



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI KOMPOSIT PELAT
BIPOLAR PEMFC BERBASIS GRAFIT**

TESIS

ANDI SUHANDI

0706171541

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU BAHAN

JAKARTA

DESEMBER 2009



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI KOMPOSIT PELAT
BIPOLAR PEMFC BERBASIS GRAFIT**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains.

ANDI SUHANDI

0706171541

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU BAHAN

JAKARTA

DESEMBER 2009

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Andi Suhandi

NPM : 0706171541

Tanda Tangan :

Tanggal : 21 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Andi Suhandi
NPM : 0706171541
Program Studi : Magister Ilmu Bahan
Judul Tesis : Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Pelat
Bipolar PEMFC Berbasis Grafit.

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Ilmu Bahan Fakultas MIPA Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Bambang Soegijono. ()
Pembimbing II : Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T. ()
Penguji I : Dr. Azwar Manaf, M.Met ()
Penguji II : Dr. Suhardjo Poertadji ()
Penguji III : Dr. Muhammad Hikam ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 21 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Maha Esa dan Sang Tiratana, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini.

Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Sains pada Program Studi Ilmu Bahan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Dr. Bambang Soegijono, selaku dosen pembimbing I yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini.
2. Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T., selaku dosen pembimbing II yang juga telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam menyelesaikan penyusunan tesis ini.
3. Mamah, Papah, dan adik-adik di rumah yang telah memberikan segala dukungan.
4. Kekasihku, Nancy, yang terus memberikan dorongan semangat.
5. Semua rekan-rekan dan sahabat di Pusat Penelitian Fisika - LIPI yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, semoga segala kebaikan semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan penyusunan tesis ini berbuah kebahagiaan. Semoga tesis ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Serpong, Desember 2009,

Andi Suhandi

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

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

Nama : Andi Suhandi
NPM : 0706171541
Program Studi : Magister Ilmu Bahan
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Tesis S2

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

**Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Pelat Bipolar PEMFC
Berbasis Grafit**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Serpong
Pada tanggal : Desember 2009

Yang Menyatakan

(Andi Suhandi)

ABSTRAK

Nama : Andi Suhandi
Program Studi : Ilmu Bahan
Judul : Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Pelat Bipolar PEMFC Berbasis Grafit.

Telah dilakukan penelitian komposit pelat bipolar berbasis grafit untuk aplikasi *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). PEMFC merupakan sumber energi alternatif dengan bahan bakar H_2 dan O_2 tanpa menghasilkan emisi gas berbahaya (*zero emission*). Komposit terdiri dari grafit sebagai pengisi dan epoxy resin sebagai pengikatnya. Ada tiga tahap yang dilakukan pada penelitian ini: 1) optimasi komposisi, 2) penambahan karbon black, dan 3) penambahan Alumunium sebagai aditif. Pada optimasi komposisi digunakan, 60-90 wt% grafit dan 40-10 wt% epoxy resin. 5-20 wt% karbon black ditambahkan pada komposisi optimum menggantikan grafit. Alumunium ditambahkan terhadap hasil terbaik hasil penambahan karbon black dengan variasi 2-10 wt% terhadap massa total pengisi. Komposit dibuat dengan metode pencetakan *hot press* dengan tekanan 300 kg/cm^2 , dipanaskan pada suhu $70 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 4 jam. Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui densitas, porositas dan serapan air, konduktivitas listrik, kuat lentur, sifat panas dan morfologi permukaan komposit. Proses optimasi menghasilkan 80 wt% grafit dan 20 wt% epoxy resin sebagai komposisi optimum. Konduktivitas listriknya $0,28 \text{ S/cm}$ dan kuat lenturnya $19,97 \text{ MPa}$. Penambahan karbon black menurunkan konduktivitas listrik dan kekuatan lentur dan tetapi juga menurunkan porositasnya. Penambahan 2 wt% Alumunium menghasilkan komposit terbaik dengan densitas $1,833 \text{ gr/cm}^3$, porositas dan serapan air $< 0,5 \%$, konduktivitas listrik $0,29 \text{ S/cm}$, kuat lentur $22,75 \text{ MPa}$, dan stabil hingga suhu $180 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kata Kunci:

PEMFC, pelat bipolar, komposit grafit, konduktivitas listrik, hot press, epoxy resin

ABSTRACT

Name : Andi Suhandi
Study Program: Material Science
Title : Development and Characterization of PEMFC Bipolar Plate
Composite Base on Graphite

Bipolar plate composites based on graphite for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) applications were investigated. PEMFC is alternative energy source fueled with H_2 and O_2 without emitting dangerous gases (zero emission). The composites consist of graphite as filler and epoxy resin as binder. There are three stages used for the investigation: 1) composition optimization, 2) carbon black addition, and 3) Aluminum addition as additive. For composition optimization, 60-90 wt% of graphite and 40-10 wt% epoxy resin were used. 5-20 wt% carbon black added to optimum composition to replaced graphite. Aluminum added to the best result from carbon black addition with variations 2-10 wt% to filler total mass. Composites were made using hot press casting with 300 kg/cm^2 of pressure, heating in $70 \text{ }^\circ\text{C}$ for 4 hours. Characterizations were carried out to know the density, porosity and water absorption, electrical conductivity, flexural strength, thermal property, and the surface morphology of composite. Optimization process resulting 80 wt% graphite and 20 wt% epoxy as optimum composition. It's electrical conductivity 0,28 S/cm and flexural strength 19,97 MPa. Addition of carbon black decreased the electrical conductivity and flexural strength but also decreasing the porosity. 2 wt% of Aluminum addition giving the best composite with density $1,833 \text{ gr/cm}^3$, porosity and water absorption $< 0,5 \%$, electrical conductivity 0,29 S/cm, flexural strength 22,75 MPa, and thermally stable to $180 \text{ }^\circ\text{C}$.

Keywords:

PEMFC, bipolar plate, graphite composite, electrical conductivity, hot press, epoxy resin

DAFTAR ISI

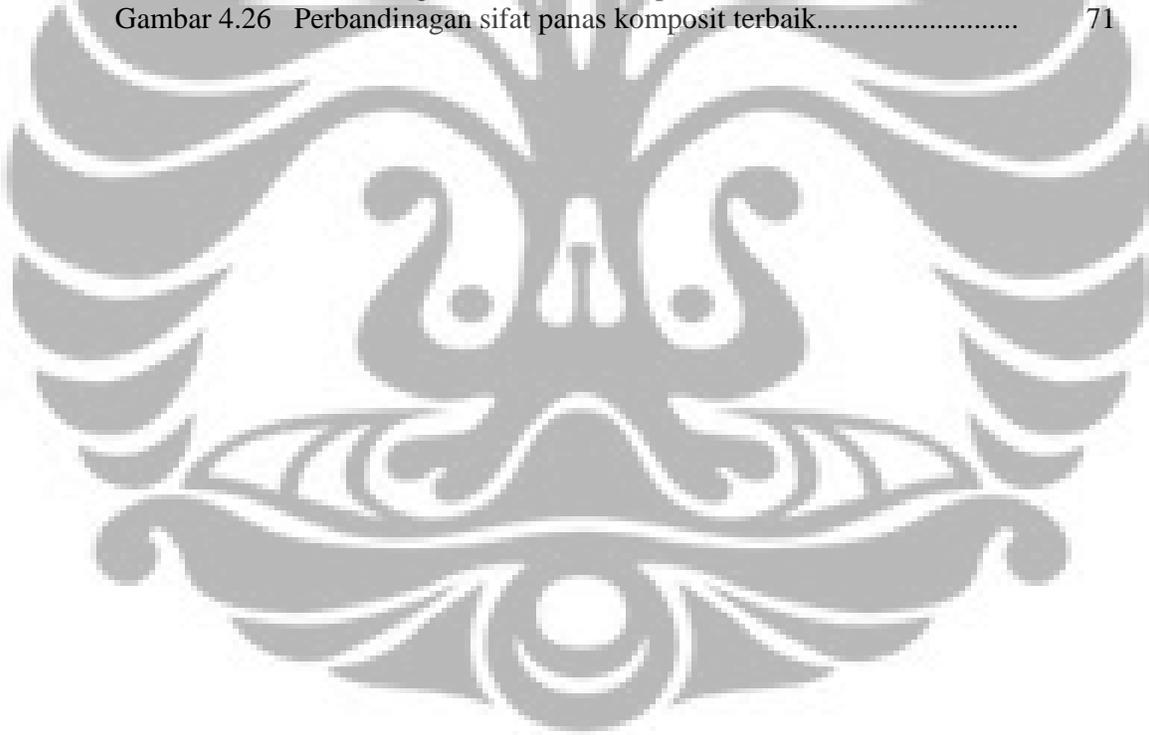
| | |
|---|-----------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS..... | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN..... | iii |
| KATA PENGANTAR..... | iv |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS..... | v |
| ABSTRAK..... | vi |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR GAMBAR..... | x |
| DAFTAR TABEL..... | xii |
| DAFTAR PERSAMAAN..... | xiii |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xiv |
| BAB I. PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 3 |
| 1.3 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah..... | 4 |
| 1.4 Hipotesis..... | 5 |
| 1.5 Tujuan Penelitian..... | 5 |
| 1.6 Sistematika Penulisan..... | 5 |
| BAB II. TINJAUAN PUSTAKA..... | 7 |
| 2.1 Sel Bahan Bakar (Fuel Cell)..... | 7 |
| 2.1.1 Prinsip Dasar Sel Bahan Bakar..... | 9 |
| 2.1.2 Jenis-Jenis Sel Bahan Bakar..... | 10 |
| 2.2. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)..... | 12 |
| 2.3. Pelat Bipolar..... | 13 |
| 2.3.1. Bahan dan Metode Pembuatan Pelat Bipolar..... | 15 |
| 2.4. Komposit..... | 19 |
| 2.5. Aplikasi Sel Bahan Bakar..... | 23 |
| BAB III. METODOLOGI PENELITIAN..... | 27 |
| 3.1. Tahapan Penelitian dan Diagram Alir Penelitian..... | 27 |
| 3.1.1 Tahapan Penelitian..... | 27 |
| 3.1.2 Diagram Alir Penelitian..... | 28 |
| 3.2. Alat dan Bahan..... | 28 |
| 3.2.1 Alat..... | 28 |
| 3.2.2 Bahan..... | 29 |
| 3.3. Posedur Penelitian..... | 30 |
| 3.3.1. Pembuatan Pelat Bipolar..... | 30 |
| 3.3.2. Pembuatan Spesimen Uji..... | 33 |
| 3.4. Prosedur Pengujian..... | 33 |
| 3.4.1. Pengujian Konduktivitas Listrik..... | 33 |
| 3.4.2. Pengujian Densitas..... | 35 |
| 3.4.3. Pengujian Porositas..... | 37 |
| 3.4.4. Pengujian Kekuatan Lentur (Flexural Strength)..... | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4.5. Analisis Morfologi Permukaan..... | 39 |
| 3.4.6. Analisis Sifat Panas..... | 40 |
| BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN..... | 42 |
| 4.1. Pelat Bipolar Hasil Optimasi Komposisi..... | 42 |
| 4.1.1. Pelat Bipolar Hasil Pencetakan..... | 42 |
| 4.1.2. Pengujian Porositas dan Serapan Air..... | 43 |
| 4.1.3 Pengujian Densitas..... | 45 |
| 4.1.4. Pengujian Konduktivitas Listrik..... | 46 |
| 4.1.5. Pengujian Kuat Lentur..... | 47 |
| 4.1.6. Analisa Morfologi Permukaan (SEM)..... | 48 |
| 4.1.7. Pengujian Sifat Panas (DSC)..... | 50 |
| 4.2. Pelat Bipolar Hasil Penambahan Karbon Black..... | 51 |
| 4.2.1. Pelat Bipolar Hasil Pencetakan..... | 51 |
| 4.2.2. Pengujian Porositas dan Serapan Air..... | 52 |
| 4.2.3 Pengujian Densitas..... | 53 |
| 4.2.4. Pengujian Konduktivitas Listrik..... | 54 |
| 4.2.5. Pengujian Kuat Lentur..... | 55 |
| 4.2.6. Analisa Morfologi Permukaan (SEM)..... | 56 |
| 4.2.7. Pengujian Sifat Panas (DSC)..... | 57 |
| 4.3. Pelat Bipolar Hasil Penambahan Alumunium..... | 58 |
| 4.3.1. Pelat Bipolar Hasil Pencetakan..... | 59 |
| 4.3.2 Pengujian Porositas dan Serapan Air..... | 60 |
| 4.3.3. Pengujian Densitas..... | 61 |
| 4.3.4. Pengujian Konduktivitas Listrik..... | 62 |
| 4.3.5. Pengujian Kuat Lentur..... | 63 |
| 4.2.6. Analisa Morfologi Permukaan (SEM)..... | 64 |
| 4.2.7. Pengujian Sifat Panas (DSC)..... | 65 |
| 4.4. Perbandingan Sifat Komposit Terbaik..... | 66 |
| 4.4.1. Porositas dan Serapan Air..... | 66 |
| 4.4.2 Densitas..... | 67 |
| 4.4.3. Konduktivitas Listrik..... | 68 |
| 4.4.4. Kuat Lentur..... | 69 |
| 4.4.5. Sifat Panas..... | 70 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... | 72 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 72 |
| 5.2 Saran..... | 72 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 73 |
| LAMPIRAN..... | 76 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 1.1 | Contoh distribusi massa untuk sebuah <i>stack</i> berkapasitas 33 kW..... | 2 |
| Gambar 2.1 | Skema umum satuan sel bahan bakar..... | 9 |
| Gambar 2.2 | Contoh sistem <i>stack</i> pada PEMFC..... | 12 |
| Gambar 2.3 | Skema reaksi pada sel bahan bakar polimer..... | 13 |
| Gambar 2.4 | Komponen utama PEMFC, a) yang menunjukkan kedudukan pelat bipolar dan b) contoh pelat bipolar yang diproduksi oleh ZBT, Jerman..... | 14 |
| Gambar 2.5 | Klasifikasi pelat bipolar menurut Allen Herman..... | 17 |
| Gambar 2.6 | Klasifikasi alternatif pembuatan pelat bipolar menurut V.Mehta dan J.S. Cooper..... | 18 |
| Gambar 2.7 | Contoh pelat bipolar yang dibuat oleh, a) ZBT GmbH di Jerman dan b) NedStack Fuel Cell Technology BV di Belanda | 19 |
| Gambar 2.8 | Klasifikasi komposit berdasarkan penguatnya (<i>reinforcement</i>). | 21 |
| Gambar 2.9 | Sudut kontak pembasahan pada komposit..... | 22 |
| Gambar 2.10 | Contoh aplikasi sel bahan bakar portabel; telepon selular, laptop, dan pembangkit mikro portable..... | 24 |
| Gambar 2.11 | Contoh aplikasi sel bakar pada sektor transportasi: kereta, bus, skuter..... | 25 |
| Gambar 2.12 | Aplikasi fuel cell untuk pembangkit listrik, kecil hingga besar. | 26 |
| Gambar 3.1 | Diagram alir penelitian..... | 28 |
| Gambar 3.2. | a) Mesin hidrolik hot press, b) cetakan besi 15 x 15 cm..... | 31 |
| Gambar 3.3 | a) contoh potongan spesimen uji untuk pengujian konduktivitas, densitas, dan porositas; b) potongan spesimen uji untuk kuat lentur (<i>flexural</i>)..... | 33 |
| Gambar 3.4 | <i>Four point probe</i> Veeco FPP 5000..... | 34 |
| Gambar 3.5 | Skema kerja <i>four point probe</i> | 34 |
| Gambar 3.6 | Peralatan uji flexur, a) alat dan operator, b) posisi spesimen..... | 38 |
| Gambar 3.7 | Skema pengujian kuat lentur (<i>flexural strength</i>)..... | 38 |
| Gambar 3.8 | a) Skema sebuah peralatan SEM; b) contoh sebuah alat SEM... | 40 |
| Gambar 3.9 | a) skema DSC , b) Shimadzu DSC-50..... | 41 |
| Gambar 4.1 | Pelat bipolar hasil pencetakan optimasi komposisi, E0..... | 43 |
| Gambar 4.2 | Porositas dan serapan air pada optimasi komposisi..... | 44 |
| Gambar 4.3 | Grafik densitas komposit pelat bipolar pada optimasi komposisi..... | 45 |
| Gambar 4.4 | Konduktivitas listrik pada optimasi komposisi..... | 46 |
| Gambar 4.5 | Kuat lentur pada optimasi komposisi..... | 48 |
| Gambar 4.6 | Foto SEM patahan spesimen E0 dengan 1000X perbesaran..... | 49 |
| Gambar 4.7 | Hasil DSC spesimen E0, 80% grafit..... | 50 |
| Gambar 4.8 | Pelat bipolar hasil penambahan karbon black, E2..... | 52 |
| Gambar 4.9 | Porositas dan Serapan air komposit akibat penambahan karbon black..... | 53 |
| Gambar 4.10 | Densitas komposit pengaruh penambahan karbon black..... | 54 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 4.11 | Konduktivitas listrik komposit akibat penambahan karbon black..... | 55 |
| Gambar 4.12 | Kuat lentur komposit akibat penambahan karbon black..... | 56 |
| Gambar 4.13 | Foto SEM patahan spesimen E2 dengan 1000X perbesaran..... | 57 |
| Gambar 4.14 | DSC spesimen E2, 10% penambahan karbon black..... | 58 |
| Gambar 4.15 | Contoh hasil cetakan penambahan Alumunium..... | 59 |
| Gambar 4.16 | Porositas dan serapan air komposit pengaruh penambahan Alumunium..... | 60 |
| Gambar 4.17 | Densitas komposit pengaruh penambahan Alumunium..... | 61 |
| Gambar 4.18 | Konduktivitas listrik komposit pengaruh penambahan Alumunium..... | 62 |
| Gambar 4.19 | Kuat lentur komposit pengaruh penambahan Alumunium..... | 63 |
| Gambar 4.20 | Foto SEM patahan spesimen E2-A dengan 500X perbesaran... | 64 |
| Gambar 4.21 | DSC spesimen E2-A, 2% penambahan Alumunium..... | 65 |
| Gambar 4.22 | Perbandingan porositas dan serapan air komposit terbaik..... | 67 |
| Gambar 4.23 | Perbandingan densitas komposit terbaik. | 68 |
| Gambar 4.24 | Perbandingan konduktivitas listrik komposit terbaik..... | 69 |
| Gambar 4.25 | Perbandingan kuat lentur komposit terbaik..... | 70 |
| Gambar 4.26 | Perbandinagan sifat panas komposit terbaik..... | 71 |



