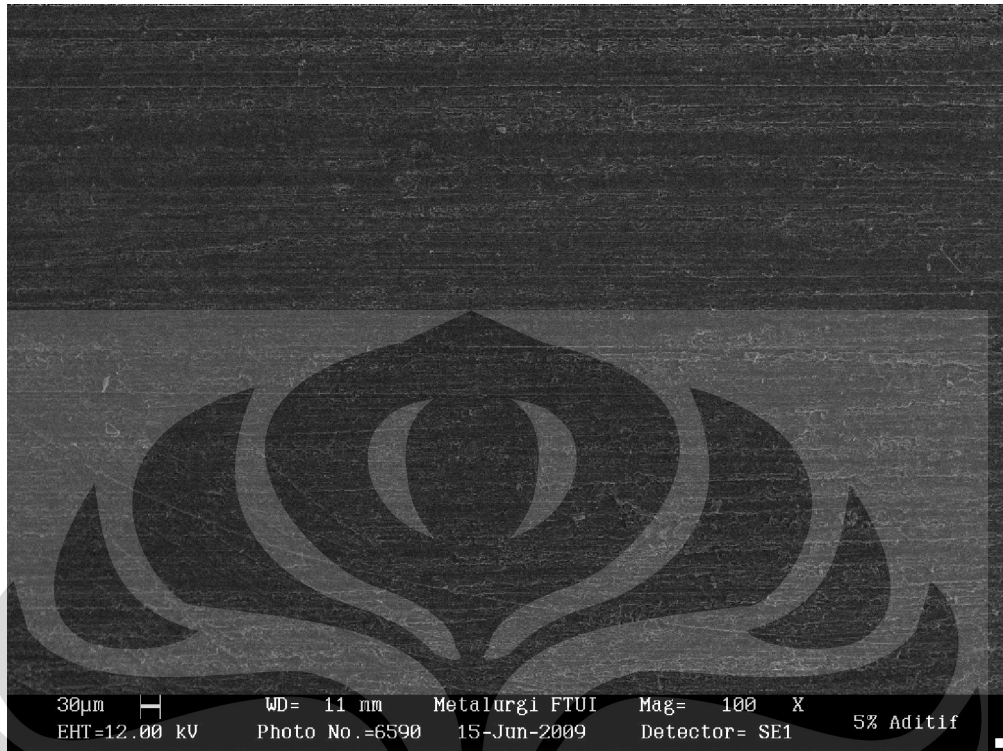


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP1 Perbesaran 1000X

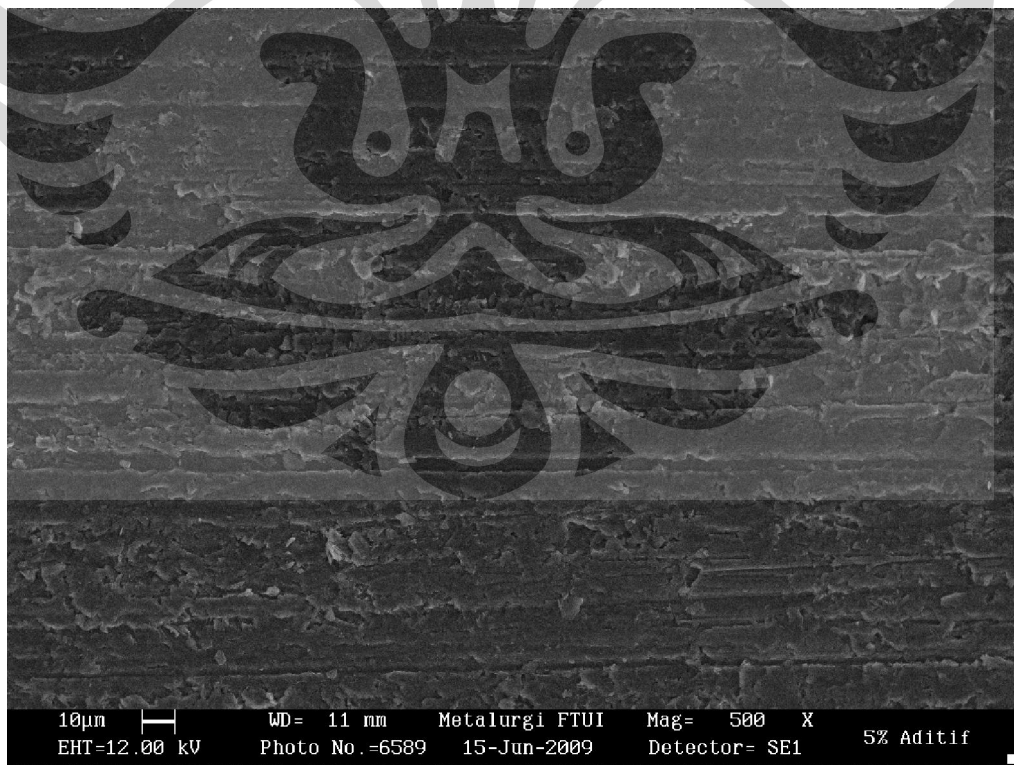


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP1 Perbesaran 2000X

Lampiran 4 Hasil Foto SEM Sampel BP2

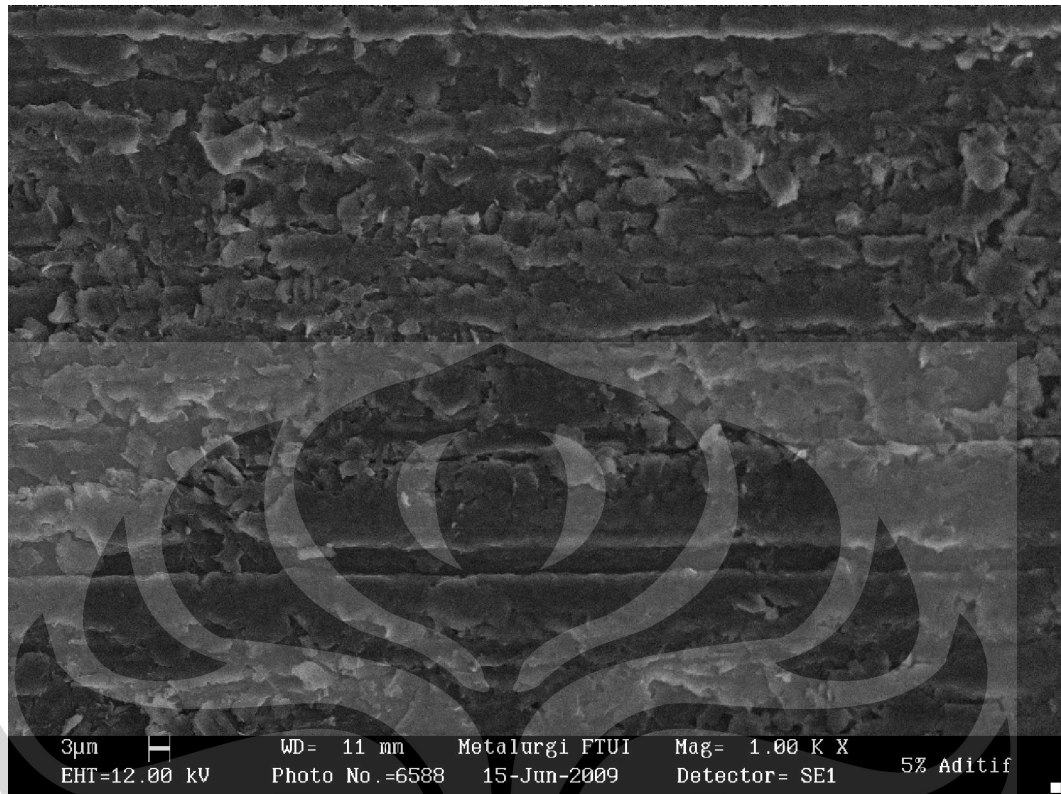


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP2 Perbesaran 100X

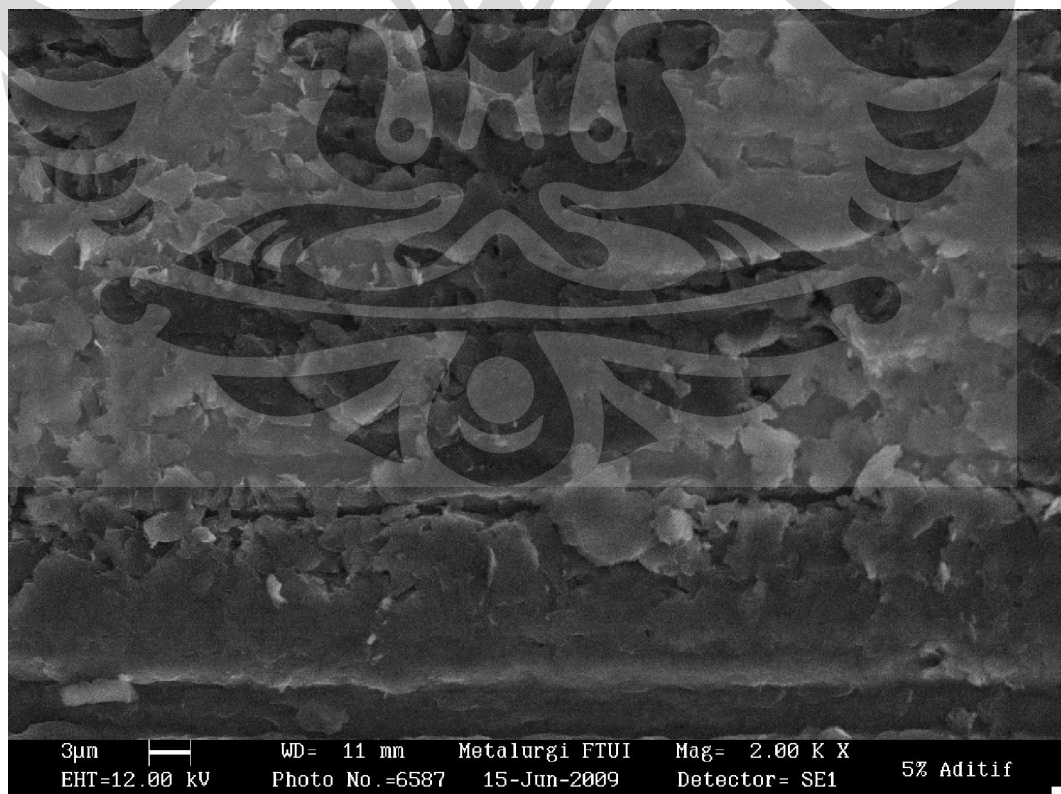


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP2 Perbesaran 500X

Lampiran 4 Hasil Foto SEM Sampel BP2 (lanjutan)

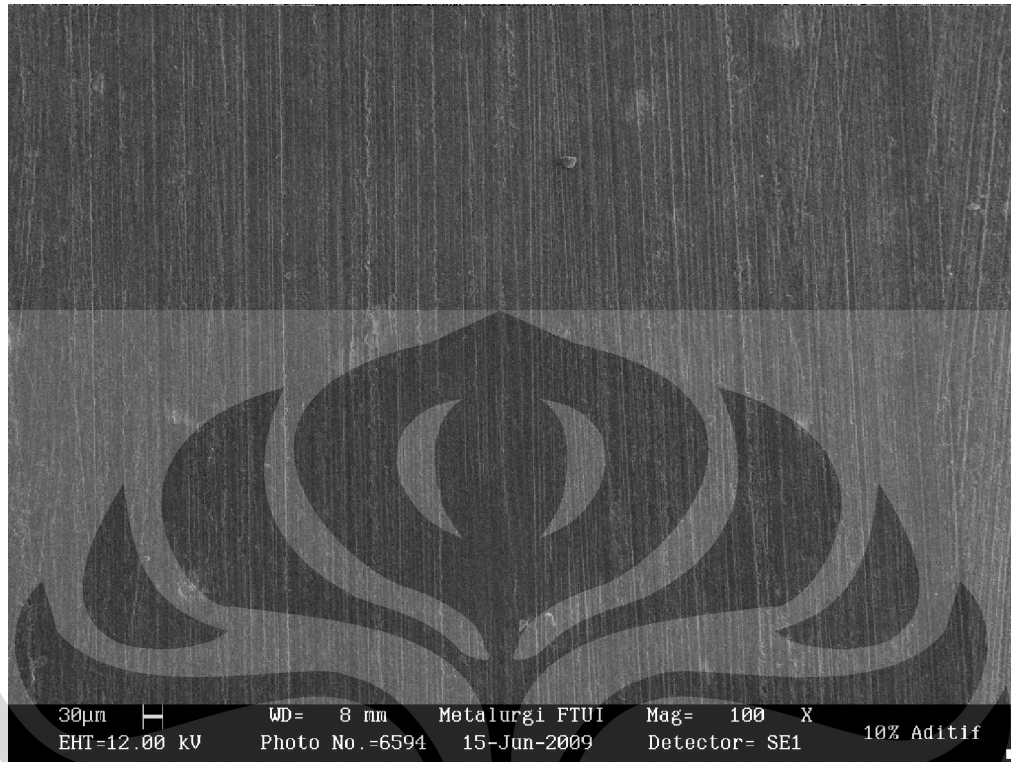


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP2 Perbesaran 1000X

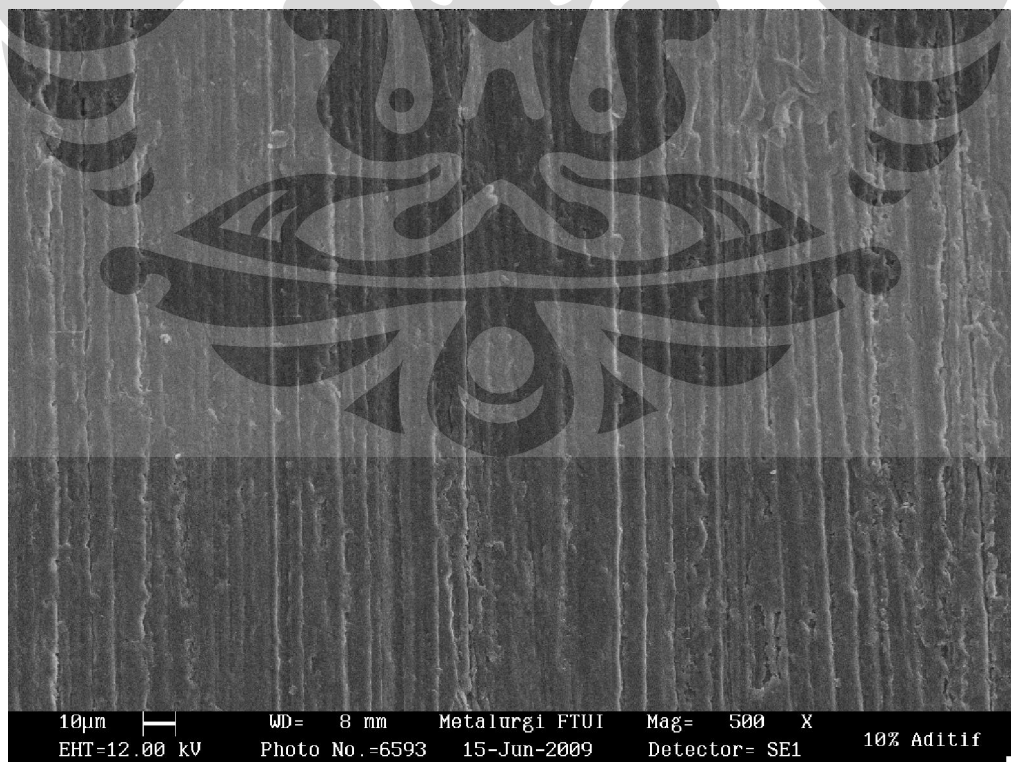


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP2 Perbesaran 2000X

Lampiran 5 Hasil Foto SEM Sampel BP3