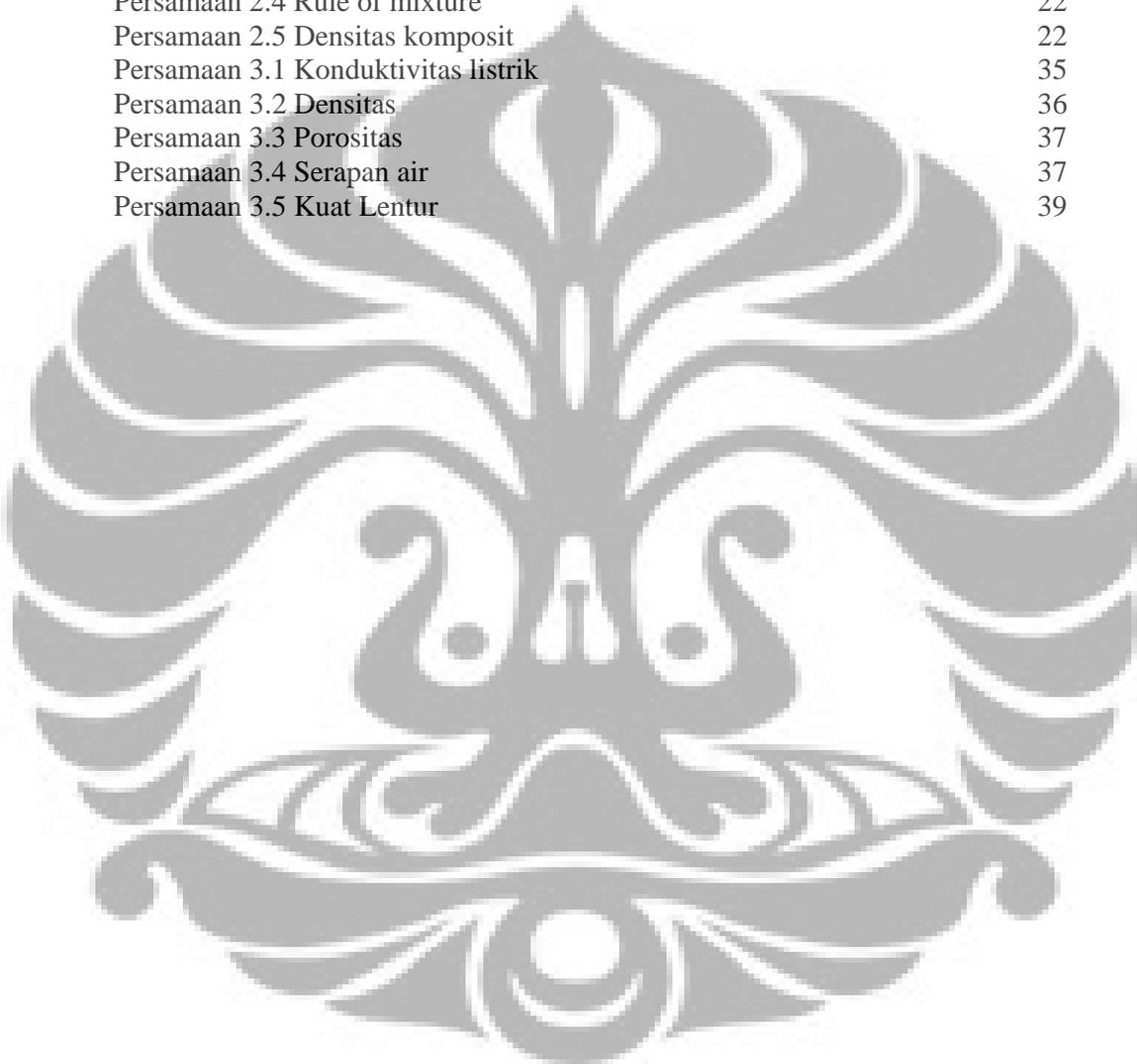
DAFTAR TABEL

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabel 2.1 | Rangkuman karakteristik berbagai jenis sel bahan bakar | 11 |
| Tabel 3.1 | Penamaan pelat bipolar hasil optimasi komposisi | 32 |
| Tabel 3.2 | Penamaan pelat bipolar hasil penambahan karbon black | 32 |
| Tabel 3.3 | Penamaan pelat bipolar hasil penambahan Alumunium | 32 |



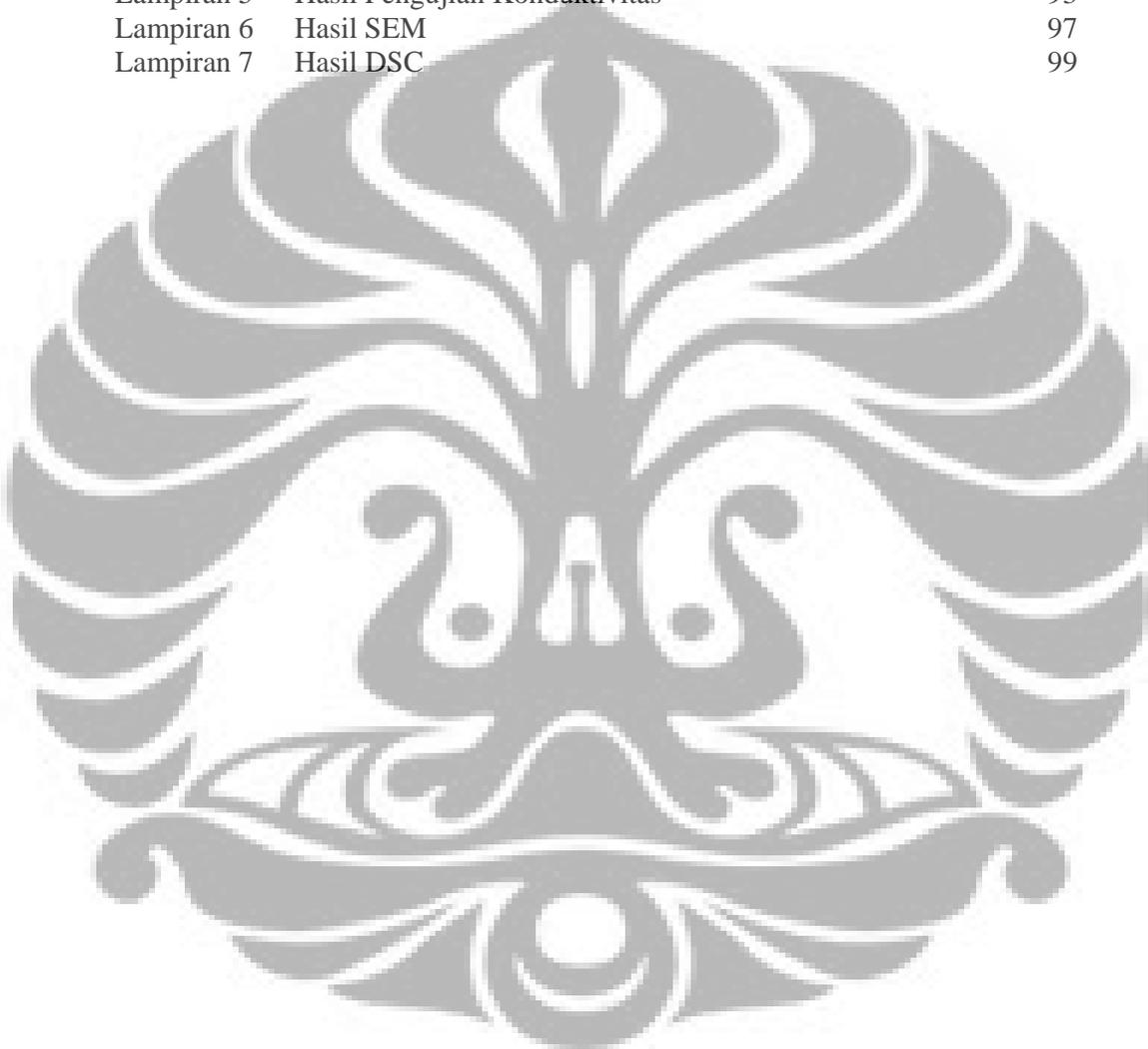
DAFTAR PERSAMAAN

| | |
|---|----|
| Persamaan 2.1 Reaksi pada Anoda fuel cell | 9 |
| Persamaan 2.2 Reaksi pada Katoda fuel cell | 9 |
| Persamaan 2.3 Reaksi keseluruhan pada fuel cell | 9 |
| Persamaan 2.4 Rule of mixture | 22 |
| Persamaan 2.5 Densitas komposit | 22 |
| Persamaan 3.1 Konduktivitas listrik | 35 |
| Persamaan 3.2 Densitas | 36 |
| Persamaan 3.3 Porositas | 37 |
| Persamaan 3.4 Serapan air | 37 |
| Persamaan 3.5 Kuat Lentur | 39 |



DAFTAR LAMPIRAN

| | | |
|------------|--|----|
| Lampiran 1 | Komposisi Material Penyusun Komposit Pelat Bipolar | 76 |
| Lampiran 2 | Hasil Pengujian Densitas | 77 |
| Lampiran 3 | Hasil Pengujian Porositas dan Serapan Air | 81 |
| Lampiran 4 | Hasil Pengujian Kuat Lentur | 89 |
| Lampiran 5 | Hasil Pengujian Konduktivitas | 93 |
| Lampiran 6 | Hasil SEM | 97 |
| Lampiran 7 | Hasil DSC | 99 |



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang.

Pemanasan global telah menjadi perhatian seluruh dunia, terutama karena berdampak besar bagi perubahan iklim dan menimbulkan berbagai bencana alam, seperti; kekeringan, banjir, kebakaran hutan, badai, dan topan. Salah satu penyebab terbesar pemanasan global adalah emisi gas rumah kaca yang tinggi dalam seabad terakhir, terutama setelah revolusi industri. Gas ini terutama terdiri dari CO, CO₂, NO_x, dan Methane yang dihasilkan terutama dari aktivitas industri, transportasi, dan pertanian. Sektor industri dan transportasi yang menggunakan bahan bakar fosil (minyak dan batubara) merupakan penyumbang terbesar emisi gas rumah kaca yang berujung pada pemanasan global.

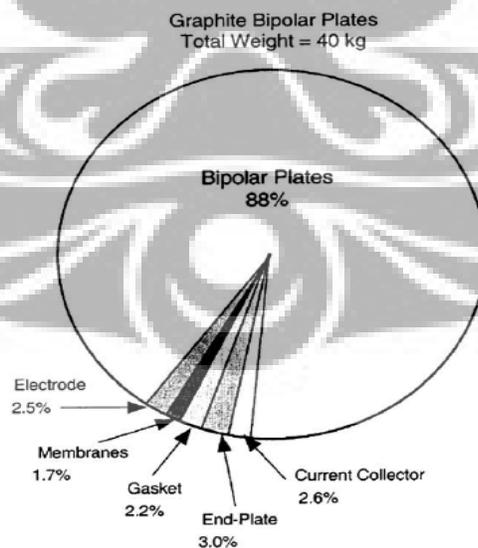
Untuk mereduksi emisi gas rumah kaca dan mengurangi ketergantungan akan bahan bakar fosil diperlukan berbagai langkah penggunaan energi alternatif (*renewable energy*) yang ramah lingkungan. Berbagai energi alternatif yang telah dan terus dikembangkan meliputi: energi angin, energi surya, energi air, energi panas bumi, energi gelombang laut, bahan bakar nabati (*biofuel*), dan sel bahan bakar (*Fuel Cell*). Sebagian besar energi ini digunakan untuk menghasilkan listrik bagi kepentingan industri dan perumahan. Sedangkan biofuel dan fuel cell dapat digunakan sebagai energi untuk aplikasi transportasi.

Sel bahan bakar (*fuel cell*) merupakan energi alternatif yang masih sangat jarang penggunaannya tetapi memiliki potensi aplikasi yang sangat luas, seperti pada berbagai peralatan elektronik, transportasi, sistem tenaga cadangan (*Auxiliary Power Unit*), maupun untuk pembangkit >100 kW. Sel ini secara prinsip hanya membutuhkan bahan bakar berupa gas hydrogen dan oksigen untuk kemudian bereaksi secara elektro kimia untuk menghasilkan listrik, air, dan panas.

Sehingga pada sistem ini tidak dihasilkan emisi gas CO maupun CO₂, sebagai produk sampingannya.

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) atau disebut juga sebagai polymeric fuel cell merupakan jenis sel bahan bakar yang memiliki peluang aplikasi yang sangat luas. Jenis ini memiliki keunggulan berupa: kerapatan energi yang besar (2,6 – 3,8 kW/m²), emisi sangat rendah (*zero emission*), bekerja pada temperatur rendah (± 80 °C), kemudahan bahan bakar (hanya membutuhkan gas H₂ dan O₂), efisiensi tinggi (>45%), dan ringan. Dari berbagai keunggulan ini, maka PEMFC dapat digunakan sebagai sumber energi untuk aplikasi sektor rumah tangga hingga transportasi [1-6].

Komponen-komponen utama dari sistem PEMFC adalah 1) Pelat penyangga yang meliputi pelat bipolar dan pelat ujung (*end pelate*), 2) Elektroda, dan 3) Membran (elektrolit). Pelat bipolar merupakan komponen yang sangat penting dalam sistem ini karena beratnya mencapai 60-90% dari berat total *stack*, dan harganya mencapai 30-60% dari harga total *stack* [7-9]. Gambar 1.1 memberikan contoh distribusi massa pada sebuah *stack fuel cell* 33 kW.



Gambar 1.1 Contoh distribusi massa untuk sebuah *stack* berkapasitas 33 kW, [8].

Sebuah pelat bipolar harus memiliki konduktivitas listrik dan konduktivitas panas yang baik, kuat mekanik yang cukup, stabilitas kimiawi pada lingkungan PEMFC (asam), tidak tembus gas, dan massa yang ringan. Untuk dapat digunakan secara masal, semua komponen PEMFC harus bisa dibuat dengan biaya yang murah. Target umum biaya PEMFC adalah sekitar 40 \$ US/kW dari sekitar 2000-5000 \$ US/kW pada awal pengembangannya [10-11].

Ada berbagai material yang digunakan untuk membuat pelat bipolar. Awalnya menggunakan pelat grafit yang *dimachining* untuk membuat alur gasnya, tetapi karena harganya menjadi sangat mahal, bahan ini mulai ditinggalkan. Selanjutnya bahan logam dan komposit menjadi pilihan, tetapi metode pembuatannya menjadi lebih rumit dibandingkan menggunakan pelat grafit. Material logam memiliki konduktivitas listrik yang sangat baik dan sangat kuat, tetapi lebih berat dan memerlukan pelapisan oleh material tahan asam untuk menjamin pelat bipolar tahan terhadap korosi. Material komposit menawarkan sifat yang cukup baik (konduktivitas, kekuatan, dan ketahanan terhadap korosi), pilihan bahan yang banyak, dan biaya yang lebih murah. Oleh karena itu komposit menjadi pilihan utama dalam pembuatan pelat bipolar.

Dalam penelitian ini membuat pelat bipolar berbahan komposit. Grafit dan karbon black digunakan sebagai pengisi dan penguat (*reinforce*) dan serbuk Aluminium digunakan sebagai aditif meningkatkan sifat-sifatnya. Epoxy resin digunakan sebagai pengikat (*binder/matriks*). Pengujian dilakukan terhadap sifat fisis dan mekaniknya, terutama densitas, porositas dan serapan air, kuat lentur, konduktivitas listrik, sifat panas, dan analisis morfologi permukaan komposit.

1.2. Rumusan Masalah.

Berbagai kendala yang akan dihadapi dalam pembuatan ini bukan hanya pada pemilihan bahan dan komposisinya, tetapi juga dari metode pembuatannya. Dari segi pemilihan bahan kendala utama adalah ketersediaan bahan baku pada pasar dalam negeri atau kalau bisa produk dalam negeri, hal ini penting untuk

mengurangi biaya pembuatannya, seperti pemilihan jenis resin dan jenis grafit. Dari segi metoda pembuatannya, ada berbagai metode yang umum digunakan seperti metoda *bulk moulding compound* (BMC), ekstrusi, *injection moulding*, dan *casting* yang menggunakan peralatan modern. Untuk mengurangi biaya pembuatan, diperlukan metode lain yang lebih sederhana. Selain metode pembuatan, masih ada berbagai pilihan variasi parameter proses. Variasi komposisi bahan masih menjadi pertanyaan termasuk penambahan bahan aditif.

1.3. Ruang Lingkup dan Batasan Masalah.

Dalam penelitian ini masalah dibatasi pada pembuatan komposit pelat bipolar tanpa alur gas/*gas channel*. Proses penelitian ini dibagi menjadi 3 bagian, yaitu:

1. Optimasi komposisi antara pengisi dan pengikatnya.

Komposit pelat bipolar ini dibuat dengan variasi komposisi pengisi 60-90 wt% dan pengikat 40-10 wt%, dengan pencetakan pada tekanan 300 Kg/cm², temperatur pemanasan 70 °C, dan selama 4 jam.

2. Penambahan serbuk karbon black pada komposisi optimum.

Penambahan karbon black hingga 20 wt% terhadap massa pengisi dilakukan terhadap komposisi yang terbaik hasil dari proses yang pertama. Parameter proses tetap sama.

3. Penambahan serbuk alumunium pada komposisi optimum.

Penambahan alumunium hingga 10 wt% terhadap pengisi dengan komposisi terbaik dari hasil proses yang kedua dilakukan untuk perbaikan sifat-sifatnya. Parameter proses tetap sama.

Karakterisasi untuk mengetahui sifat fisis dan mekaniknya hanya fokus pada densitas, porositas dan serapan air, konduktivitas listrik, kuat lentur (*flexural strength*) komposit. Morfologi permukaan diketahui melalui *Scanning Electron Microscope* (SEM), dan sifat panasnya dianalisis menggunakan *Differential Scanning Calorimetri* (DSC).

1.4. Hipotesis.

Dalam penelitian ini ada beberapa hipotesis yang menjadi landasan pemikiran, yaitu:

1. Pemanfaatan serbuk grafit, carbon black, dan Alumunium sebagai *filler* dan polimer thermoset (epoxy resin) sebagai pengikat (*binder*) dapat menghasilkan suatu komposit yang ringan, kuat, konduktif, dan tahan terhadap panas dan korosi.
2. Komposisi *filler* dan *binder* akan menentukan parameter proses produksi dari pelat bipolar.
3. Karbon black dan Alumunium bisa mempengaruhi sifat pelat bipolar.

1.5. Tujuan Penelitian.

Tujuan penelitian ini adalah untuk:

1. Mendapatkan komposisi yang optimal antara grafit dan resin, untuk menghasilkan sifat-sifat yang terbaik.
2. Mengetahui pengaruh penambahan karbon black dan alumunium terhadap sifat-sifat komposit pelat bipolar.
3. Menguasai teknologi pembuatan pelat bipolar PEMFC berbasis komposit grafit.
4. Menghasilkan Pelat Bipolar yang memenuhi syarat untuk digunakan pada sistem stak PEMFC dengan bahan yang ada di Indonesia.

1.6. Sistematika Penulisan

Penulisan tesis ini dibuat agar dapat tersusun secara teratur dan berurutan sehingga didapat kerangka alur pemikiran yang mudah dan praktis. Tesis ini terdiri dari 5 Bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

1. Bab I Pendahuluan, menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup dan batasan masalah, hipotesis, tujuan penelitian, dan sistematika penulisan.
2. Bab II Tinjauan Pustaka, membahas mengenai dasar teori tentang sel bahan bakar (*fuel cell*), *proton exchange membrane fuel cell* (PEMFC), pelat bipolar, aplikasi *fuel cell*, dan material komposit.
3. Bab III Metodologi Penelitian, menjelaskan mengenai alur prosedur pembuatan pelat bipolar, pengambilan spesimen uji serta pengujian-pengujian yang akan dilakukan pada tahap karakterisasi.
4. Bab IV Hasil dan Pembahasan, membahas mengenai data hasil karakterisasi pelat bipolar berupa tabel, gambar, maupun grafik, dan membandingkannya dengan literatur, sehingga akan didapat suatu analisis mengenai sifat pelat bipolar tersebut.
5. Bab V Kesimpulan dan Saran, memberikan kesimpulan dari hasil penelitian pembuatan pelat bipolar, baik dari optimasi komposisi, penambahan karbon black, dan aluminium. Serta saran perbaikan pada penelitian lanjutan untuk menghasilkan pelat bipolar dengan sifat yang lebih baik.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sel Bahan Bakar (Fuel Cell).

Sel bahan bakar (fuel cell) merupakan suatu alat yang menghasilkan listrik berdasarkan prinsip elektro kimia (mengkonversi reaksi kimia menjadi energi listrik), dengan bahan bakar dasar berupa gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2). Sel bahan bakar merupakan sumber listrik yang sangat menjanjikan dengan efisiensi tinggi dan sangat ramah lingkungan, karena tidak menggunakan metode pembakaran seperti pada mesin-mesin bakar umumnya. Dan tidak seperti baterai, sel bahan bakar harus terus disuplai dengan bahan bakar dan oksidator agar terus menghasilkan listrik secara kontinyu [1-2].

Dalam dekade ini, sel bahan bakar secara intensif dikembangkan sebagai hasil dari kekhawatiran akan masalah lingkungan, terutama pemanasan global akibat pengaruh efek rumah kaca. Upaya menekan polusi untuk membuat kehidupan yang lebih baik telah menjadi pemikiran banyak kalangan. Dalam masalah ini, sel bahan bakar dapat menolong dari ketergantungan akan bahan bakar fosil dan menghilangkan emisi beracun ke atmosfer. Sel bahan bakar memiliki berbagai karakteristik untuk bisa menggantikan mesin bakar konvensional, meliputi [2]:

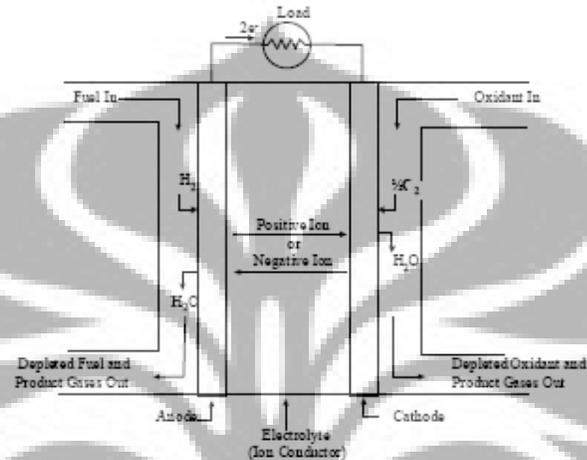
- Efisiensi: Karena mereka mengkonversi langsung energi kimia menjadi energi listrik, sel bahan bakar tidak dibatasi oleh batasan Carnot. Sehingga efisiensinya jauh lebih besar dari mesin konvensional. Untuk sistem sel bahan bakar umumnya berkisar antara 50-60 %, dan untuk sistem hybrid sel bahan bakar/turbin pembakaran menghasilkan efisiensi lebih besar dari 70%. Dan juga efisiensi ini hampir konstan terhadap besar kecil beban yang digunakan. Sehingga sel bahan bakar sangat cocok untuk aplikasi pada kendaraan, dimana pemakaian bebannya berbeda-beda.

- Rendah Emisi: Ketika hanya hidrogen murni yang digunakan sebagai bahan bakar, hanya air yang terbentuk, tidak ada polusi apapun. Hanya saja, ketika memproses hidrokarbon menjadi hydrogen, dapat menghasilkan sejumlah kecil NO_x , SO_x , CO, dan CO_2 yang tentu saja lebih kecil dibandingkan mesin bakar biasa.
- Kemampuan Kogenerasi: Reaksi exotermic dan electrokimia menghasilkan panas yang dapat dimanfaatkan untuk keperluan lain.
- Aneka Ukuran: Sel bahan bakar dapat dibuat untuk aplikasi yang sangat luas, dari ukuran kecil beberapa watt hingga skala megawatt. Sehingga sel bahan bakar diharapkan dapat menjadi sumber energi bagi peralatan elektronik seperti peralatan rumah tangga dan komputer, kendaraan, hingga pembangkit listrik skala kecil hingga besar.
- Fleksibilitas Bahan Bakar: Sel bahan bakar bisa dioperasikan menggunakan bahan bakar umum seperti gas alam, methanol, dan hidrokarbon kompleks, selain gas hidrogen.
- Realibilitas dan Minim perawatan: Sel bahan bakar tidak menggunakan komponen bergerak sehingga minim perawatan dan umur pakai yang panjang.
- Tidak Berisik: Karena tidak ada komponen bergerak, hanya reaksi kimia, sel ini tidak menghasilkan polusi suara, sangat senyap. Sehingga sangat cocok untuk aplikasi dalam ruang dan militer.

Walaupun sel bahan bakar merupakan bentuk energi terbarukan yang sangat menjanjikan, tetapi sel ini belum bisa diaplikasikan secara luas karena kendala biaya dan daya tahannya. Penelitian secara intensif telah dilakukan diseluruh dunia untuk menghasilkan sel bahan bakar yang cukup murah dan memiliki waktu operasi yang bisa tahan lama. Tetapi sejauh ini hasil penelitian mereka masih cukup jauh untuk memenuhi target penetrasi pasar yang semula ditargetkan bisa masuk pasar secara luas pada tahun 2010. Sehingga target telah dimundurkan untuk aplikasi secara luas sekitar tahun 2015, walaupun masih banyak kendala yang harus diselesaikan segera. Kendala dan tantangan yang

dihadapi meliputi pemilihan sumber bahan bakar dan infrastrukturnya, peraturan bagi industri, keselamatan, dan penerimaan masyarakat.

2.1.1. Prinsip Dasar Sel Bahan Bakar.

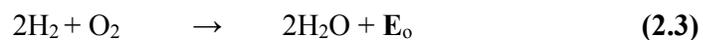


Gambar 2.1. Skema umum satuan sel bahan bakar [1].

Gambar 2.1 menunjukkan skema umum sel satuan bahan bakar (unit sel). Unit sel merupakan inti sebuah sel bahan bakar, dimana reaksi elektro kimia terjadi. Struktur dasar dari sebuah sel bakar terdiri dari lapisan elektrolit yang berhubungan dengan anoda dan katoda pada kedua sisinya. Pada gambar di atas ditunjukkan reaksi dan arah pergerakan ion pada sebuah sel. Bahan bakar (hidrogen) diumpankan pada anoda dan oksidan (umumnya oksigen dari udara) pada katoda. Reaksi elektro kimia terjadi pada kedua elektroda dengan reaksi sebagai berikut:



Reaksi keseluruhan Fuel cell:



Sebenarnya sel bahan bakar dibedakan berdasarkan elektrolit dan bahan bakar yang digunakan, yang kemudian akan menentukan reaksi pada elektroda dan jenis ion yang melewati elektrolitnya. Secara teori bahan bakar bisa berupa materi apapun yang dapat teroksidasi secara kimia (terbakar secara galvanik) yang dapat disuplai secara kontinyu sebagai fluida. Dan oksidan juga bisa berupa materi apa saja yang bisa tereduksi dengan laju yang sama (fluida). Umumnya gas hydrogen digunakan sebagai bahan bakar dan gas oksigen dari udara sebagai oksidan karena alasan kepraktisan.

2.1.2. Jenis-Jenis Sel Bahan Bakar.

Secara umum sel bahan bakar dibedakan berdasarkan jenis elektrolit dan bahan bakarnya. Jenis elektrolit ini membutuhkan temperatur operasi yang berbeda-beda dan menghasilkan efisiensi berbeda pula [1-2].

Berdasarkan pada elektrolitnya, ada jenis yaitu;

1. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC),
2. Direct Methanol Fuel Cell (DMFC),
3. Alkaline Fuel Cell (AFC),
4. Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC),
5. Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC),
6. Solid Oxide Fuel Cell (SOFC).

Fuel cell dapat juga golongan berdasarkan temperatur operasinya, yaitu:

- 1) Tipe temperatur tinggi: SOFC, MCFC
- 2) Tipe temperatur sedang: ITSOFC, MCFC
- 3) Tipe temperatur rendah: PEMFC, DMFC, AFC, PAFC

Temperatur operasi akan menentukan sifat-sifat psiko kimia dan termo mekanik dari bahan yang digunakan sebagai komponen-komponen sel bahan bakar, seperti; elektroda, elektrolit, *interconnect*, *current collector*, dll. Elektrolit cair dibatasi sekitar 200 °C atau kurang karena tekanan uap mereka tinggi dan mengakibatkan terjadi kerusakan yang cepat pada temperatur yang lebih tinggi.

Tabel 2.1. Rangkuman karakteristik berbagai jenis sel bahan bakar [1-2].

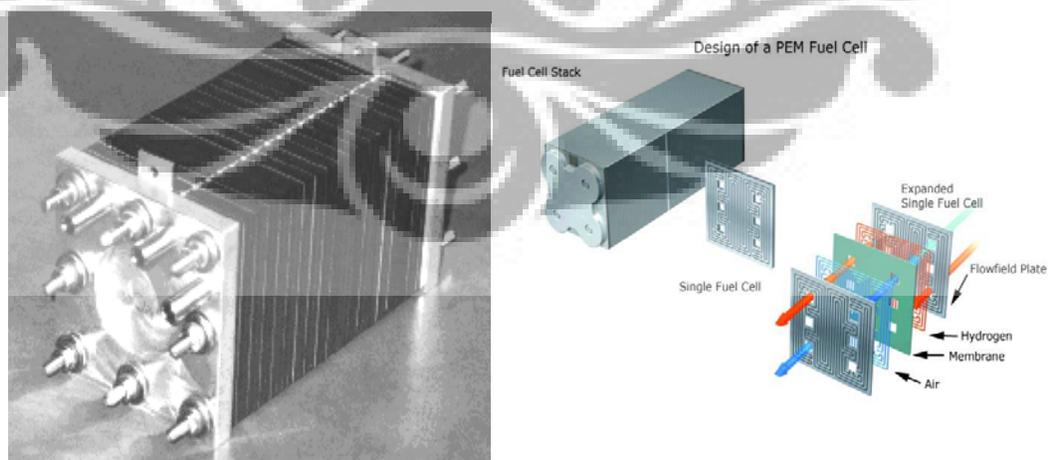
| JENIS FUEL CELL | Proton Exchange Membrane (PEMFC) | Direct Methanol (DMFC) | Alkaline (AFC) | Phosphoric Acid (PAFC) | Molten Carbonate (MCFC) | Solid Oxide (SOFC) |
|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|
| Ion yang Bergerak | H^+ | H^+ | OH^- | H^+ | CO_3^{2-} | O^{2-} |
| Elektrolit | Hydrated Polymeric Ion Exchange Membrane | Hydrated Polymeric Ion Exchange Membrane | Potassium Hydroxide dalam Matrix asbestos | Immobilized Liquid Phosphoric Acid dalam SiC | Immobilized Liquid Molten Carbonate dalam $LiAlO_2$ | Perovskites (keramik) |
| Temperatur operasi (°C) | 50 - 100 | 30 - 80 | 50 - 200 | 160 - 220 | 600 - 800 | 600-1000 |
| Reaksi Anoda | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ | $CH_3OH + H_2O \rightarrow 6H^+ + 6e^- + CO_2$ | $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$ | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ | $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ | $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ |
| Reaksi Katoda | $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ | $\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$ | $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ | $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ | $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ | $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ |
| Kerapatan Daya (kW/m^2) | 2,6 - 3,8 | 1,5 - 2,5 | 0,7 - 8,1 | 0,8 - 1,9 | 0,1 - 1,5 | 1,5 - 2,6 |
| Efisiensi Listrik (%) | 40 - 55 (stack) | 40 - 55 | 45 - 60 | 40 - 50 | 50 - 60 (sistem) | 50 - 65 (stack) |
| Perubahan Bahan bakar | Eksternal | Eksternal | Eksternal | Eksternal | Eksternal atau Internal | Eksternal atau Internal |
| Daya Terpasang | 5 - 250 kW modular | 5 kW | 5 - 250 kW modular | 50 kW - 11 MW | 100 kW - 2 MW | 100 - 300 kW |
| Waktu Inisiasi | Dtk - mnt | Dtk - mnt | Menit | Jam | Jam | Jam |
| Aplikasi | Elektronik Transportasi Ruang Angkasa Militer Sistem penyimpanan energi | | | Kombinasi panas dan sel untuk sistem pembangkit stasioner terdesentralisasi. | Kombinasi panas dan sel untuk sistem pembangkit stasioner terdesentralisasi dan untuk transportasi, seperti kereta dan kapal laut. | |

Temperatur juga akan menentukan derajat pemrosan bahan bakar yang diperlukan. Pada sel bahan bakar temperatur rendah, semua bahan bakar yang digunakan harus dikonversi menjadi hidrogen sebelum memasuki sel. Sedangkan untuk sel bahan bakar temperatur tinggi, CO dan CH₄ dapat secara internal dikonversi menjadi hidrogen atau bahkan secara langsung teroksidasi secara elektro kimia. Tabel 1 merangkum karakteristik berbagai jenis sel bahan bakar.

2.2. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC).

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) bersama dengan Direct methanol fuel cell biasa disebut juga sebagai Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC). Elektrolit yang digunakan dalam PEFC adalah sebuah membrane polimer pertukaran ion yang harus merupakan konduktor proton yang sangat baik, biasanya terbuat dari polimer asam sulfon terflorinasi (fluorinated sulfonic acid polymer). Bahan bakar yang biasa dipakai adalah gas hydrogen dan oksigen sebagai oksidan.

Dalam satu unit sel PEMFC umumnya terdiri dari saluran gas, elektroda, dan membran. Setiap unit akan disatukan kedalam suatu kesatuan unit yang disebut "stack" untuk menghasilkan listrik dengan jumlah yang diinginkan. Contoh sistem stack fuel cell digambarkan pada Gambar 2.2 di bawah.

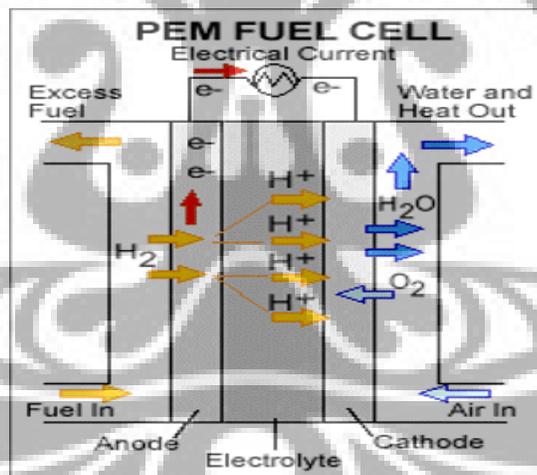


Gambar 2.2. Contoh sistem *stack* pada PEMFC [3].

Secara singkat, komponen stack PEMFC terdiri dari:

1. Saluran Gas; terdiri dari End plate dan Bipolar plate.
2. Membrane electrode assembly (MEA) yang terdiri dari membran, lapisan katalis, dan lapisan difusi gas (Gas Diffusion Layer). Elektroda sudah menjadi satu bagian dengan MEA.

Reaksi yang terjadi pada PEMFC sama dengan reaksi yang umum pada sel bahan bakar seperti telah dibahas di bagian 2.1, dimana gas hidrogen diumpankan pada anoda dan oksigen pada katoda untuk menghasilkan reaksi elektro kimia. Proton akan melewati membran sedangkan arus listrik akan dikumpulkan oleh *current collector* untuk digunakan. Reaksi pada PEMFC hanya akan menghasilkan listrik, air (H_2O), dan panas. Tanpa polusi gas rumah kaca dan sangat senyap. Secara skematik, reaksi yang terjadi pada PEMFC diberikan pada Gambar 2.3 berikut.

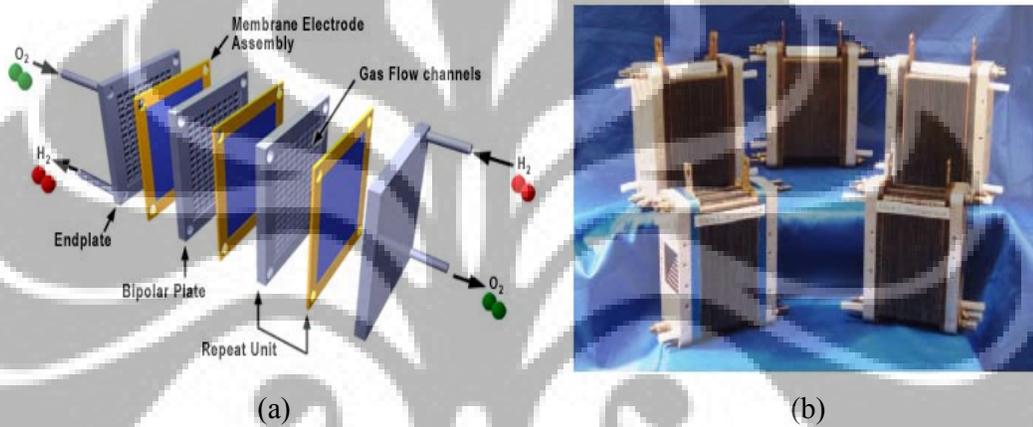


Gambar 2.3. Skema reaksi pada sel bahan bakar polimer [12].

2.3. Pelat Bipolar.

Pelat bipolar merupakan komponen terbesar dari sistem stack pada PEMFC. Pelat bipolar. Beratnya mencapai 60-90% dari berat total stack, dan harganya mencapai 30-60% dari harga total stack. Sebuah pelat bipolar harus memiliki konduktivitas listrik dan panas yang baik, kuat mekanik yang cukup,

stabilitas kimiawi pada lingkungan PEMFC (asam), tidak tembus gas, dan massa yang ringan. Pelat bipolar juga memberikan fungsi rangka penyangga pada stack sel bakar. Gambaran kedudukan pelat bipolar dan contohnya diberikan pada Gambar 2.4. Pelat bipolar disusun secara bergantian dengan MEA untuk membuat sistem stack sel untuk menghasilkan daya yang diperlukan, misalnya 10 W, 500 W, 1 kW, 50 kW dan seterusnya. Dan pada tiap ujung sel akan ditutup menggunakan *end plate* dengan bahan yang sama.



Gambar 2.4. Komponen utama PEMFC, a) yang menunjukkan kedudukan pelat bipolar [12] dan b) contoh pelat bipolar yang diproduksi oleh ZBT, Jerman [13].

Selain sebagai rangka, Pelat Bipolar memiliki berbagai fungsi yang sangat penting yaitu untuk [7,14]:

1. Mendistribusikan bahan bakar gas
2. Memfasilitasi manajemen/kontrol air
3. Memisahkan sel-sel dalam sistem stack
4. Menyalurkan aliran/ arus elektron dari sel
5. Memfasilitasi manajemen/kontrol temperatur

Dengan berbagai fungsi yang penting dari pelat bipolar, maka material yang digunakan harus memiliki berbagai kriteria untuk dapat bekerja dengan baik. Pelat bipolar harus memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

- Konduktivitas listrik yang tinggi: resistansi pelat harus lebih kecil dari $0.01\Omega \text{ cm}^2$ atau konduktivitas $> 100 \text{ S/cm}$.
- Konduktivitas panas: setinggi mungkin (makin tinggi makin baik untuk membuang panas yang dihasilkan).
- Hidrogen/permeabilitas gas: lebih kecil dari $10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s cm}^2$, pelat tidak boleh ditembus gas yang dialirkan.
- Kuat tekan: harus lebih besar dari 22 lb/in^2 atau $0,15 \text{ MPa}$.
- Kuat lentur (flexural strength) lebih besar dari 25 MPa .
- Densitas: kerapatannya harus lebih rendah dari 5 gm/cm^3 agar stack menjadi ringan.
- Ketahanan korosi: laju korosi $< 0,016 \text{ mA/cm}^2$.
- Biaya produksi serendah mungkin, agar dapat digunakan secara masal.