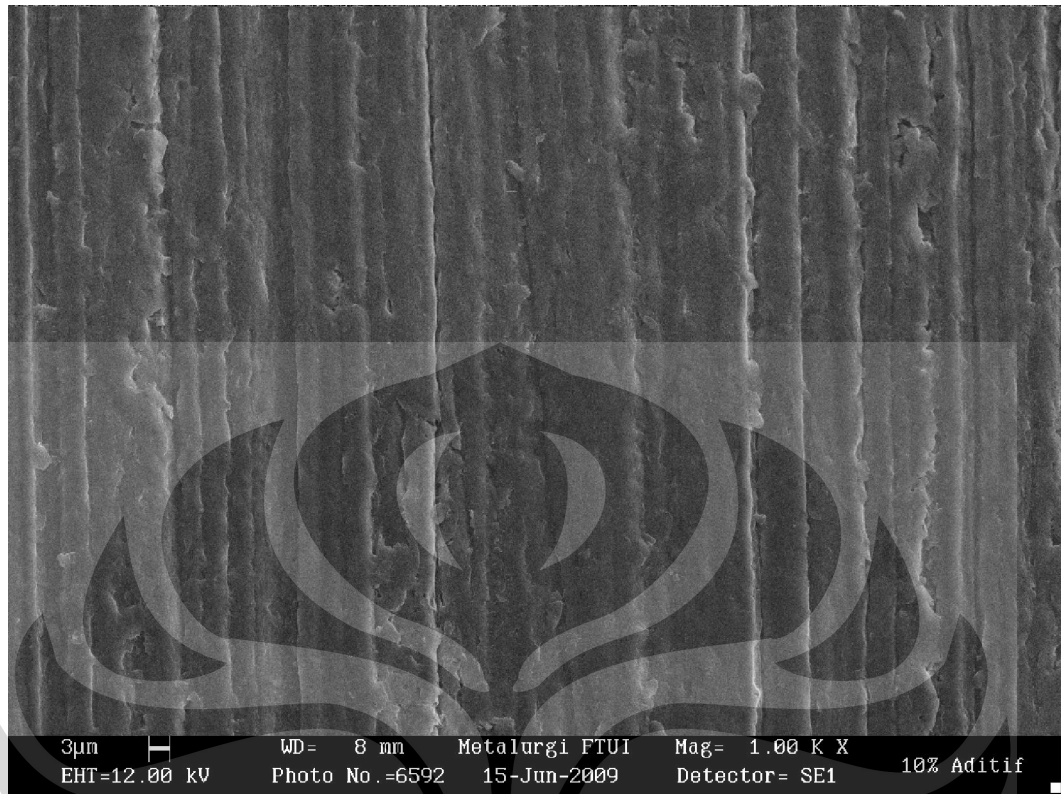


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP3 Perbesaran 100X

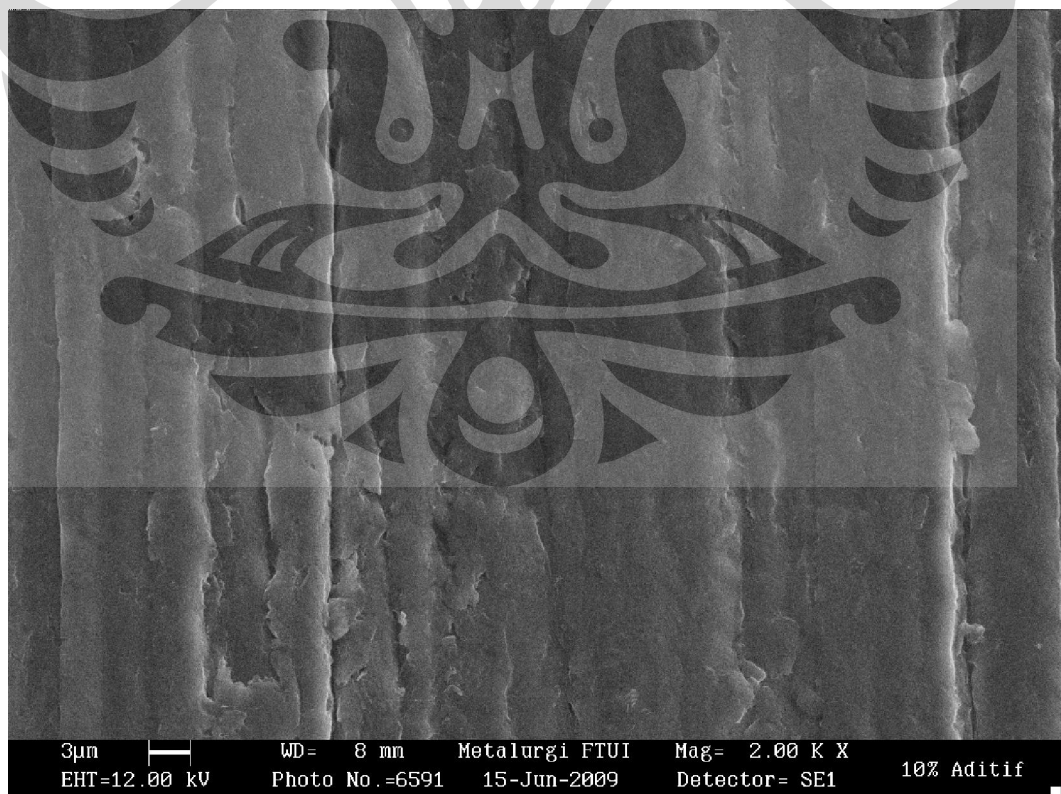


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP3 Perbesaran 500X

Lampiran 5 Hasil Foto SEM Sampel BP3 (lanjutan)