2.3.1. Bahan dan Metode Pembuatan Pelat Bipolar.

Pada mulanya bahan yang digunakan adalah pelat grafit yang dibuatkan alur gas menggunakan mesin bubut atau CNC. Pelat grafit memiliki keunggulan karena memiliki stabilitas kimia dan konduktivitas yang tinggi. Tetapi karena faktor mahalnya proses ini, maka dicari bahan lain yang bisa menggantikan pelat grafit. Berbagai peneliti telah mencoba menggunakan bahan logam dan komposit untuk menjadi alternatif dalam membuat pelat bipolar yang unggul dan lebih murah.

Beberapa jurnal telah membahas bahan-bahan yang bisa digunakan menjadi pelat bipolar [7,14]. Sehingga klasifikasi bahan yang digunakan dapat dibagi menjadi 3 kelompok besar, yaitu:

1. Grafit non poros /electrographite.

Pembuatannya menggunakan grafit yang dicetak menggunakan tekanan tinggi (compression moulding) untuk selanjutnya dimachining dalam membuat saluran gasnya. Ada juga pembuatan yang langsung dicetak alur gasnya.

Kuntungan: pembuatannya sederhana.

Kerugian: biayanya mahal.

2. Logam.

Bahan berbasis logam dapat dibagi menjadi 2 golongan yaitu:

- a. Non coated: stainless steel → Austenitic dan ferritic stell.
- b. Coated: Berbasis Alumunium, Titanium, Nickel, Stainless steel.

Untuk menghindari korosi dan kerusakan pada sel, logam membutuhkan pelapisan. Pelapisnya antara lain:

- berbasis karbon: graphite, conductive polymer, diamond-like carbon, self-assembly monopolymer,
- berbasis metal: logam mulia, carbides, nitrides.

Pembuatan pelat bipolar berbahan logam umumnya terbagi menjadi 3 tahapan yaitu:

1. Pembentukan pelat dasar.
 - Pembentukan pelat padat (solid formation); machining, casting, forging, stamping dan electroforming.
 - Pembentukan pelat modular (modular formation); stretch forming dan wire bonding.
2. Persiapan/pembersihan permukaan.
3. Pelapisan.

Pelapisan dilakukan dengan metoda PVD, CVD, dan Teknik fasa cair seperti electropelating dan electrolytic anodization.

Keuntungan: Sangat kuat, konduktivitas tinggi, bisa dibuat beragam bentuk.

Kerugian: Proses pembuatan lebih rumit dan mahal, lebih berat.

3. Komposit.

Bahan komposit terbagi menjadi 2 kelompok, komposit polimer-karbon dan polimer-metal.

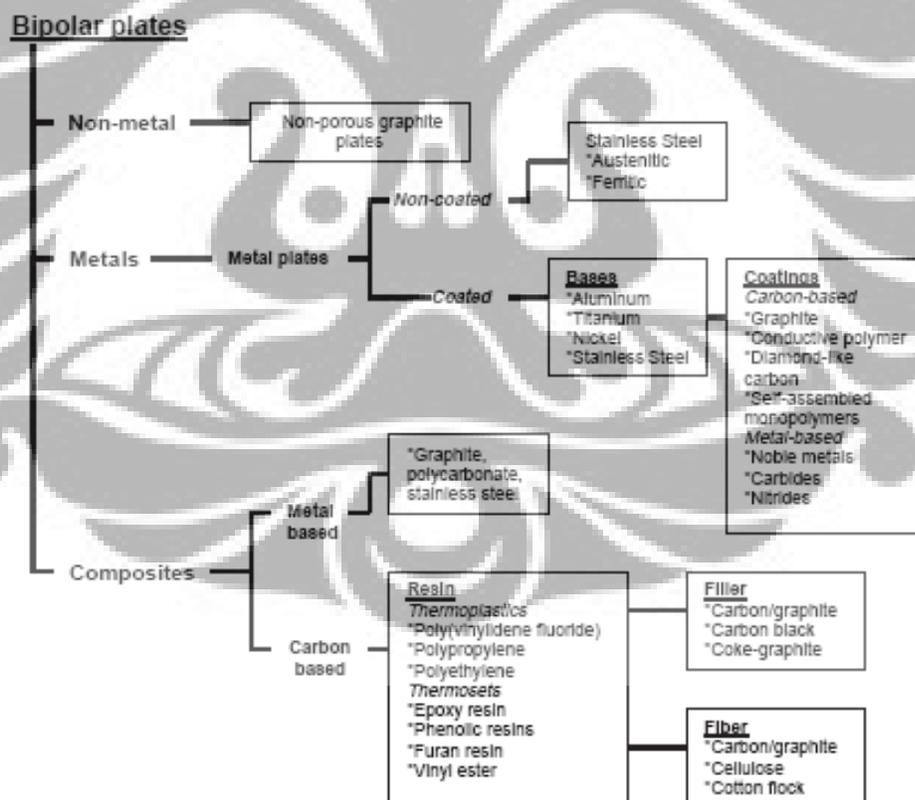
- a. Polymer-carbon.
 - Resin: resin digunakan sebagai matrixnya, bisa berupa:

- Thermosets: epoxy, phenolic, furan, vinyl ester.
- Thermoplastics: poly(vinylidene fluoride), polypropylene, polyethylene.
 - Filler: carbon/graphite, carbon black, coke-graphite, expanded graphite.
 - Fiber: carbon/graphite, cellulose, cotton flock.
- b. Polymer-metal: Graphite, polycarbonates, stainless steel.

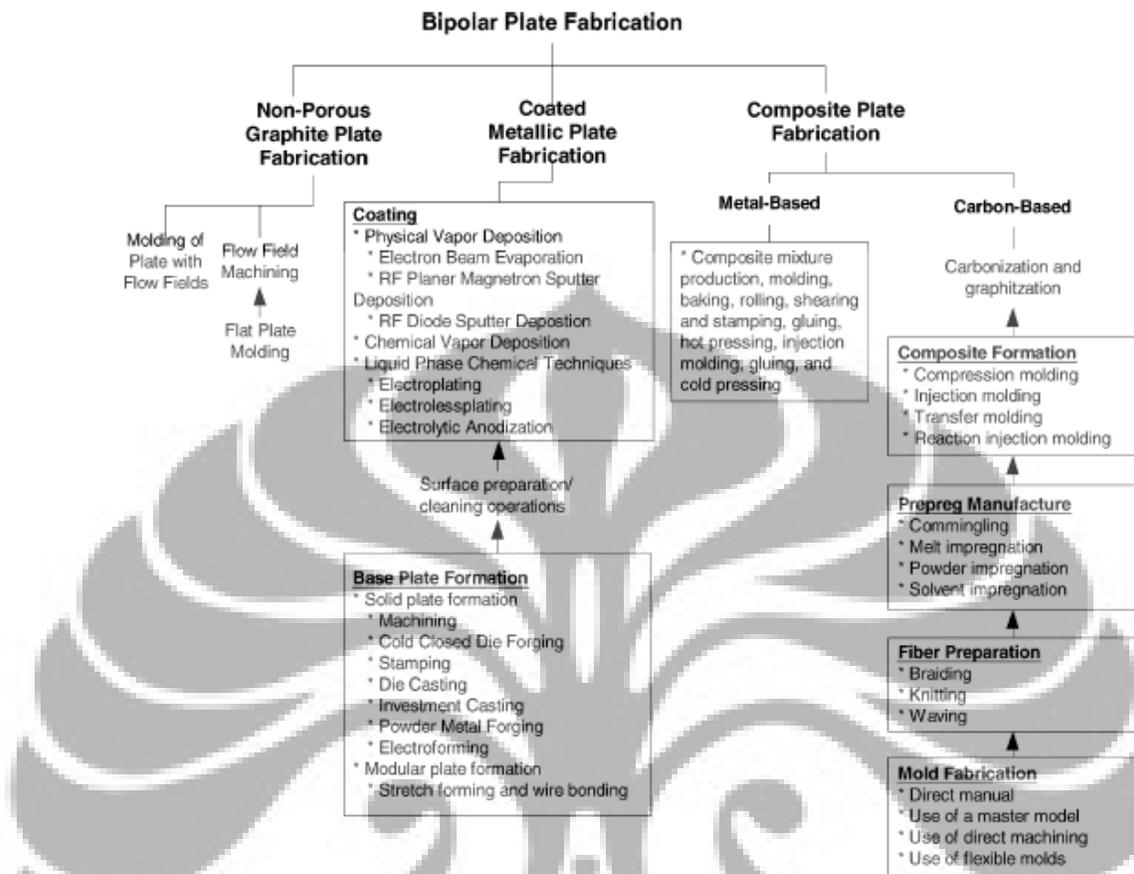
Pembuatan yang umum adalah dengan menggunakan metode *Compression molding, injection molding, transfer molding, dan reaction injection molding*.

Keuntungan: tahan korosi, ringan, dan lebih murah.

Kerugian: Proses pembuatan cukup rumit dan konduktivitas lebih rendah dibandingkan logam.



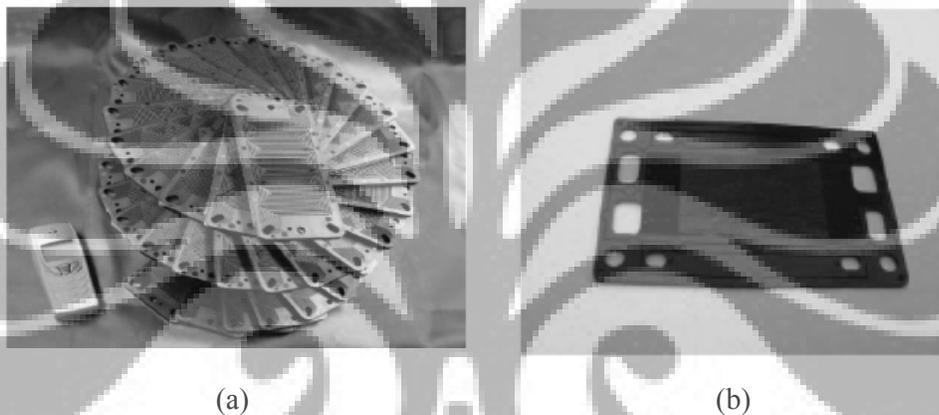
Gambar 2.5 Klasifikasi pelat bipolar menurut Allen Herman [7]



Gambar.2.6 Klasifikasi alternatif pembuatan pelat bipolar menurut V.Mehta dan J.S. Cooper [14].

Banyak penelitian dilakukan untuk menghasilkan komposit pelat bipolar yang unggul dan murah. Penelitian-penelitian ini menggunakan berbagai variasi bahan dan metode pembuatan yang berbeda [13-27]. Contoh perkembangan yang baru adalah S.I.Heo et al. [23] menggunakan expanded grafit sebagai filler untuk meningkatkan sifat-sifatnya dan I.U. Hwang et al. [25] yang menggunakan komposit serat karbon-epoxy resin. S.H.Liao et al [26] membuat pelat bipolar berbasis nanokomposit karbon nanotube/polypropylene. Sedangkan di Indonesia, penelitian tentang pelat bipolar sudah mulai dilakukan sejak beberapa tahun terakhir. Renanto Prahastio mencoba menggunakan aditif tembaga (II) asetat monohidrat [27] dan Ihsan Husaeni menggunakan aditif MnO_2 [28]. Mereka belum berhasil membuat komposit pelat bipolar yang konduktif.

Beberapa perusahaan di Eropa telah mengenalkan produk mereka yang harganya berkisar sekitar € 4/kW dengan asumsi kerapatan daya MEA sekitar 7 kW/m² dengan asumsi produksi lebih besar dari 100.000 unit. ZBT GmbH di Jerman mengembangkan pelat bipolar bermatriks bahan termoplastik dengan proses *injection molding* [13]. NedStack Fuel Cell Technology BV di Belanda mengembangkan pelat bipolar komposit yang konduktif menggunakan metode *compression molding*, *injection molding*, *two-component injection molding*, dan *preform molding* untuk pelat berukuran besar [15].



Gambar.2.7 Contoh pelat bipolar yang dibuat oleh, a) ZBT GmbH di Jerman [13] dan b) NedStack Fuel Cell Technology BV di Belanda [15].

2.4. Komposit.

Komposit adalah gabungan dua jenis atau lebih material yang memiliki sifat berbeda untuk menghasilkan material baru yang memiliki sifat yang lebih unggul tanpa ada reaksi kimia antara mereka, dan terjadi dalam skala makroskopis. Komposit terdiri dari dua fasa material yang berbeda, satu disebut matriks (*matrix*) yang tersebar menyelimuti bagian lainnya, dan satu lagi disebut penguat (*reinforce*) [29].

Klasifikasi komposit dapat dibedakan dalam jenis matriks dan bahan reinforcement. Komposit juga dapat dibedakan berdasarkan pada asal bahan komposit.

Berdasarkan jenis bahan matriks, komposit dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Metal Matriks Komposit (MMC)

MMC mempunyai matriks logam seperti aluminium, titanium, magnesium, juga alloy dan intermetaliknya.

2. Keramik Matriks Komposit (CMC)

CMC mempunyai matriks keramik seperti silicon carbide dan silicon nitride.

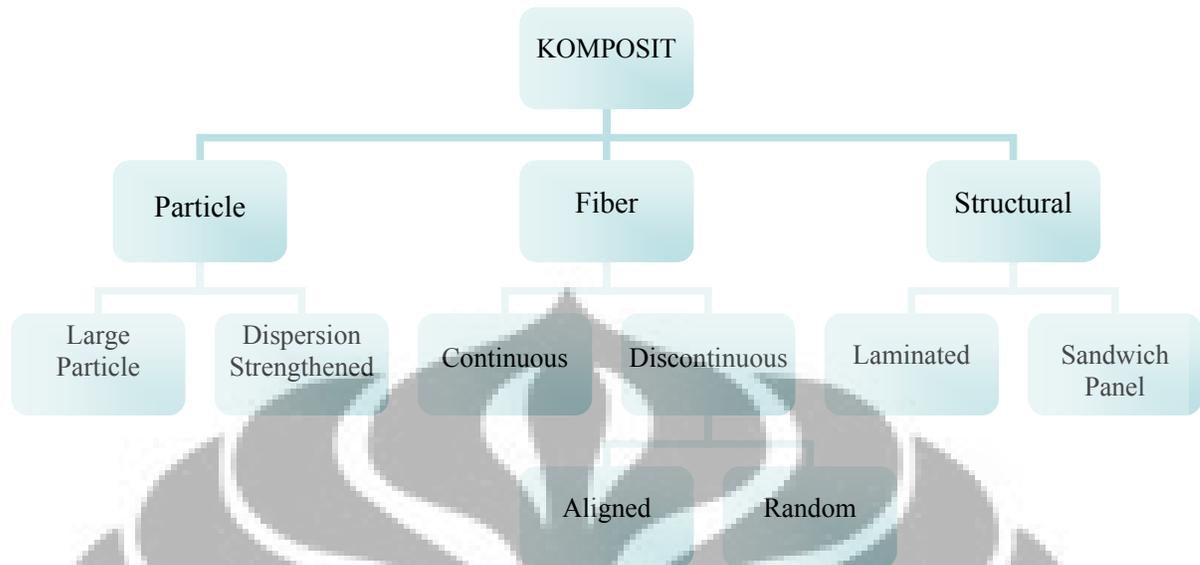
3. Polimer Matriks Komposit (PMC)

PMC mempunyai matriks polimer, baik yang bersifat termoset dan termoplastik.

Fungsi matriks dalam komposit adalah sebagai berikut [30]:

- ✓ Mengikatkan penguat secara bersama (binder).
- ✓ Secara mekanik membantu penguat.
- ✓ Mendistribusikan/transfer tegangan antara penguat.
- ✓ Memproteksi dari pengaruh lingkungan yang buruk seperti zat korosif.
- ✓ Melindungi permukaan penguat dari gaya gesek/abrasi eksternal.

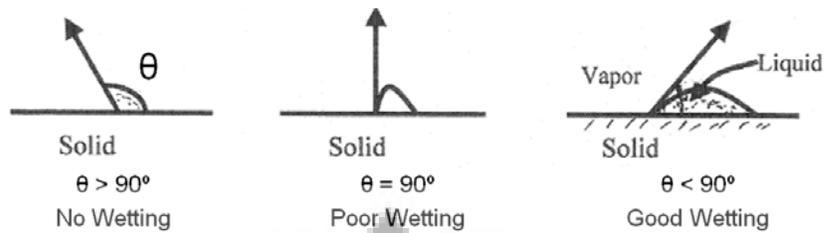
Berdasarkan bentuk penguatnya, komposit terbagi menjadi 3 yaitu; partikel, fiber, dan stuktur. Klasifikasi ini digambarkan pada gambar berikut ini:



Gambar 2.8 Klasifikasi komposit berdasarkan penguatnya (*reinforcement*) [29].

Umumnya komposit dibuat untuk mendapatkan sifat mekanik yang lebih baik, lebih ringan, dan murah. Sehingga aplikasi komposit yang terbesar adalah pada bidang struktural untuk menggantikan peran logam, seperti pada sektor transportasi dan properti. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi sifat dan kekuatan komposit, antara lain [30]:

- a. *Interface*, atau *interfacial bond* merupakan koneksi 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: *Compressive strength*, *specific strength*, *specific stiffness*, *fracture toughness*, *environmental resistance*, dan *creep resistance*.
- b. *Wetability*, adalah kemampuan polimer untuk membasahi seluruh permukaan penguatnya agar terjadi kekuatan ikatan yang baik dan mereduksi porositas. Agar terjadi pembasahan yang baik, sudut kontak (*contact angle*) antara matriks dan penguat harus lebih kecil dari 90°. Ketika sudut kontak yang terjadi lebih besar, maka perlu ditambahkan suatu agen pembasah (*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.



Gambar 2.9 Sudut kontak pembasahan pada komposit [30]

- c. Perbandingan volume fraksi antara matriks dan penguat. Jumlah matriks dan penguat dalam komposit akan mempengaruhi sifat komposit tersebut. Semakin banyak jumlah suatu material dalam komposit, maka semakin besar pengaruh material tersebut terhadap sifat komposit. Pengaruh komposisi terhadap sifat komposit ini dibakukan dalam bentuk hukum campuran (*rule of mixture*), yaitu:

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

Keterangan:

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

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

Densitas komposit juga ditetapkan dalam rumusan:

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

dimana

ρ_c = Densitas (komposit (c), penguat (f), matriks (m))

m = Massa (komposit (c), penguat (f), matriks (m))

Pelat bipolar yang akan di buat dalam penelitian ini merupakan jenis Polimer Matriks Komposit (PMC), dengan Epoxy resin sebagai matriks polimer thermoset dan grafit sebagai penggisi (*filler*) dan fasa penguat (*reinforcement*). Grafit dalam bentuk serbuk halus digunakan untuk mendapatkan kekuatan dan kekakuan (*strength and stiffness*), konduktivitas listrik dan thermal, dan agar tahan terhadap korosi. Jenis komposit pelat bipolar yang akan dihasilkan dalam penelitian ini berdasarkan klasifikasi bentuk *reinforce*-nya adalah *particle reinforce composite*, dengan grafit sebagai penguat *filler* yang akan terdispersi secara merata pada seluruh bagian komposit. Sehingga sifat yang dimiliki material dengan penyusun seperti ini adalah *isotropi*, sama ke semua bidang (arah).

2.5. Aplikasi Sel Bahan Bakar.

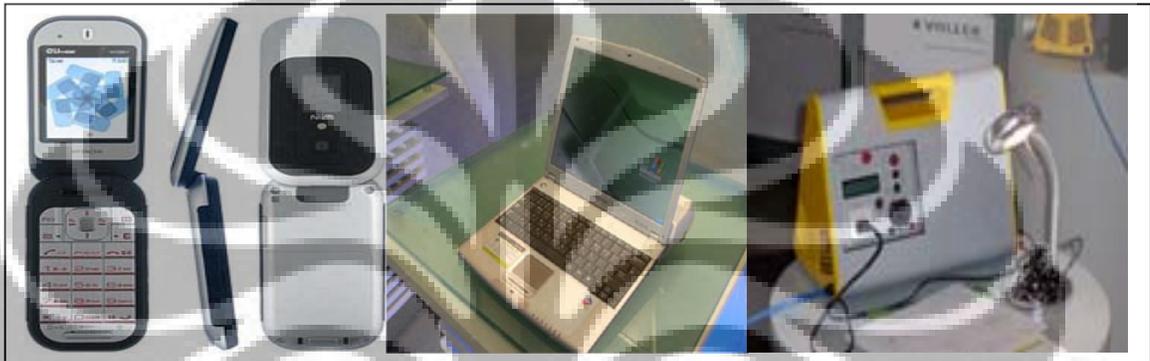
Sel bahan bakar dapat memiliki peluang aplikasi yang sangat luas sebagai sumber energi listrik karena berbagai keuntungannya. Sel bahan bakar dapat dibuat untuk bisa menghasilkan daya yang kecil hingga besar berukuran Mega Watt. Sel bahan bakar temperatur rendah dapat digunakan untuk aplikasi barang-barang elektronik, sumber energi portable, dan transportasi. Sedangkan sel bahan bakar bertemperatur lebih tinggi bisa untuk transportasi yang lebih besar seperti kereta dan kapal laut, juga sebagai pembangkit listrik independent dengan berbagai kapasitas.

Secara umum, aplikasi sel bahan bakar dapat dibagi menjadi 3 sektor utama [3-4]:

1. Aplikasi *Portable*/Ringkas:

Aplikasi sel bahan bakar untuk kapasitas yang cukup kecil adalah untuk bidang yang portable/ringkas. Termasuk didalamnya adalah untuk peralatan elektronik yang bisa dibawa-bawa seperti telpon genggam, PDA, Laptop, Charger

Baterai, hingga camera video. Aplikasi lainnya yang termasuk portable adalah catu daya ringkas (*portable power supply*) dan sumber tenaga cadangan (*auxiliary power unit*) dengan kapasitas 1–5 kW. Kesemua aplikasi ini berfungsi sebagai sumber listrik pengganti baterai. Jenis sel bahan bakar yang digunakan umumnya adalah PEMFC dan DMFC yang beroperasi pada temperatur rendah. Gambar 2.10 memberikan contoh penggunaan fuel cell pada aplikasi yang ringkas (*portable*).



Gambar 2.10. Contoh aplikasi sel bahan bakar portabel; telepon selular, laptop, dan pembangkit mikro portabel.

2. Transportasi:

Sektor transportasi menjadi perhatian khusus untuk aplikasi sel bakar karena sektor ini menyumbang emisi gas berbahaya yang sangat besar selain sektor industri. Sel bahan bakar telah mulai diaplikasikan untuk berbagai moda angkutan, baik darat, laut, dan udara karena tidak menghasilkan gas polutan dan tidak berisik. Untuk kapasitas skala kecil telah diaplikasikan pada sepeda dan berbagai skuter. Untuk kapasitas skala sedang diaplikasikan untuk mobil, forklift, hingga pada pesawat udara. Dan untuk skala besar telah diaplikasikan pada berbagai bus, kereta, kapal selam, dan kapal laut.

Berbagai perusahaan otomotif terkemuka dunia telah mendemonstrasikan produk mereka dalam bentuk prototipe skuter, mobil dan bus. termasuk didalamnya adalah Mercedes Benz, Chrysler, VW, Peugeot, Scania, Toyota, Honda, Nissan, Mitsubishi, Yamaha, dan masih banyak lagi. Sedangkan Boeing

Universitas Indonesia

dan Air Bus juga telah mengujicoba pada pesawat komersial mereka untuk menjalankan berbagai peralatan elektronik pesawat. Kesuksesan berbagai prototipe ini semakin mendekatkan penggunaan sel bahan bakar secara masal. Beberapa perusahaan menargetkan tahun 2012 sebagai tahun peluncuran produk mereka secara komersial. Sedangkan beberapa masih menunggu lebih lama untuk menyempurnakannya. Gambar 2.11 memberikan contoh alat transportasi yang menggunakan fuel cell sebagai sumber energinya.



Gambar 2.11 Contoh aplikasi sel bakar pada sektor transportasi: kereta, bus, skuter.

3. Pembangkit listrik:

Sel bahan bakar dapat dibuat untuk keperluan pembangkit listrik independen terhadap jaringan listrik, sehingga bisa digunakan pada lokasi-lokasi terpencil yang tidak ada listriknya. Sel ini juga dapat digunakan secara bersamaan dengan sistem secara cogeneration menggunakan pembangkit berbahan bakar gas alam untuk menghasilkan daya yang lebih besar, contohnya pada sistem MCFC dan SOFC. Kapasitas terpasang untuk sel bakar jenis ini bisa bervariasi dari beberapa kW hingga orde Mega Watt. Penggunaan sel bakar sejauh ini telah diterapkan oleh beberapa rumah sakit, pada stasiun pemancar telekomunikasi untuk menggantikan baterai, fasilitas eksplorasi minyak dan gas, universitas dan lembaga riset. Serta kalangan militer di Eropa dan Amerika Utara sudah menggunakan dan terus melakukan penelitian yang intensif untuk diaplikasikan pada fasilitas-fasilitas militer mereka. Gambar 2.12 memberikan contoh fuel cell untuk aplikasi pembangkit yang cukup besar di beberapa lokasi berbeda.



Contoh 2.12 Aplikasi fuel cell untuk pembangkit listrik, kecil hingga besar.

Di beberapa negara maju seperti kawasan Amerika utara dan Jepang, sel bahan bakar juga digunakan pada lokasi-lokasi pengolahan sampah dan beberapa industri pengolahan minuman anggur dengan memanfaatkan gas metan yang dihasilkan dari tempat tersebut sebagai bahan bakar fuel cellnya. Pemanfaatan gas metan sangat strategis dalam konsep pengurangan efek gas rumah kaca. Gas metan yang berbahaya dijadikan bahan bakar untuk fuel cell yang menghasilkan listrik dengan bersih (*zero emission*).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tahapan Penelitian dan Diagaram Alir Penelitian.

3.1.1. Tahapan Penelitian.

Penelitian ini dilakukan dalam tiga tahap, yaitu:

1. Pertama, optimasi komposisi optimum antara pengisi (*filler*) dan pengikatnya (*binder/matrix*). Tahapan ini dilakukan untuk mencari komposisi optimum antara massa grafit sebagai *filler* dan massa epoxy resin sebagai pengikatnya (matriks). Komposisi grafit dimulai dari 60 hingga 90 *wt%*, dan resinnya 40 hingga 10 *wt%*.
2. Kedua, optimasi penambahan serbuk karbon black.
Setelah mendapatkan komposisi yang terbaik, dilakukan penambahan karbon black pada komposisi ini menggantikan grafit secara bertahap. Penambahan karbon black dilakukan dengan variasi komposisi 5, 10, 15, dan 20 *wt%* terhadap pengisi (grafit).
3. Ketiga, optimasi penambahan serbuk Alumunium (Al).
Setelah didapat hasil yang optimum pada tahap kedua, maka dilakukan penambahan serbuk alumunium secara bertahap menggantikan grafit. Penambahan Alumunium dilakukan dengan variasi komposisi 2, 4, 6, 8, dan 10 *wt%* terhadap pengisinya. Karbon black tetap dipertahankan sebanyak 10 *wt%*.

3.1.2. Diagram Alir Penelitian.

Berikut adalah diagram alir penelitian ini secara umum untuk keseluruhan tahapan:



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.

3.2. Alat dan Bahan.

3.2.1. Alat.

Dalam penelitian ini peralatan yang digunakan terdiri dari 2 bagian, alat proses dan alat karakterisasi.

Universitas Indonesia

a. Alat Proses:

1. Beaker gelas pyrex beraneka volume.
2. Timbangan digital.
3. Spatula gelas dan logam.
4. Mixer kue, Miyako.
5. Pipet ukur dan pipet filler.
6. Cetakan besi berukuran 15 X 15 cm.
7. Mesin hot pres hidrolis.
8. Hot plate.
9. Thermometer.
10. Gergaji besi.
11. Jangka sorong.
12. Kertas amplas aneka ukuran, no 120 s/d 1200.
13. Mesin amplas.

b. Alat Karakterisasi

1. DCS.
2. SEM
3. UTM
4. Four Point Probe.
5. Peralatan untuk pengujian porositas dan densitas.

3.2.2. Bahan.

Dalam penelitian ini bahan-bahan yang digunakan adalah bahan yang bisa didapatkan di pasaran dalam negeri, meliputi:

1. Grafit murni (extra pure 1.02460, dari Merck).
2. Karbon black teknis.
3. Epoxy resin, Eposchon – Bakelite EPR 174, PT. Justus Kimiaraya.
4. Hardener, Eposchon – V 140, PT. Justus Kimiaraya.
5. Methanol, pro analysis dari Merck.
6. Bahan aditif konduktif, Aluminium (Al) halus (fine powder 1.01056 dari Merck).

3.3. Posedur Penelitian.

3.3.1. Pembuatan Pelat Bipolar.

Secara umum pembuatan pelat bipolar terbagi menjadi 3 bagian, yaitu:

1. Persiapan.

Tahapan persiapan meliputi penyiapan semua bahan dan alat yang digunakan. Setelah itu dilakukan penimbangan bahan sesuai dengan komposisi yang diinginkan

2. Pengadukan.

Tahapan ini terdiri dari beberapa langkah secara umum yaitu:

1. Grafit, karbon black, dan alumunium dimasukkan kedalam *beaker glass* dengan kapasitas 1 liter.
2. Epoxy Resin dan Hardener diencerkan dengan Methanol sebanyak ± 30 ml, tergantung komposisi matrik dan filler, semakin sedikit matriknya, semakin banyak jumlah methanolnya. Pengadukan dilakukan selama ± 10 menit agar epoxy dan hardener larut secara merata. Pada penambahan serbuk alumunium, proses pencampuran alumunium dilakukan pada pase ini untuk menghindari perubahan fase alumunium menjadi alumina pada permukaannya. Pengadukan dilakukan dengan bantuan magnetic stirrer, kecepatan 300–500 rpm. Jumlah alumunium dibagi 2 bagian, masing-masing ditambahkan pada epoxy dan hardener.
3. Epoxy resin encer lalu dimasukkan ke dalam *beaker glass* berisi adonan, lalu *mixing* selama ± 4 menit.
4. Hardener encer lalu dimasukkan ke dalam *beaker glass* berisi adonan, lalu *mixing* kembali selama ± 5 menit.
5. *Beaker glass* dipindahkan ke atas mesin *hot pelate* dengan temperatur 105 °C, dibiarkan selama ± 5 menit.
6. Kemudian pindahkan dari hot pelate dan mixing ± 3 menit, kemudian tempatkan kembali diatas hot pelate selama ± 3 menit. Mixing dan

pemanasan berulang antara 15 s/d 20 menit untuk menghasilkan adonan yang siap dicetak, dengan kadar kelembaban yang cukup.

3. Penyetakan.

Setelah pengadukan adonan selesai, dilakukan penyetakan menggunakan cetakan besi berukuran luasan isi 15 x 15 cm.

1. Tempatkan adonan dalam cetakan secara merata, dan tutup.
2. Cetak menggunakan mesin hot press hidrolik, dengan parameter: tekanan 300 kg/cm^2 , suhu $70 \text{ }^\circ\text{C}$, selama 4 jam.
3. Setelah hot pressing selesai, diamkan cetakan untuk dibuka keesokan hari (>14 jam). Kemudian keluarkan pelat hasil cetakan dan siapkan untuk pengujian.



(a)



(b)

Gambar 3.2. a) Mesin hidrolik hot press, b) cetakan besi 15 x 15 cm.

4. Pemberian nama hasil cetakan dilakukan dengan menggunakan kode tertentu yang dijabarkan pada tabel-tabel berikut:

a. Optimasi Komposisi.

Tabel 3.1. Penamaan pelat bipolar hasil optimasi komposisi.

| No | Komposisi (wt%) Filler : Matrix | Kode |
|----|------------------------------------|------|
| 1 | 60 : 40 | A0 |
| 2 | 65 : 35 | B0 |
| 3 | 70 : 30 | C0 |
| 4 | 75 : 25 | D0 |
| 5 | 80 : 20 | E0 |
| 6 | 85 : 15 | F0 |
| 7 | 90 : 10 | G0 |

b. Penambahan Karbon Black.

Tabel 3.2. Penamaan pelat bipolar hasil penambahan karbon black.

| No | Penambahan Karbon Black (wt%) terhadap filler | Kode |
|----|--|------|
| 1 | 0 | E0 |
| 2 | 5 | E1 |
| 3 | 10 | E2 |
| 4 | 15 | E3 |
| 5 | 20 | E4 |

c. Penambahan Alumunium.

Tabel 3.3. Penamaan pelat bipolar hasil penambahan alumunium.

| No | Penambahan Alumunium (wt %) terhadap filler | Kode |
|----|--|------|
| 1 | 0 | E2 |
| 2 | 2 | E2-a |
| 3 | 4 | E2-b |
| 4 | 6 | E2-c |
| 5 | 8 | E2-d |
| 6 | 10 | E2-e |

3.3.2. Pembuatan Spesimen Uji.

Untuk melakukan berbagai jenis karakterisasi yaitu: pengujian konduktivitas, analisa porositas dan densitas, dan pengujian kuat lentur, pelat bipolar perlu dipotong untuk dijadikan spesimen uji sesuai dengan ukuran yang ditentukan oleh tiap standar pengujian. Setelah dipotong, spesimen uji dihaluskan dengan mesin amplas terlebih dahulu, baru kemudian menggunakan kertas amplas berbagai ukuran kehalusan untuk penyelaannya. Spesimen dibuat masing-masing 5 buah untuk tiap pengujian seperti diperlihatkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 a) contoh potongan spesimen uji untuk pengujian konduktivitas, densitas, dan porositas; b) potongan spesimen uji untuk kuat lentur (flexural).

3.4. Prosedur Pengujian.

3.4.1. Pengujian Konduktivitas Listrik.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan hantaran (konduktivitas) listrik dari pelat bipolar yang dibuat. Konduktivitas listrik ini sangat penting mengingat pada aplikasinya pelat bipolar berfungsi sebagai pengumpul dan penghantar arus listrik.

Pengujian dilakukan di Pusat Penelitian Fisika LIPI, Puspiptek, Serpong dengan menggunakan alat Veeco FPP 5000 - *four point probe* yang dapat dilihat di Gambar 3.4 di bawah ini.



Gambar 3.4 *Four point probe* Veeco FPP 5000.

Sampel diletakkan kedalam alat kemudian nilai ketebalan sampel tersebut dimasukkan dalam satuan μm . 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 3.5 .

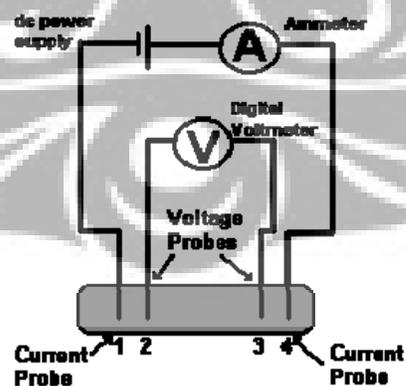


Figure 2: Schematic of Four-Point Probe

Gambar 3.5 Skema kerja *four point probe* [29].

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:

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

3.4.2. Pengujian Densitas.

Pengujian dilakukan menggunakan peralatan uji densitas di Pusat Penelitian Fisika LIPI, Puspiptek, Serpong berdasarkan prosedur pengujian ASTM D-792 [32]. Perhitungan densitas benda (*bulk density*) penting dalam mempengaruhi karakteristik sifat komposit. Densitas pada bentuk yang kompleks ditentukan dengan menggunakan prinsip Archimedes, yaitu membandingkan perbedaan berat di udara dengan berat dalam cairan.

Prosedur pengujian densitas dengan ASTM D-792 adalah sebagai berikut:

1. Sampel pelat bipolar ditimbang di udara pada timbangan digital, dan nilainya dicatat sebagai massa sampel di udara (A), dalam hal ini digunakan kawat penggantung.
2. Lalu sampel dicelupkan dalam *beaker glass* berisi air menggunakan kawat penggantung, pencelupan sampel harus dilakukan secara menyeluruh pada area sampel hingga semua permukaan sampel benar-benar tercelup di dalam air tetapi tidak boleh menyentuh dasar dan pinggir gelas, tepat ditengah-tengah tinggi air.
3. Setelah sampel tercelup, sampel ditimbang dan nilainya adalah (B)
4. Hitung nilai densitas.

Berikut persamaan untuk menentukan densitas sampel:

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

dimana: ρ = densitas (gr/cm³)
 A = massa sampel kering (gr)
 B = massa sampel tergantung dalam air (gr)
 ρ_{air} = rapat massa air tergantung suhu saat pengukuran (gr/cm³).

3.4.3. Pengujian Porositas dan Serapan Air.

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui tingkat keporosan pelat bipolar yang dibuat. Pelat bipolar yang baik harus memiliki nilai porositas yang rendah karena dalam aplikasinya, pelat ini berfungsi sebagai dua saluran gas yang terpisah sehingga tidak boleh ada kebocoran/difusi gas di dalam pelat bipolar.

Pengujian dilakukan di Pusat Penelitian Fisika LIPI, Puspiptek, Serpong berdasarkan prosedur pengujian ASTM C-20 [33]. Pengujian ini dilakukan dengan mengeluarkan uap air dalam sampel uji dengan cara dipanaskan lalu kemudian direbus untuk memasukan air ke dalam pori-porinya.

Prosedur pengujian porositas dan serapan air dengan menggunakan ASTM C-20 adalah sebagai berikut:

1. Keringkan sampel uji dalam oven dengan temperatur $\pm 105\text{ C}^\circ$ selama 1 jam agar uap air atau cairan yang ada dalam sampel menguap.
2. Timbang sampel yang telah dikeringkan sebagai massa kering, *dry weight* (D).
3. Rendam sampel dalam air mendidih $\pm 100\text{ C}^\circ$ di atas hot plate selama 2 jam. Hal ini bertujuan untuk memasukan air kedalam pori-porinya. Dalam perendaman, sampel digantung melayang keranjang kawat, tepat ditengah-tengah tinggi air. Hal ini untuk agar seluruh permukaan sampel bisa kontak dengan air sehingga air bisa masuk ke dalam pori-porinya.
4. Diamkan sampel dalam air (dingin) minimal 12 jam, (dalam pengujian ini digunakan 16 jam).