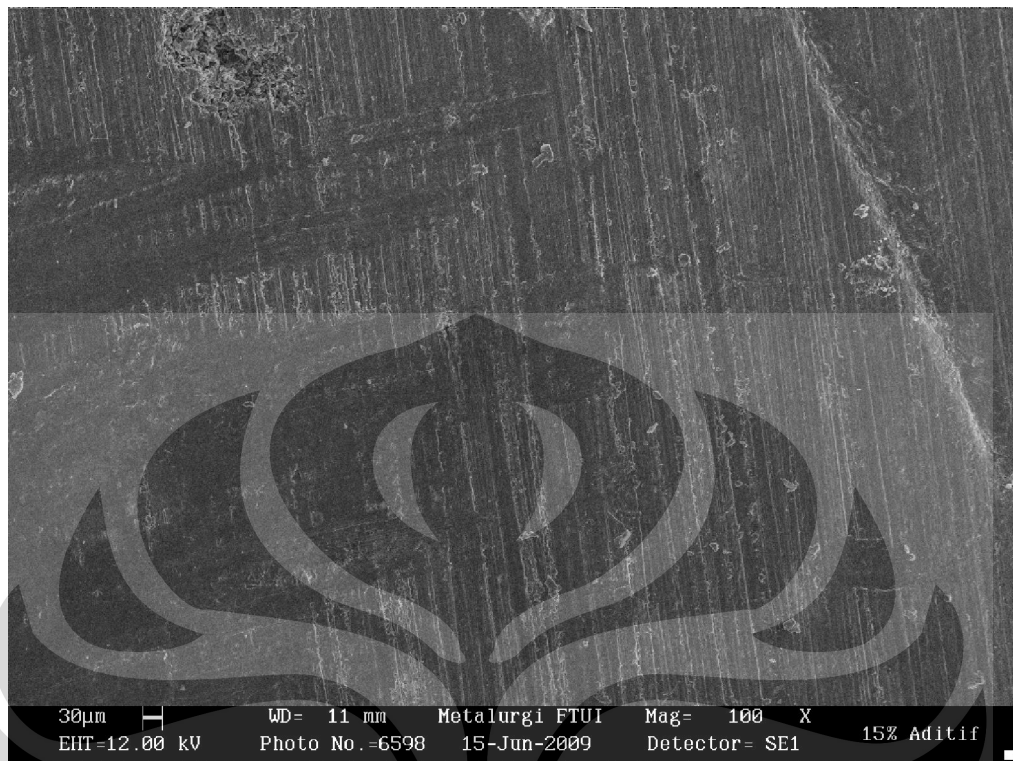


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP3 Perbesaran 1000X

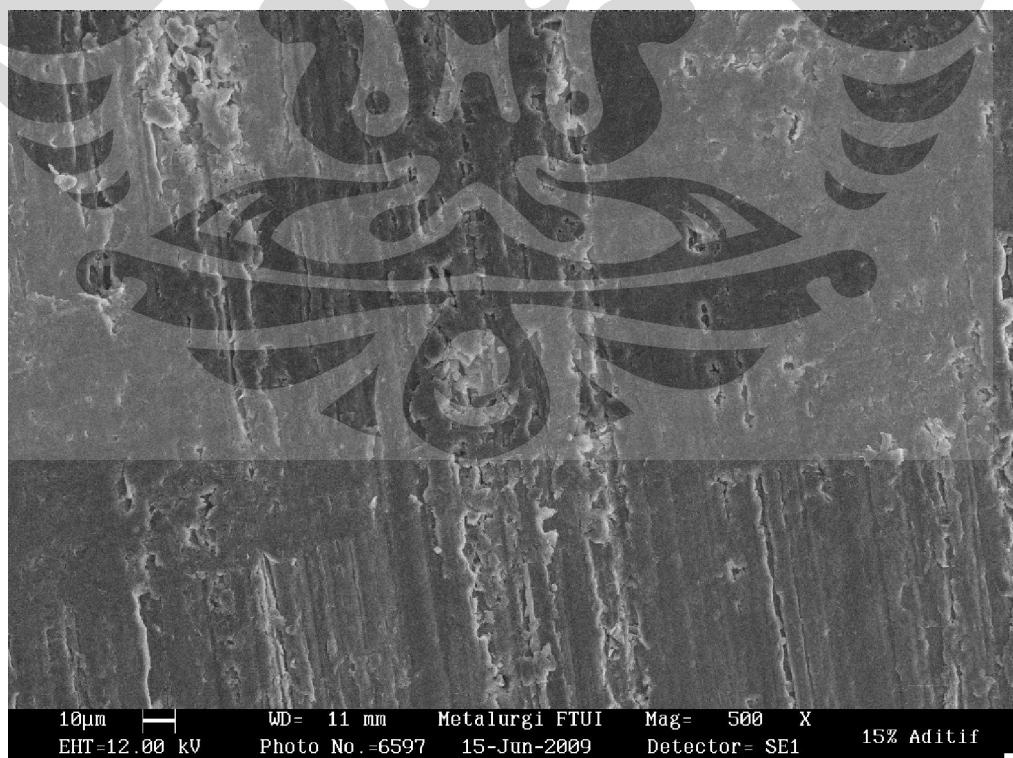


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP3 Perbesaran 2000X

Lampiran 6 Hasil Foto SEM Sampel BP4