Universitas Indonesia

5. Timbang sampel yang telah mengalami perendaman melayang dalam air (kawat penggantung digunakan), catat nilainya sebagai massa dalam air, *suspended weight* (S).
6. Hilangkan air pada permukaan sampel dengan cara pengelapan singkat menggunakan kain katun atau linen. Timbang massa sampel sebagai massa tersaturasi, *saturated weight* (W).
7. Hitung nilai porositas (P) dan Serapan Air (A).

Perhitungan nilai porositas dan serapan air dapat dilakukan menggunakan persamaan:

$$P (\%) = \frac{(W - D)}{(W - S)} \times 100 \quad (3.3)$$

$$A (\%) = \frac{(W - D)}{(D)} \times 100 \quad (3.4)$$

dengan; P (%) = Porositas (%)
 A (%) = Serapan Air
 W = Saturated weight (gr)
 D = Dry weight (gr)
 S = Suspended weight (gr)

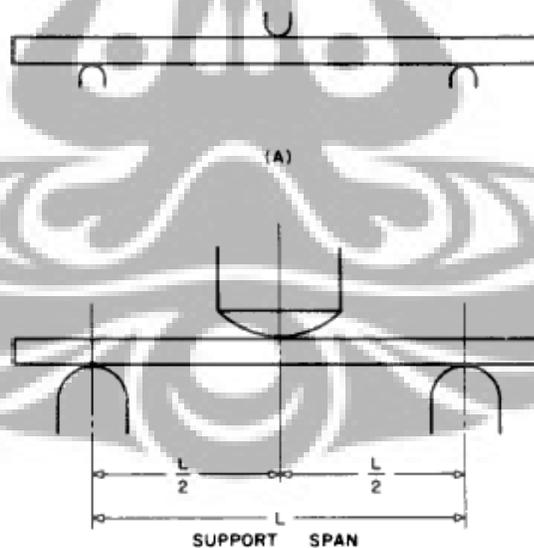
3.4.4. Pengujian Kekuatan Lentur (*Flexural Strength*).

Tujuan dari pengujian kekuatan lentur/*flexural strength* ini adalah untuk mengetahui kekutan pelat bipolar yang dibuat terhadap gaya tekan yang bekerja terhadapnya. Pada aplikasinya pelat bipolar dalam sistem PEMFC akan berfungsi sebagai saluran gas bertekanan dan sebagai rangka sehingga akan mengalami tekanan dari gas O₂ dan H₂ sebagai bahan bakar, juga dari baut-baut untuk mengencangkan masing-masing sel menjadi sebuah sistem *stack fuel cell*.



Gambar 3.6 Peralatan uji flexur, a) alat dan operator, b) posisi spesimen.

Pengujian ini dilakukan di Pusat Penelitian Fisika-LIPI, Puspiptek, Serpong dengan menggunakan standar ASTM D-790 [34], dengan panjang support span 64 mm, diameter punch 3 mm, dan kecepatan pembebanan 1,5 mm/menit. Pengujian kuat lentur ini menggunakan metode *three point bending*, seperti ditunjukkan pada gambar 3.7 berikut ini.



Gambar 3.7 Skema pengujian kuat lentur (*flexural strength*), [34].

Dalam pengujian ini, data yang dihasilkan adalah beban maksimum (P) yang diberikan terhadap sampel uji hingga sampel uji mengalami patah. Beban yang dihasilkan ini kemudian dikonversikan untuk menghitung tegangan maksimal (kuat lentur maksimal) sampel tersebut.

Persamaan yang digunakan adalah.

$$\sigma_f = \frac{3 PL}{2 b d^2} \quad (3.5)$$

keterangan: σ_f = tegangan/ kuat lentur (Mpa)

P = beban maksimum (N)

L = panjang support span (mm)

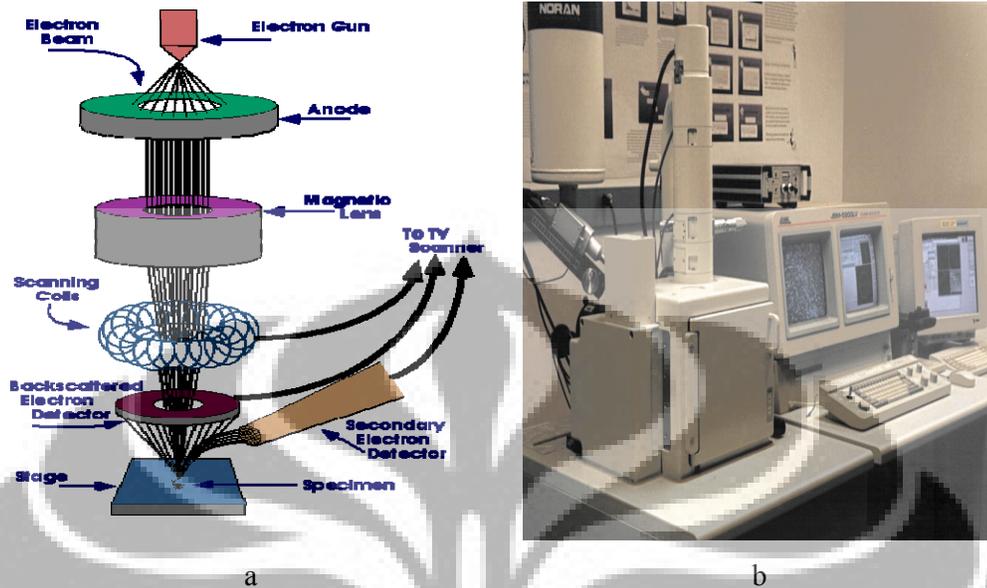
b = lebar specimen (mm)

d = tebal specimen (mm)

3.4.5. Analisis Morfologi Permukaan.

Pengujian SEM dilakukan menggunakan peralatan SEM-EDX JEOL JSM 5310 LV, di fasilitas milik Program Studi Material Science, FMIPA-UI, Salemba.

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. 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 Å.



Gambar 3.8 a) Skema sebuah peralatan SEM; b) contoh sebuah alat SEM [35].

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.

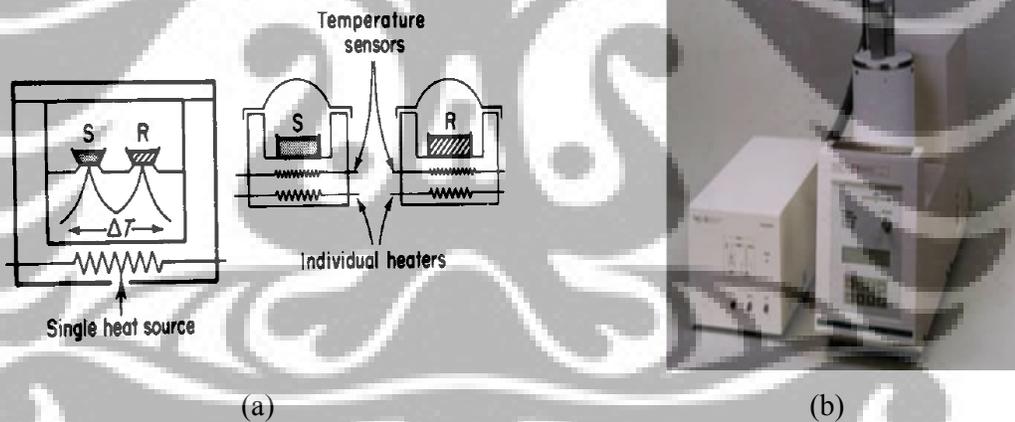
3.4.6. Analisis Sifat Panas.

Pengujian sifat panas dilakukan untuk mengetahui perubahan dari pelat komposit bila mendapat perlakuan panas hingga suhu tertentu (300 °C). Hal ini untuk mengetahui ketahan pelat bila diaplikasikan untuk sebuah stack PEMFC, dimana suhu operasi normalnya sekitar 60-100 °C.

Universitas Indonesia

Pengujian sifat panas dilakukan menggunakan alat *Differential Scanning Calorimetry*, DSC-50 buatan Shimadzu, di fasilitas milik Program Studi Material Science, FMIPA-UI, Salemba.

Peralatan DSC mengukur perbedaan temperature antara sampel dan referensi yang terepos oleh suatu pemanasan teratur dalam suatu tungku. Sampel dan referensi dipanaskan dalam suasana inert (umumnya gas nitrogen/Argon). Referensi dan sampel dipanaskan sendiri-sendiri dan energi disuplai untuk menjaga suhu keduanya tetap sama (*null balance*). *Sample holder* biasanya berbahan alumunium dan referensinya Alumina $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Data yang dihasilkan diplot antara $(d\Delta Q/dt)$ versus temperatur. Area puncak termogram berkaitan langsung dengan entalpi sehingga dapat digunakan untuk menghitung kapasitas panas, panas fusi, entalpi reaksi, dll [36].



Gambar 3.9 a) skema DSC , b) Shimadzu DSC-50 [33].

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pelat Bipolar Hasil Optimasi Komposisi

Langkah pertama dalam pembuatan komposit pelat bipolar pada penelitian ini adalah optimasi komposisi. Pada bagian ini dicari optimasi komposisi yang terbaik antara pengisi (grafit) dan pengikatnya (*binder*) yang berupa epoxy resin. Epoxy resin yang digunakan memiliki perbandingan 1 banding 1 antara epoxy dan hardenernya. Komposisi grafit dalam komposit dimulai dari 60 % hingga 90 %, dan epoxy resin mulai dari 40 % hingga 10 %. Diharapkan adanya sifat yang unggul pada komposit pelat bipolar yang dihasilkan pada suatu komposisi optimum, terutama konduktivitas listrik, porositas, dan kekuatan mekaniknya.

4.1.1. Pelat Bipolar Hasil Pencetakan.

Pencetakan menggunakan cetakan besi dengan ukuran panjang dan lebar, 15 x 15 cm, dan ketebalan rongga 2 mm. Dengan menggunakan proses pencetakan yang sama, dihasilkan pelat bipolar dengan bentuk yang sama secara visual, baik dari proses optimasi komposisi, penambahan karbon black, dan penambahan aluminium. Ketebalan yang dihasilkan berkisar 4,5 sampai dengan 5,5 mm tergantung jumlah bahan total yang digunakan.

Hasil pencetakan pelat bipolar optimasi komposisi dapat dilihat pada Gambar 4.1. Hasil pencetakan untuk optimasi komposisi diwakili oleh spesimen E0 (80 wt% grafit dan 20 wt% epoxy resin) karena semua hasil cetakan memiliki bentuk fisik yang sama. Pada permukaan komposit hasil cetakan terdapat tekstur guratan dengan alur tertentu. Hal ini disebabkan oleh pembuatan cetakan yang permukaannya tidak rata. Pada sisi-sisi sampel terdapat kelebihan material yang menyelim di antara cetakan, yang disebabkan oleh bahan yang dicetak sangat halus dan masih bisa bergerak ketika ditekan dengan gaya besar (300 kg/cm²).



Gambar 4.1. Pelat bipolar hasil pencetakan optimasi komposisi, E0.

4.1.2. Pengujian Porositas dan Serapan Air.

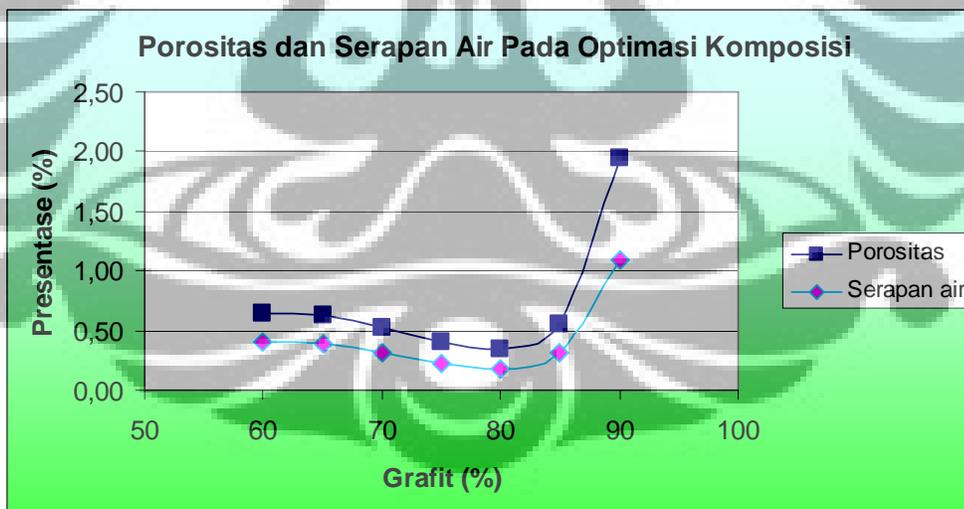
Porositas dan serapan air pada komposit diukur menggunakan metode standar ASTM C-20. Spesimen uji mengalami perlakuan panas dan perebusan untuk mendapatkan nilai porositas dan jumlah air yang bisa terserap oleh komposit (mengisi pori). Grafik hasil pengukuran porositas dan serapan air diperlihatkan pada Gambar 4.2 dalam satuan persentase. Nilai serapan air antara 0,186-1,090 % dan nilai porositas antara 0,339-1,949 %. Nilai serapan air lebih kecil dari pada nilai porositasnya. Hal ini karena air tidak dapat menembus dan menempati seluruh bagian pori pada spesimen karena terhalangi oleh epoxy resin. Epoxy resin mengikat serbuk grafit dengan cukup baik untuk membuat komposit menjadi padat sehingga tidak tercipta pori yang saling berhubungan.

Porositas dan serapan air cenderung turun mulai dari komposisi 60 wt % grafit hingga batas nilai terendah pada spesimen 80 wt% grafit, dimana masing-masing nilainya adalah 0,339 % untuk porositas dan 0,186 % untuk serapan airnya. Komposisi grafit hingga 80 wt % dengan epoxy resin hingga 20 wt %

membuat komposit semakin padat dan epoxy resin memiliki jumlah yang cukup untuk membasahi dan mengikat serbuk grafit untuk menghasilkan komposit yang padat dan porositas yang rendah. Peningkatan grafit 60 hingga 90 wt% membuat densitas komposit meningkat seperti telah dibahas pada bagian 4.1.2 sebelumnya.

Perubahan terjadi pada komposisi grafit 80-90 wt% dan epoxy resin 20-10 wt%, porositas meningkat cukup tajam hingga mencapai 1,949 %. Hal ini disebabkan oleh kurangnya jumlah epoxy resin pengikat pada komposit. Tidak semua bagian grafit bisa terbasahi dan terikat oleh epoxy resin, dan epoxy resin juga tidak dapat mengisi seluruh bagian komposit secara merata. Sehingga akan terdapat bagian-bagian yang berpori yang jumlahnya semakin banyak dengan makin sedikitnya epoxy resin.

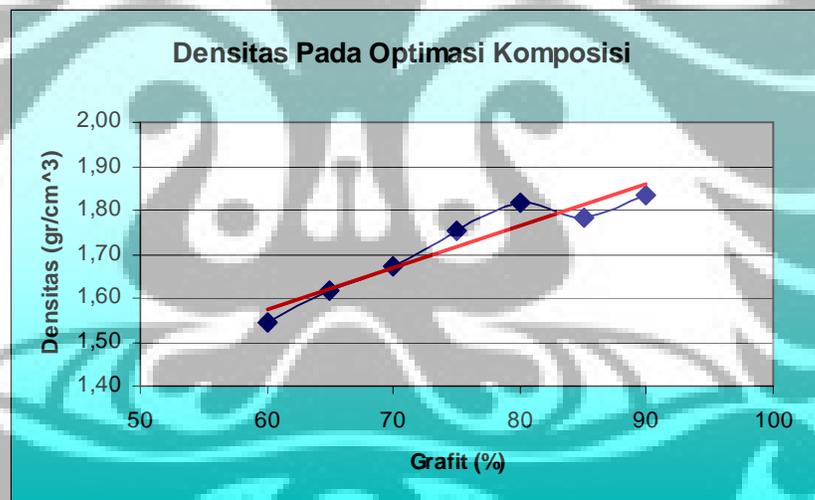
Dari fenomena ini dapat disimpulkan adanya jumlah pengikat optimum untuk mendapatkan porositas dan serapan air yang terendah, yaitu 80 wt% grafit dan 20 wt% epoxy resin.



Gambar 4.2. Porositas dan serapan air pada optimasi komposisi.

4.1.3. Pengujian Densitas.

Densitas komposit pelat bipolar hasil pencetakan diukur menggunakan pengujian standar ASTM D-792 pada suhu air 27-28 °C. Nilai densitas yang dihasilkan terkecil adalah 1,545 gr/cm³ pada komposisi 6:4 dan terbesar adalah 1,835 gr/cm³ pada komposisi 9:1. Kecenderungan peningkatan nilai densitas komposit diperlihatkan pada Gambar 4.3. Nilai densitas komposit meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah grafit. Secara teoritik, grafit memiliki densitas 2,2 gr/cm³, sedangkan densitas kasar (*bulk density*) serbuk grafit yang digunakan pada penelitian ini memiliki besaran 0,2-0,3 gr/cm³. Epoxy resin umumnya memiliki besaran densitas 1,2 gr/cm³, tetapi densitas campuran epoxy-hardener berbeda tergantung spesifikasi *hardener* yang digunakan (jenis dan jumlahnya ketika dicampur dengan epoxy).



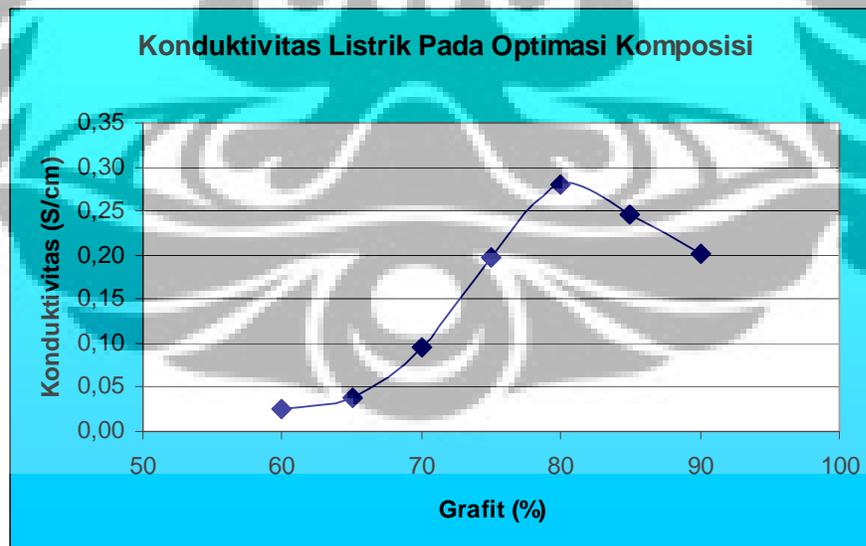
Gambar 4.3. Grafik densitas komposit pelat bipolar pada optimasi komposisi.