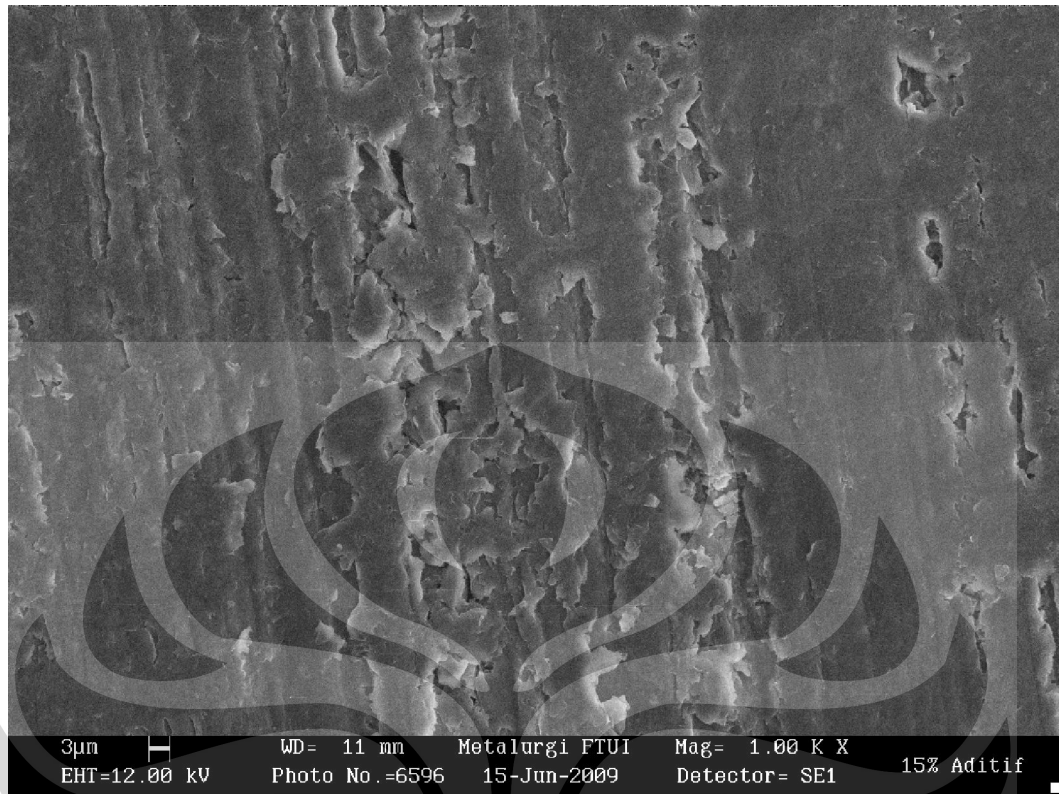


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP4 Perbesaran 100X

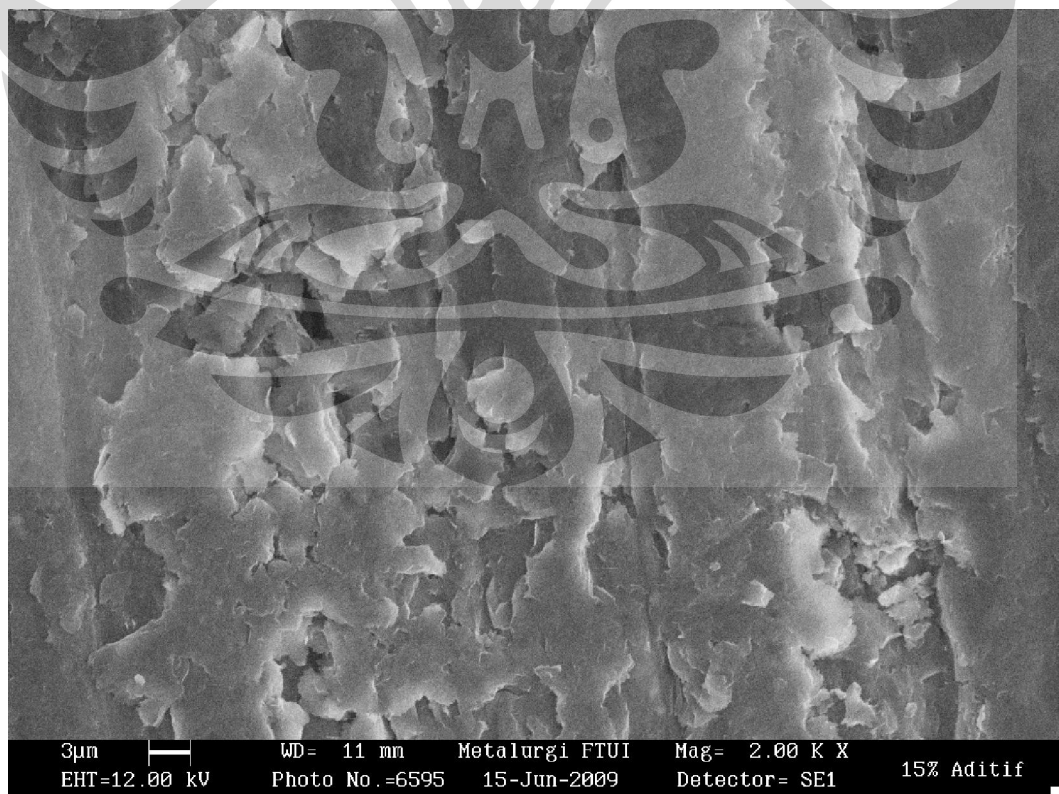


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP4 Perbesaran 500X

Lampiran 6 Hasil Foto SEM Sampel BP4 (lanjutan)