Dengan makin meningkatnya grafit dan berkurangnya epoxy resin, maka nilai densitas komposit semakin besar karena grafit memiliki berat jenis yang lebih besar daripada epoxy resin, sesuai dengan hukum pencampuran (*rule of mixture*). Anomali terdapat pada komposit 85-90 wt% grafit. Densitas 85 wt % lebih kecil dibandingkan spesimen 80 wt% grafit, kemudian densitasnya naik kembali pada 90 wt %. Hal ini bisa disebabkan oleh beberapa faktor seperti

kesalahan pada pengujian dan parameter proses pembuatan yang bisa sedikit berbeda, terutama pada saat *mixing* untuk membuat campuran yang homogen dan menghilangkan methanol. Proses pembuatan yang kurang baik bisa membuat adanya pori pada komposit dan menyebabkan penurunan densitas. Pada Gambar 4.2 diperlihatkan bahwa komposit dengan 85-90 wt % grafit memiliki porositas yang lebih besar dibandingkan komposit dengan 80 wt% grafit.

4.1.4. Pengujian Konduktivitas Listrik.

Sebuah pelat bipolar yang baik harus memiliki konduktivitas listrik > 100 S/cm. Pelat bipolar berfungsi sebagai pengumpul arus listrik (*current collector*) [7,14] sehingga pelat bipolar harus bersifat sebagai konduktor. Pengujian konduktivitas listrik dilakukan menggunakan alat *four point probe*. Alat ini langsung memberikan data berupa besaran resistansi suatu bahan dalam satuan Ω -cm, dengan cara menyuntikan arus dan tegangan pada kaki-kakinya. Konduktivitas merupakan kebalikan dari resistansi (persamaan 3.1). Grafik hasil pengujian nilai konduktivitas listrik ditampilkan pada Gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.4. Konduktivitas listrik pada optimasi komposisi.

Pada Gambar 4.4 terlihat nilai konduktivitas listrik yang semakin naik seiring penambahan jumlah grafit. Bermula dari 0,03 S/cm pada 60 wt% grafit dan maksimum 0,28 S/cm pada 80 wt% grafit. Nilai Konduktivitas kemudian turun ketika jumlah grafitnya semakin meningkat menjadi 0,20 S/cm pada 90 wt% grafit. Sehingga dalam hal ini terdapat kondisi optimum dimana besarnya konduktivitas optimum pada komposit dengan 80 wt% grafit dan 20 wt% epoxy resin. Hal ini disebabkan beberapa hal:

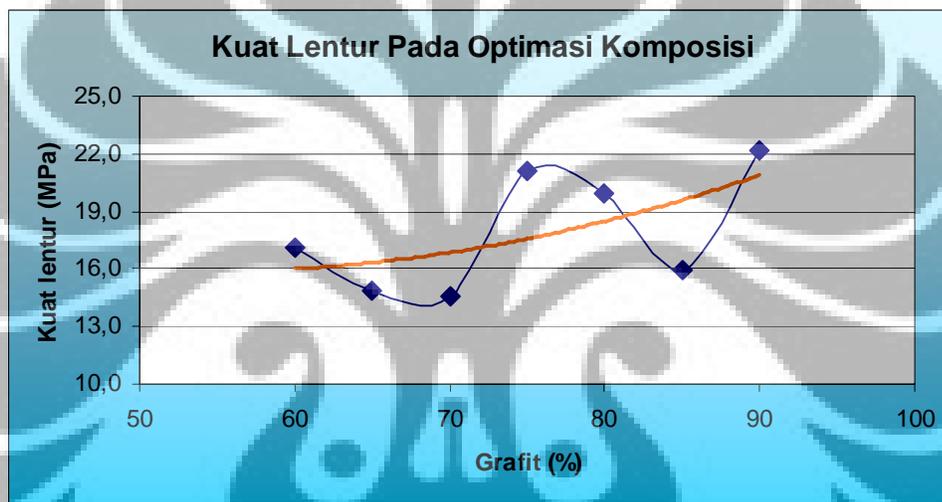
- Sifat grafit yang memiliki konduktivitas listrik yang lebih baik dari pada epoxy resin sehingga memiliki peran sebagai material konduktor. Epoxy resin merupakan polimer yang umumnya memiliki resistansi yang besar dan bersifat isolator. Dengan makin besarnya jumlah grafit maka konduktivitas akan semakin meningkat.
- Nilai densitas pada komposisi ini besar, sehingga grafit sangat rapat dan kontak arus listrik menjadi lebih baik, seperti diperlihatkan Gambar 4.3.
- Nilai porositas yang kecil sehingga kontak arus tidak terganggu adanya pori. Seperti telah dibahas pada bagian 4.1.2, porositas terendah ada pada komposisi 80 wt% grafit.

Penurunan nilai konduktivitas pada spesimen 85 dan 90 wt% grafit disebabkan oleh porositas yang lebih besar seperti yang diperlihatkan oleh gambar 4.2 sebelumnya. Keberadaan pori yang banyak akan menyebabkan jalannya arus terhambat sehingga konduktivitas menjadi turun.

4.1.5. Pengujian Kuat Lentur.

Kuat lentur atau *flexural strength* merupakan salah satu sifat yang dibutuhkan untuk merepresentasikan bahwa material komposit tahan terhadap gaya tekan mekanik. Dalam aplikasinya, pelat bipolar disatukan dengan MEA untuk membuat sebuah stack fuel cell dengan cara dikencangkan menggunakan baut. Kuat lentur diuji menggunakan standar ASTM D-790 dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM).

Grafik hasil pengujian kuat lentur diperlihatkan pada Gambar 4.5. Pada grafik terlihat nilai kekuatan lentur komposit yang turun naik dengan kecenderungan nilai yang semakin besar pada komposisi akhir 90% grafit (spesimen G0). Nilai kuat lentur paling kecil terdapat pada 70% grafit, 14,60 MPa dan terbesar pada 90% grafit, 22,16 Mpa. Pada komposisi 60-70% grafit, peranan kekuatan resin lebih besar dari pada grafit. Sifat kekutaan resin yang lebih lemah dari pada grafit membuat sifat akhir komposit yang lebih lemah.



Gambar 4.5 Kuat lentur pada optimasi komposisi.

Pada kandungan grafit yang lebih besar dari 70%, peranan grafit lebih besar. Kekuatan grafit lebih besar dari pada resinnya, sehingga sifat akhir komposit akan semakin kuat dan optimum pada 90%. Sifat ini sejalan dengan densitas komposit yang semakin besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 sebelumnya..

4.1.6. Analisa Morfologi Permukaan (SEM).

Morfologi permukaan spesimen diamati menggunakan mikroskop elektron (SEM). Pengamatan dilakukan terhadap permukaan spesimen untuk melihat sebaran grafit dan pengikatnya (epoxy resin) dan untuk mengkonfirmasi hasil pengujian sifat-sifatnya. Pengamatan SEM dilakukan hanya pada spesimen E0 (80

wt% grafit). E0 dipilih sebagai objek pengamatan karena memiliki sifat konduktivitas terbaik dan porositas terendah. Kekuatan lentur E0 juga sudah cukup baik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.5 yang mencapai 19,97 MPa.

Gambar 4.6 memperlihatkan hasil foto SEM spesimen E0 dengan perbesaran 1000X. Pada gambar terlihat bahwa ukuran partikel beragam, dari kurang dari 10 μm hingga lebih besar dari 30 μm . Bentuk partikel tidak bulat sempurna, tetapi seperti serpihan (*whisker*). Partikel ini diikat atau dilapisi oleh suatu lapisan yang berwarna lebih terang, yaitu epoxy resin. Terlihat bahwa struktur keseluruhan permukaan sangat rapat, tidak terlihat adanya pori atau saluran terbuka pada bagian ini. Maka gambar ini membuktikan bahwa komposit E0 memiliki densitas yang tinggi dan porositas yang kecil seperti telah dibahas sebelumnya. Ikatan resin yang kuat juga membuktikan bahwa komposit memiliki kuat lentur yang besar.



Gambar 4.6 Foto SEM patahan spesimen E0 dengan 1000X perbesaran.

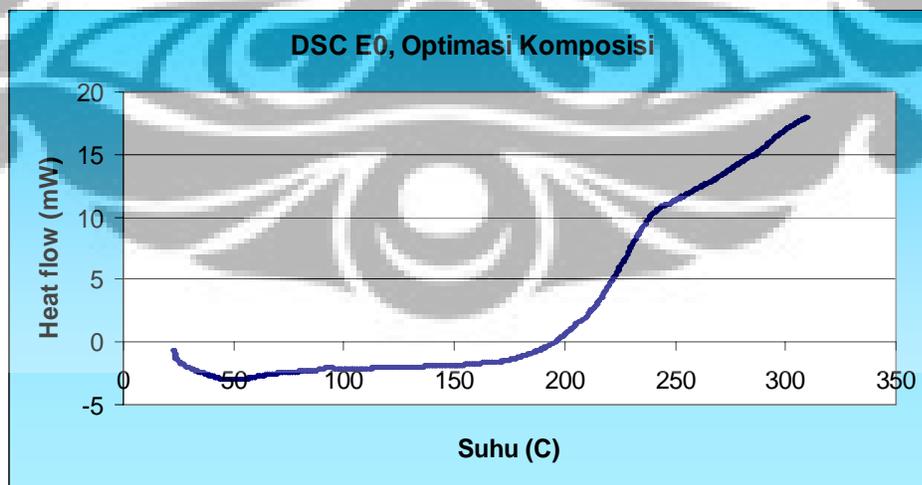
Dengan ukuran partikel yang halus dan bentuk yang berupa serpihan, menyebabkan konduktivitasnya tidak sebaik grafit dengan ukuran yang lebih besar seperti telah disampaikan oleh Zhang Jie [18] bahwa makin besar ukuran partikel, konduktivitasnya meningkat. Tetapi, dengan adanya epoxy resin yang

menyelimuti seluruh permukaan grafit sebagai pengikat, maka konduktivitasnya menjadi menurun.

Pada gambar 4.6 juga terlihat adanya partikel-partikel grafit berukuran besar yang tidak terselimuti resin. Hal ini bisa disebabkan oleh resin yang tidak mampu membasahi dan mengikat partikel secara keseluruhan, tidak seluruh permukaan grafit bisa terlapisi resin. Daya pembasahan dan jumlah resin yang kurang pada proses pembuatan komposit menjadi penyebabnya. Ketika komposit patah akibat diberi beban tekanan, bagian yang tidak terlapisi resin menjadi tampak. Bagian ini juga merupakan titik lemah komposit ketika mendapat tekanan pada uji kuat lentur.

4.1.7. Pengujian Sifat Panas (DSC).

Pengujian sifat thermal dilakukan untuk mengetahui ketahanan komposit terhadap pengaruh panas. Hal ini dilakukan karena komposit akan digunakan pada suhu operasi sekitar 60-100 °C. Komposit yang baik harus cukup stabil dan tidak terbakar hingga suhu 150 °C. Pengujian dilakukan menggunakan alat DSC hingga suhu 300 °C terhadap spesimen E0 (80 wt% grafit), karena sifatnya yang terbaik.



4.7 Hasil DSC spesimen E0, 80 wt% grafit.

Gambar 4.7 memperlihatkan hasil DSC sampel E0. Pada gambar ini terlihat bahwa pada suhu hingga 198 °C spesimen masih bersifat endotermik dengan grafik menyerap kalor. Dan selanjutnya spesimen mulai transisi menuju eksotermik dengan melepaskan kalor. Dari proses ini, dapat disimpulkan bahwa hingga suhu 200 °C spesimen masih berada dalam kondisi keras dan cukup stabil. Suhu transisi (T_g) dari keras menuju lunaknya berada diantara 200-240 °C. Sehingga dapat disimpulkan komposit ini layak digunakan untuk pelat bipolar dengan ketahanan terhadap pemanasan hingga 200 °C.

4.2. Pelat Bipolar Hasil Penambahan Karbon Black.

Setelah mendapatkan komposisi yang optimum pada penelitian pertama, yaitu 80 wt% grafit dan 20 wt% epoxy resin, maka selanjutnya dilakukan penambahan karbon black. Karbon black umumnya digunakan sebagai penguat komposit dan bisa berfungsi sebagai katalis dalam perbaikan sifat listriknya dalam jumlah tertentu. Penambahan karbon black dilakukan dengan harapan adanya perbaikan sifat-sifat komposit sebelumnya (hasil dari optimasi komposisi). Harga material yang lebih murah juga menjadi alasan ekonomi pemilihan karbon black untuk mengurangi biaya produksi. Penambahan karbon black dilakukan dengan variasi komposisi 5 wt%, 10 wt%, 15 wt%, dan 20 wt% terhadap grafitnya. Karakterisasi dilakukan dengan cara yang sama dengan penelitian pertama.

4.2.1. Pelat Bipolar Hasil Pencetakan.

Hasil pencetakan untuk penambahan karbon black diwakili oleh gambar 4.8 yang memperlihatkan pelat E2 (penambahan 10 wt% karbon black). Sama dengan hasil pada proses sebelumnya, secara umum bentuk pelat bipolar sama, hanya sedikit berbeda ketebalan. Grafit dan karbon black sama-sama berupa serbuk halus dan berwarna hitam sehingga tidak memberikan perbedaan pada komposit yang terbentuk bila dibandingkan dengan komposit pelat bipolar hasil proses optimasi komposisi. Pada permukaan komposit terdapat tekstur guratan

yang disebabkan oleh penggunaan cetakan yang tidak halus. Pada sisi-sisi sampel juga terdapat sedikit kelebihan material yang menyelip diantara cetakan.



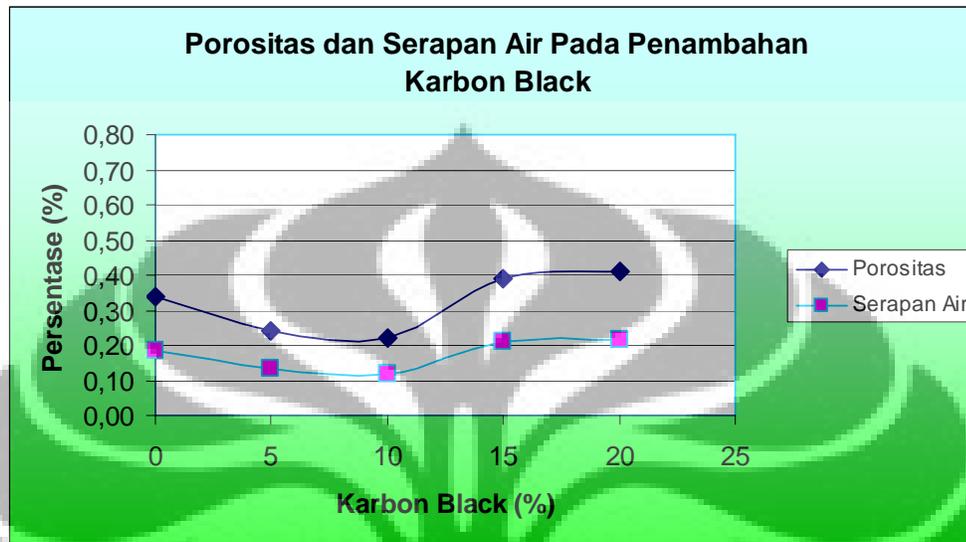
Gambar 4.8 Pelat bipolar hasil penambahan karbon black, E2.

4.2.2. Pengujian Porositas dan Serapan Air.

Grafik porositas dan serapan air akibat penambahan karbon black diperlihatkan pada Gambar 4.10. Pada grafik terlihat porositas dan serapan air besarnya menurun hingga komposisi 10 wt% karbon black dan kemudian naik kembali seiring dengan penambahan karbon black. Nilai porositas dan serapan air terendah adalah 0,220 % dan 0,118 % pada 10 wt% penambahan karbon black. Hal ini menunjukkan adanya komposisi yang optimum agar penambahan karbon black bisa menurunkan porositas dan serapan air, yaitu 10 wt% karbon black.

Penambahan 10 wt% karbon black (spesimen E2) memungkinkan pengisi (grafit-karbon black) dan matriks komposit untuk saling mengikat dan mengisi dengan rapat sehingga keberadaan pori-pori berkurang. Sedangkan dengan lebih besarnya jumlah karbon black, pori-pori meningkat karena partikel karbon black yang lebih besar ukurannya dari pada grafit menjadi semakin banyak. Ini membuat

adanya daerah yang menjadi berpori lebih banyak. Selain itu, karbon black juga bersifat *porous* (berpori).

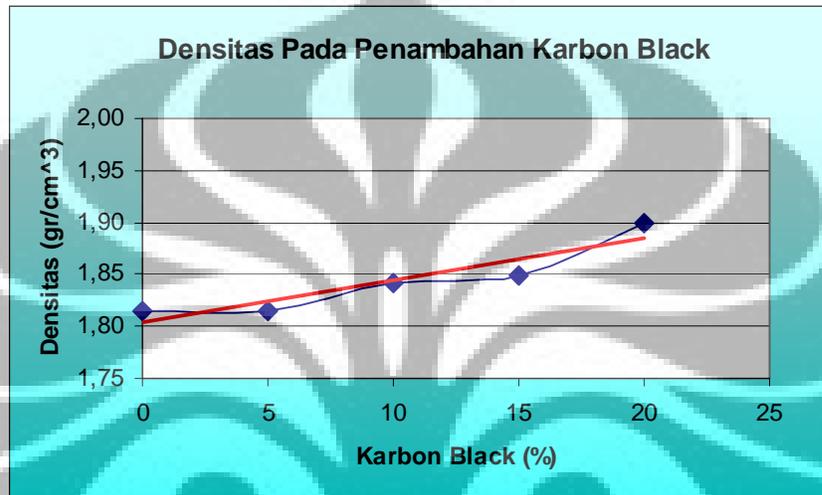


Gambar 4.9 Porositas dan Serapan air komposit akibat penambahan karbon black.

4.2.3. Pengujian Densitas.

Gambar 4.10 memperlihatkan grafik hasil pengujian densitas komposit menggunakan standar pengujian ASTM D-792. Pada grafik terlihat kecenderungan peningkatan nilai densitas. Peningkatan nilai densitas komposit seiring dengan penambahan karbon black disebabkan oleh densitas karbon black teknis yang digunakan pada penelitian ini lebih besar dari pada grafit. Bulk density grafit sebesar 0,2-0,3 gr/cm³ dan karbon black 0,34 gr/cm³ yang diukur menggunakan viknometer. Dengan makin banyaknya karbon black yang menggantikan posisi grafit, maka komposit semakin berat, atau densitasnya semakin besar. Pada penambahan ini, densitas komposit meningkat dari 1,816 gr/cm³ pada 0% karbon black menjadi 1,899 gr/cm³ pada penambahan 20% karbon black. Peningkatan densitas yang tidak terlalu besar, hanya 4,57 %, dipengaruhi juga oleh adanya sedikit peningkatan porositas seperti diperlihatkan Gambar 4.9 sebelumnya.