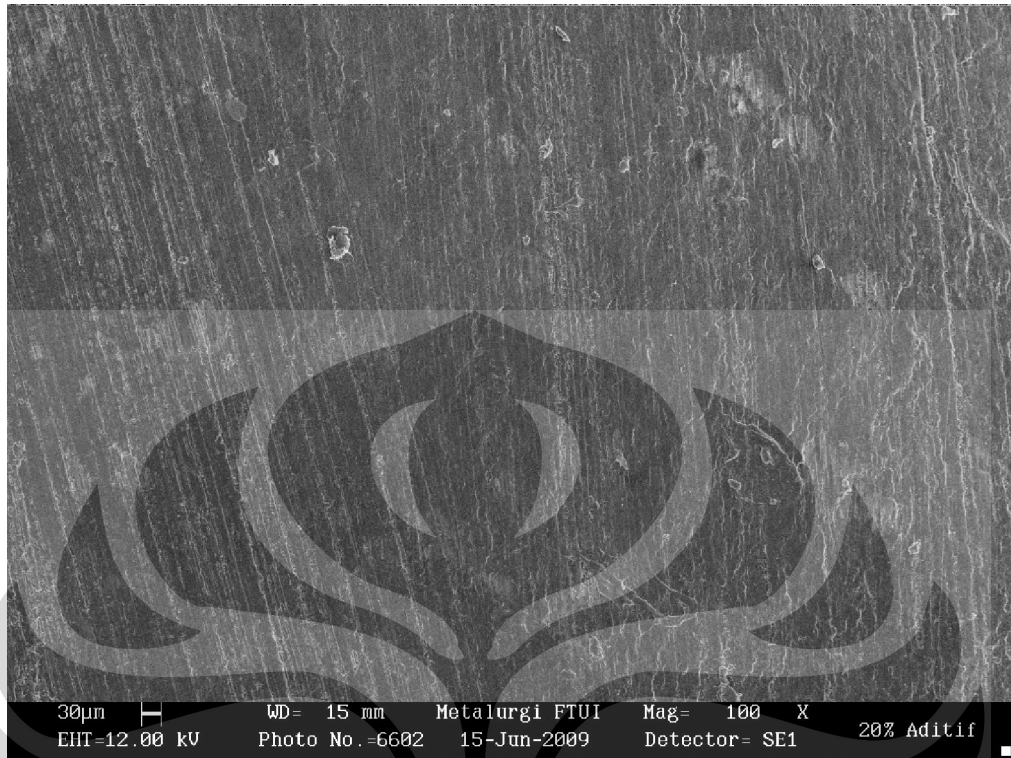


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP4 Perbesaran 1000X

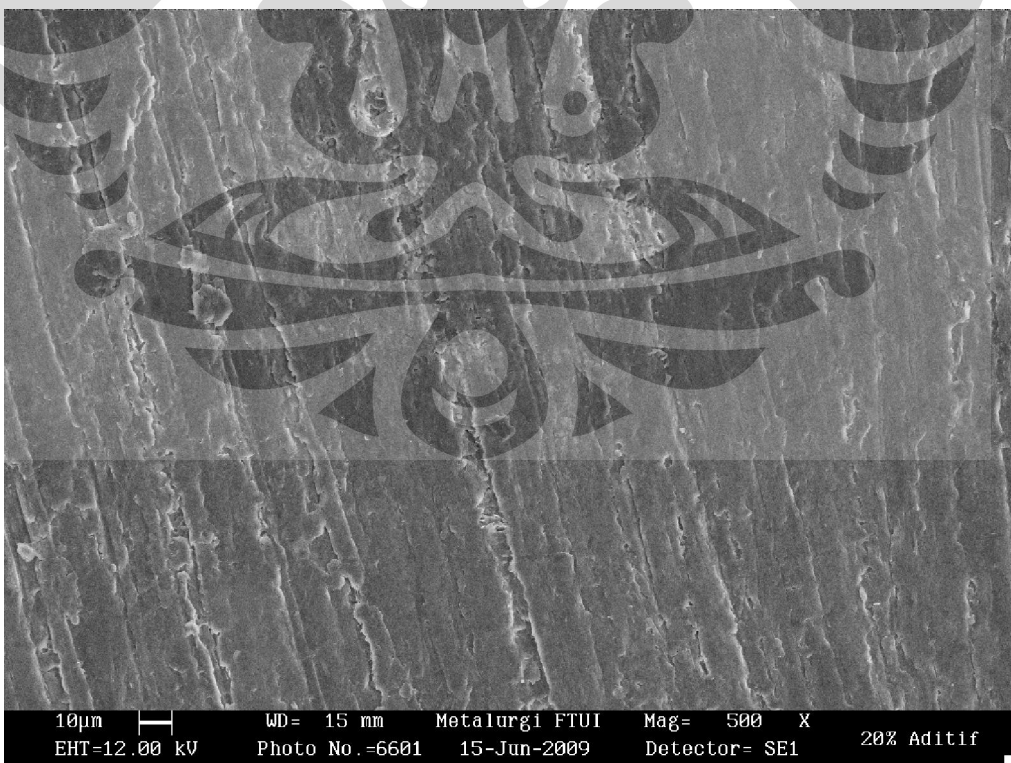


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP4 Perbesaran 2000X

Lampiran 7 Hasil Foto SEM Sampel BP5

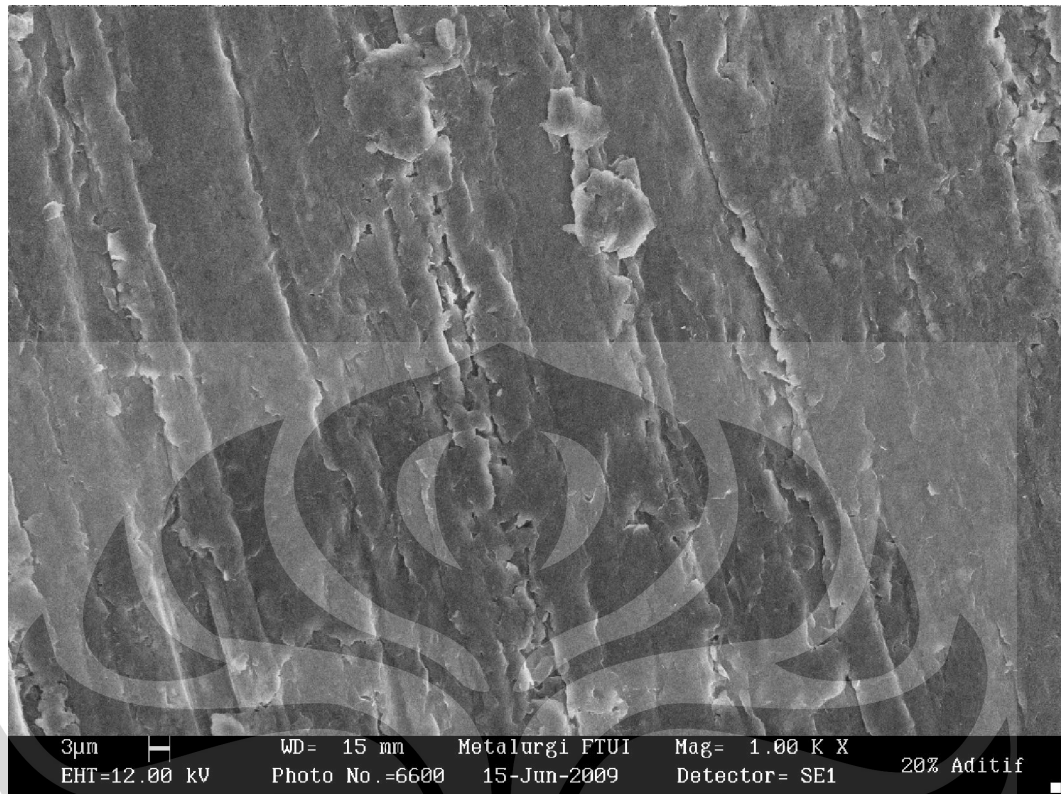


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP5 Perbesaran 100X

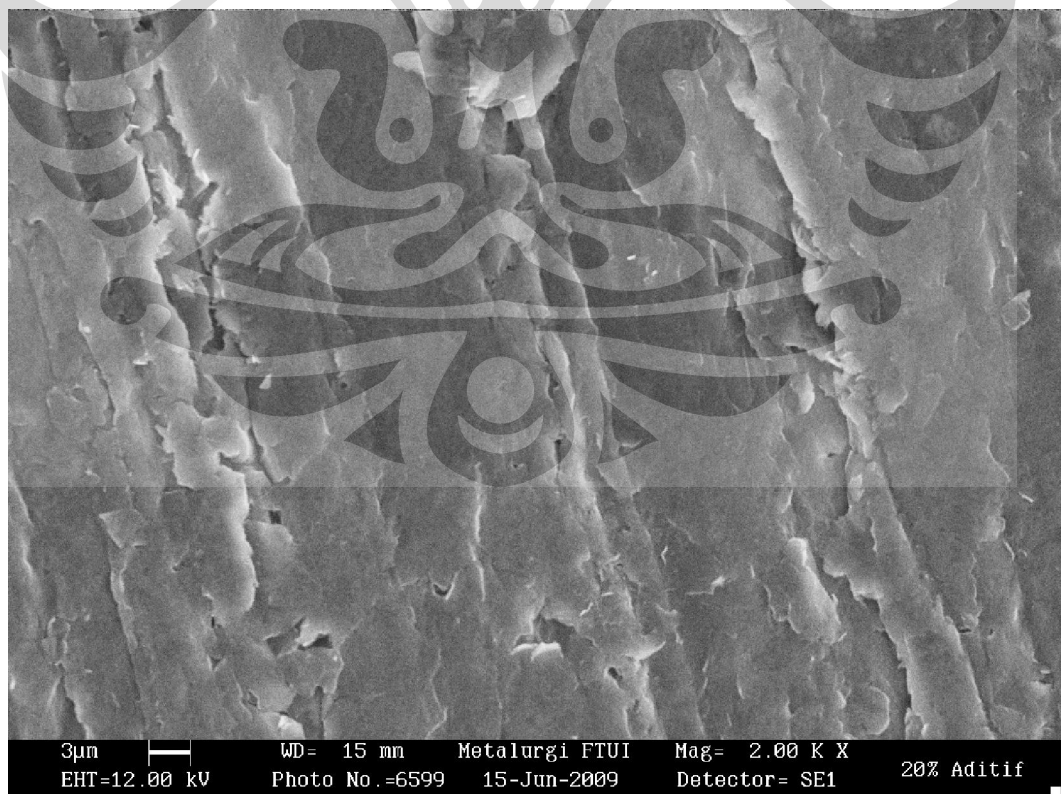


Hasil Pengamatan SEM Sampel BP5 Perbesaran 500X

Lampiran 7 Hasil Foto SEM Sampel BP5 (lanjutan)



Hasil Pengamatan SEM Sampel BP5 Perbesaran 1000X



Hasil Pengamatan SEM Sampel BP5 Perbesaran 2000X

Lampiran 8 Hasil Pengujian Densitas

BP1	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3	Pengujian 4	Pengujian 5
A	1.543	1.6836	1.8513	1.324	1.647
B	1.0235	0.96	0.97	0.998	1.0024
Densitas ()	2.90333494	2.2743491	2.05338222	3.96996933	2.49758377

BP2	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
A	2.91	2.919	3.043
B	1.689	1.676	1.747
Densitas ()	2.3296683	2.29551287	2.295164

BP3	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
A	3.271	2.597	3.0768
B	2.179	1.722	2.127
Densitas ()	2.92802427	2.90122	3.166532

BP4	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
A	2.8505	2.8357	2.8641
B	1.788	1.784	1.7965
Densitas ()	2.62246	2.635634449	2.622384554

BP5	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
A	3.2138	3.2294	2.878
B	2.003	2.043	1.809
Densitas ()	2.594556905	2.660770819	2.63166043

Lampiran 9 Hasil Pengujian Konduktivitas

BP1	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3	Pengujian 4	Pengujian 5
Resistivitas (-cm)	0.349	0.333	0.305	0.365	0.34

Konduktivitas sampel:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\frac{0.349 + 0.333 + 0.305 + 0.365 + 0.34}{5}} = \frac{1}{0.3384} = 2.955 \text{ S/cm}$$

BP2	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
Resistivitas (-cm)	2.15	4.39	0.657

Konduktivitas sampel:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\frac{2.15 + 4.39 + 0.657}{3}} = \frac{1}{2.399} = 0.417 \text{ S/cm}$$

BP3	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
Resistivitas (-cm)	44.8	77.9	57.9

Konduktivitas sampel:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\frac{44.8 + 77.9 + 57.9}{3}} = \frac{1}{60.2} = 0.017 \text{ S/cm}$$

BP4	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
Resistivitas (-cm)	45	45.3	49.7

Konduktivitas sampel:

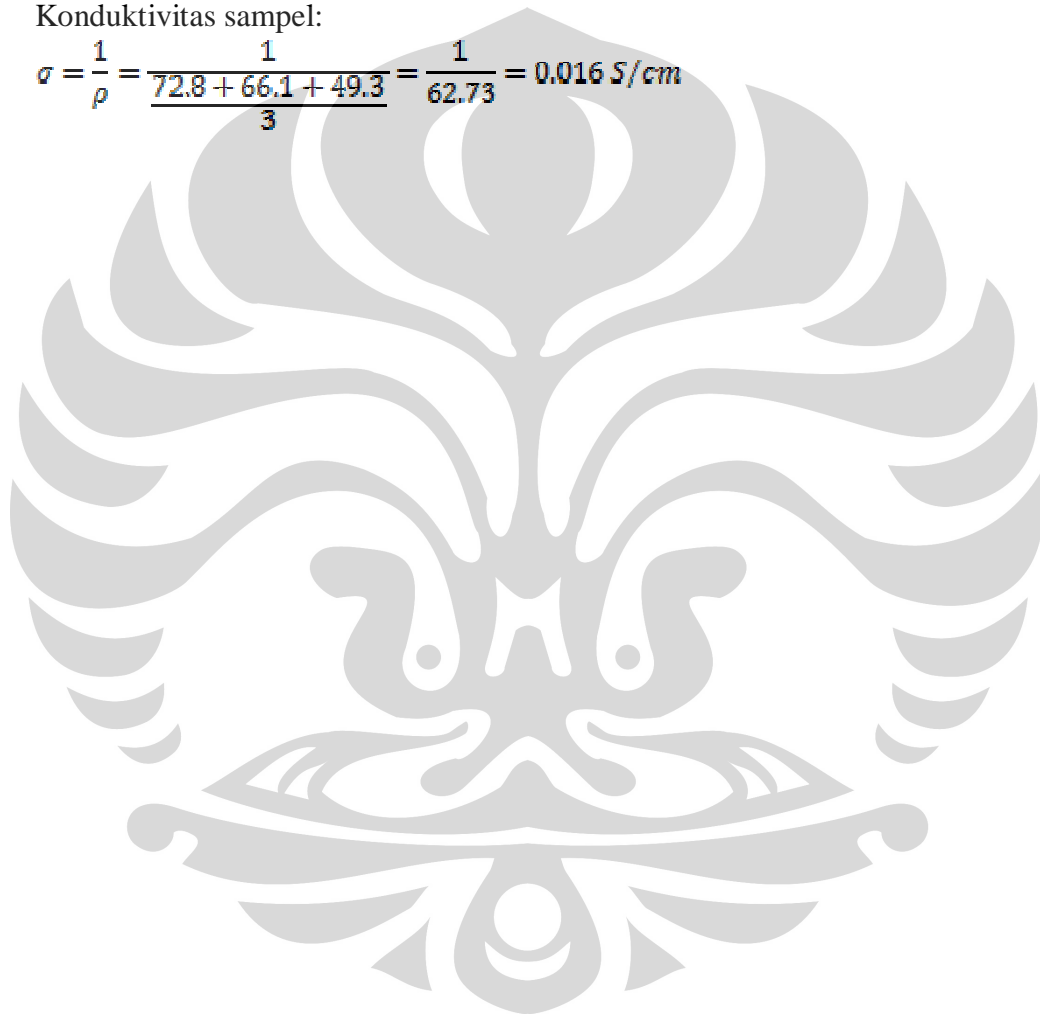
$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\frac{45 + 45.3 + 49.7}{3}} = \frac{1}{46.67} = 0.021 \text{ S/cm}$$

Lampiran 9 Hasil Pengujian Konduktivitas (lanjutan)

BP5	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
Resistivitas (-cm)	72.8	66.1	49.3

Konduktivitas sampel:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\frac{72.8 + 66.1 + 49.3}{3}} = \frac{1}{62.73} = 0.016 \text{ S/cm}$$



Lampiran 10 Hasil Pengujian EDX

BP1	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
% wt Karbon	63.02	61.08	61.96
% wt Oksigen	36.98	38.92	38.04
% wt Tembaga	0	0	0

BP2	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
% wt Karbon	67.53	68.3	69.44
% wt Oksigen	32.47	31.7	30.56
% wt Tembaga	0	0	0

BP3	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
% wt Karbon	53.28	59.28	58.21
% wt Oksigen	46.72	40.72	41.79
% wt Tembaga	0	0	0

BP4	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
% wt Karbon	52.83	45.91	45.65
% wt Oksigen	13.83	13.19	11.41
% wt Tembaga	33.34	40.9	42.94

BP5	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
% wt Karbon	51.34	56.4	54.72
% wt Oksigen	15.64	11.76	12.78
% wt Tembaga	33.02	31.84	33