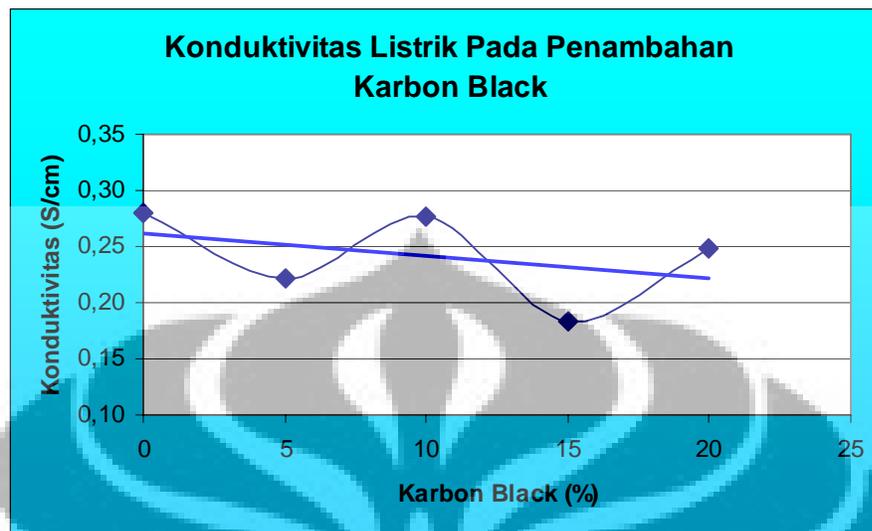
Densitas yang besar membuat komposit menjadi semakin berat. Hal ini dihindari karena akan membuat *stack fuel cell* juga menjadi berat. Sehingga densitas yang kecil yang menjadi pilihan untuk membuat komposit pelat bipolar yang baik.



Gambar 4.10. Densitas komposit pengaruh penambahan karbon black

4.2.4. Pengujian Konduktivitas Listrik.

Konduktivitas listrik pada komposit akibat pengaruh penambahan karbon black diperlihatkan pada gambar 4.11. Besarnya konduktivitas listrik pada penambahan karbon black terlihat turun naik dengan kecenderungan semakin turun. Konduktivitas listrik 0,28 S/cm pada 0 wt% karbon black, kemudian berubah turun naik, dan terendah pada 15 wt% karbon black, yaitu 0,18 S/cm. Penyebab penurunan ini adalah karbon black yang digunakan pada penelitian ini memiliki konduktivitas yang lebih rendah dari pada grafit. Struktur karbon black yang sebagian *amorfous* menyebabkan konduktivitas lebih kecil daripada grafit yang kristalin [37]. Konduktivitas juga dipengaruhi oleh porositas, dimana porositas terendah berada pada komposisi 10 wt% grafit seperti telah dibahas pada bagian 4.2.3. Dari penambahan ini, 10 wt% karbon black pada spesimen E2 dianggap cukup baik karena konduktivitasnya sama dengan E0, yaitu 0,28 S/cm.

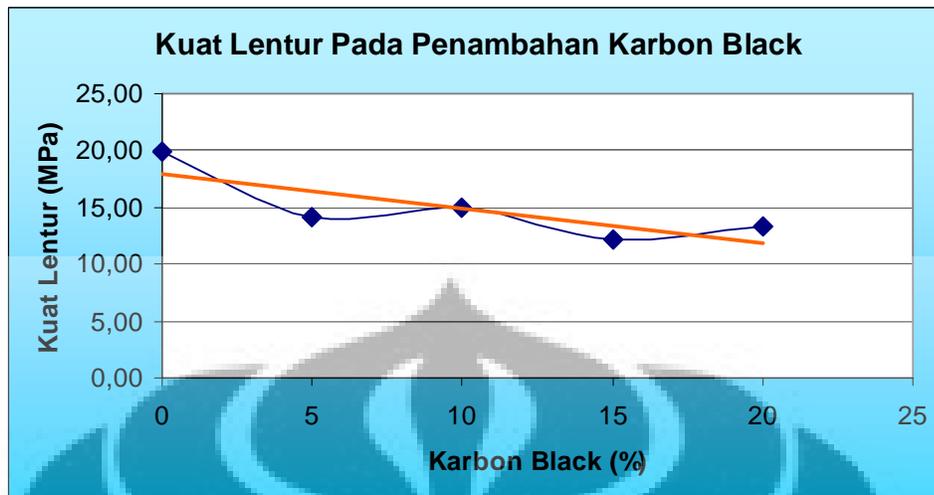


Gambar 4.11 Konduktivitas listrik komposit akibat penambahan karbon black.

4.2.5. Pengujian Kuat Lentur.

Gambar 4.12 memperlihatkan grafik hasil pengujian kuat lentur pada komposit akibat pengaruh penambahan karbon black. Pada grafik terlihat kecenderungan penurunan nilai kuat lentur, dengan kekuatan terendah pada spesimen E3, 15 wt% karbon black. Hal ini karena secara umum karbon black memiliki kekuatan yang lebih lemah dari pada grafit. Karbon black memiliki struktur yang sebagian *amorfous* dari pada grafit yang kristalin.

Dari penambahan karbon black ini, spesimen dengan penambahan 10 wt% karbon black (E2) memiliki kuat lentur terbesar dibandingkan yang lain, yaitu 15,02 MPa. Jika dilihat pada porositasnya (pembahasan 4.2.3), sampel E2 memiliki porositas yang paling rendah, sehingga porositas mempengaruhi kekuatan lentur komposit. Dengan makin berpori, kekuatan lentur akan semakin lemah.



Gambar 4.12 Kuat lentur komposit akibat penambahan karbon black.

4.2.6. Analisa Morfologi Permukaan (SEM).

Seperti pada bagian optimasi komposisi, pengamatan morfologi permukaan spesimen akibat pengaruh karbon black dilakukan menggunakan SEM. Pengamatan SEM dilakukan hanya pada spesimen E2, penambahan 10 wt% karbon black. E2 dipilih sebagai objek pengamatan karena memiliki sifat konduktivitas terbaik dan porositas terendah dibandingkan spesimen lainnya.

Gambar 4.13 memperlihatkan hasil foto SEM spesimen E2 dengan perbesaran 1000X. Pada gambar terlihat bahwa ukuran partikel tersebar beragam dengan dominasi partikel halus berbentuk pecahan berukuran sekitar dari 10 μ m. Partikel ini diikat atau dilapisi oleh epoxy resin dengan lebih banyak dibandingkan spesimen E0 (80 wt% grafit : 20 wt% epoxy resin) pada bagian optimasi komposisi. Terlihat bahwa struktur keseluruhan permukaan sangat rapat, tidak terlihat adanya pori atau saluran terbuka pada bagian ini. Hal ini membuktikan bahwa komposit E2 memiliki porositas yang lebih rendah dibandingkan komposit E0, hal ini sesuai pembahasan pada bagian 4.2.3. Dari gambar ini juga tidak terlihat adanya perbedaan antara serbuk grafit dan serbuk karbon black karena kedua bahan ini memiliki bentuk dan warna yang hampir sama.

Pada Gambar 13 juga terlihat banyaknya permukaan grafit terutama yang berukuran partikel lebih besar yang permukaannya tidak tertutupi lapisan resin. Hal ini yang menyebabkan ikatan komposit menjadi lebih lemah yang diperlihatkan oleh hasil pengujian kuat lentur pada bagian 4.2.5 (gambar 4.12) yang menyatakan kuat lentur komposit dengan penambahan karbon black lebih lemah dari pada komposit tanpa karbon black.



Gambar 4.13 Foto SEM patahan spesimen E2 dengan 1000X perbesaran

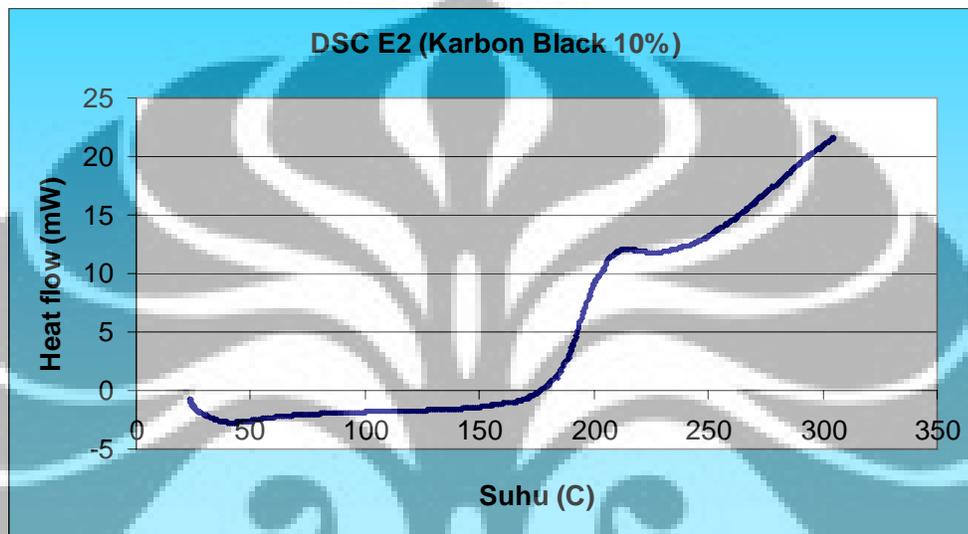
4.2.7. Pengujian Sifat Panas (DSC).

Pengujian DSC dilakukan untuk melihat ketahanan komposit terhadap pengaruh panas pada komposit dengan penambahan karbon black. Pengujian dilakukan menggunakan alat DSC hingga suhu 300 °C terhadap spesimen E2 karena sifatnya yang lebih unggul dibandingkan dengan komposisi penambahan karbon black lainnya.

Gambar 4.14 memperlihatkan hasil DSC sampel E2. Pada gambar ini terlihat bahwa dari suhu ruang 23 °C suhu hingga 178 °C spesimen masih bersifat endotermik dengan grafik menyerap kalor. Dan selanjutnya spesimen mulai

Universitas Indonesia

transisi menuju eksotermik dengan melepaskan kalor. Dari proses ini, dapat disimpulkan bahwa hingga suhu 180 °C spesimen masih berada dalam kondisi keras dan cukup stabil. Suhu transisi (T_g) dari keras menuju lunaknya berada diantara 180-210 °C. Dengan hasil ini, komposit E2 layak digunakan untuk pelat bipolar dengan ketahanan terhadap pemanasan hingga sekitar 180 °C.



Gambar 4.14 DSC spesimen E2, 10% penambahan karbon black.

4.3. Pelat Bipolar Hasil Penambahan Alumunium.

Setelah melakukan penelitian terhadap pengaruh penambahan karbon black, diperlukan perlakuan baru untuk memperbaiki sifat komposit dari hasil tersebut. Dipilih komposit E2 dengan penambahan karbon black 10 wt% sebagai acuan komposit baru. Penambahan serbuk Alumunium halus dipilih karena bahan ini mudah didapat, cukup murah untuk menekan biaya, ringan, dan sifat ketahannya terhadap korosi yang cukup baik. Diharapkan diadapatkan komposit dengan sifat cukup baik untuk digunakan sebagai pelat bipolar pada PEMFC.

Penambahan serbuk Alumunium dilakukan dengan komposisi 2 wt%, 4 wt%, 6 wt%, 8 wt%, dan 10 wt% terhadap massa total *filler*-nya (80%). Komposisi

10 wt% karbon black tetap dipertahankan pada seluruh komposit. Pengujian yang sama dengan 2 proses sebelumnya dilakukan untuk menguji sifat-sifatnya.

4.3.1. Pelat Bipolar Hasil Pencetakan.

Hasil pencetakan penambahan alumunium diperlihatkan pada gambar 4.15. Secara umum ukuran komposit hasil penambahan Alumunium lebih tebal daripada komposit-komposit sebelumnya karena massa yang lebih besar, sekitar 5-6 mm. Selain adanya tekstur yang tidak rata pada permukaan, terlihat adanya serbuk alumunium yang merata pada semua bagian permukaan berupa warna keperak-perakkan. Dari warnanya yang kontras dengan grafit, Alumunium menjadi mudah dikenali pada permukaan komposit. Sedangkan material yang berlebih pada tepian komposit ini sudah dibuang menggunakan mesin amplas sehingga sudah tidak tampak.

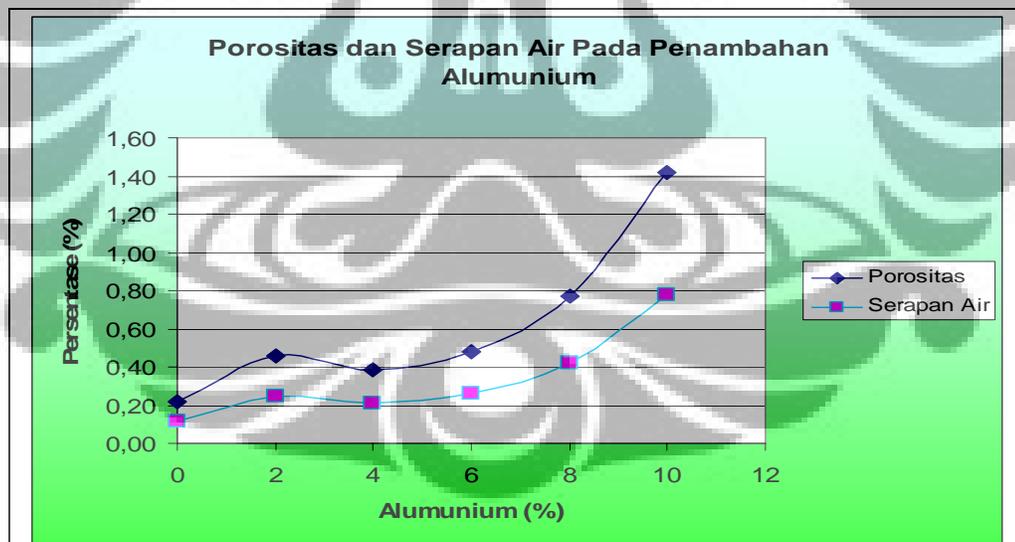


Gambar 4.15. Contoh hasil cetakan penambahan Alumunium.

4.3.2. Pengujian Porositas dan Serapan Air.

Hasil pengujian porositas dan serapan air akibat pengaruh penambahan serbuk Alumunium ditunjukkan pada Gambar 4.16. Pada grafik terlihat porositas dan serapan air besarnya semakin naik seiring penambahan Alumunium. Sedikit penurunan terjadi pada komposisi 4 wt% penambahan Alumunium, hal ini kemungkinan karena adanya sedikit perbedaan pada proses pembuatan dan kesalahan dalam proses pengujian.

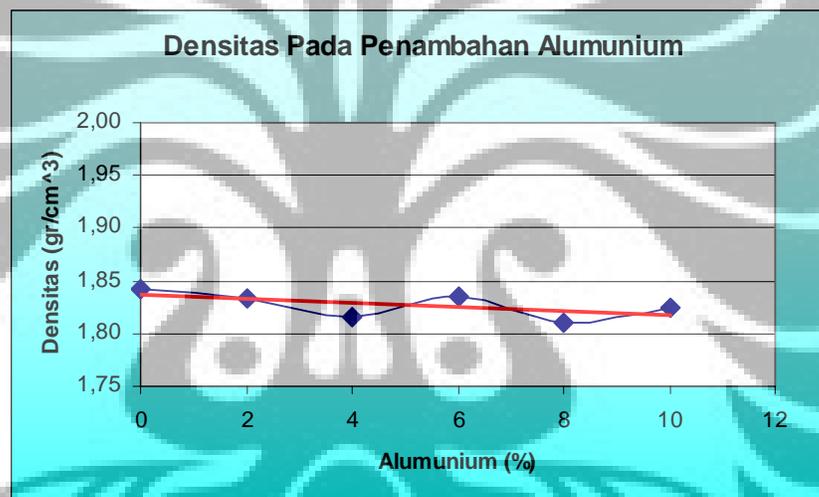
Peningkatan porositas dan serapan air disebabkan oleh keberadaan partikel Alumunium. Dengan ukuran partikel yang lebih besar akan meningkatkan volume dan jumlah bagian yang tidak terisi. Hal ini membuat adanya daerah yang menjadi berpori lebih banyak (*void*). Porositas dan serapan airnya meningkat. Peningkatan porositas dan serapan air terbesar terjadi pada 10 wt% Alumunium, besarnya 1,421 % dan 0,778 %. Dibandingkan dengan porositas mula-mula yang sebesar 0,220 %, peningkatan terjadi sebanyak 545,91 %.



Gambar 4.16 Porositas dan serapan air komposit pengaruh penambahan Alumunium.

4.3.3. Pengujian Densitas.

Gambar 4.17 memperlihatkan grafik hasil pengujian densitas komposit menggunakan pengujian standar ASTM D-792 akibat penambahan Alumunium. Pada grafik terlihat densitas komposit sedikit turun naik dengan kecenderungan semakin menurun. Densitas komposit dari 0 wt% sampai 10 wt% penambahan Alumunium hanya sedikit berubah, 1,63 % dari 1,84 gr/cm^3 menjadi 1,81 gr/cm^3 . Turun naiknya densitas yang tidak terlalu besar bisa disebabkan oleh pengaruh proses pembuatan yang sedikit berbeda dan adanya sedikit kesalahan pada proses pengujian.



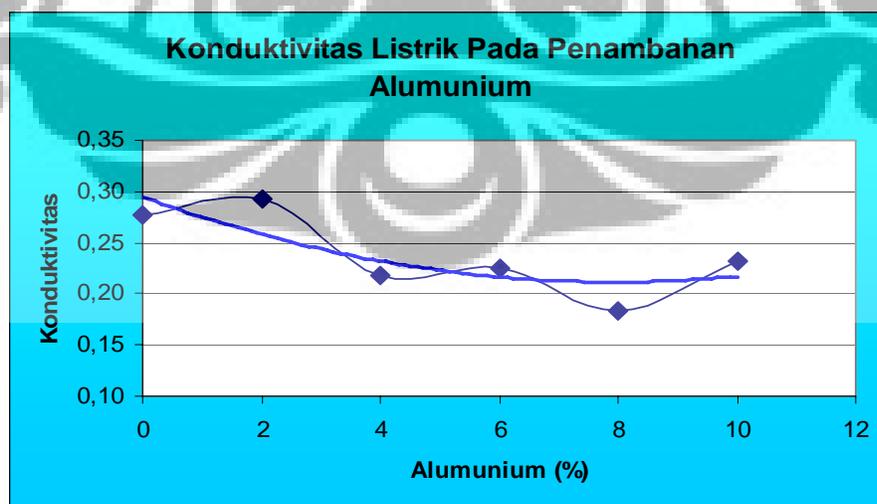
Gambar 4.17 Densitas komposit pengaruh penambahan Alumunium.

Penurunan densitas komposit disebabkan oleh peningkatan porositas komposit seperti telah dibahas pada bagian 4.3.2 diatas. Penambahan serbuk Alumunium yang memiliki densitas 2,7 gr/cm^3 dalam bentuk padat seharusnya menaikkan densitas komposit. Tetapi peningkatan porositas yang besar seperti ditunjukkan oleh gambar 4.16 menyebabkan denitasnya menjadi menurun. Banyaknya *void* yang tercipta bisa meningkatkan volume komposit, yang dengan massa yang tetap membuat densitas komposit menjadi turun.

4.3.4. Pengujian Konduktivitas Listrik.

Hasil pengujian konduktivitas listrik pada komposit akibat pengaruh penambahan Alumunium diperlihatkan pada Gambar 4.18. Besarnya konduktivitas listrik pada penambahan karbon black terlihat naik turun dengan kecenderungan semakin turun setelah penambahan 2 wt% Alumunium. Pada penambahan Alumunium 2 wt% (komposit E2-A), konduktivitasnya naik sedikit dari 0,28 S/cm menjadi 0,29 S/cm untuk kemudian turun hingga 0,23 S/cm pada 10 wt% Alumunium. Alumunium murni yang tidak teroksidasi merupakan penghantar listrik yang baik dengan perbandingan nilai mencapai 59 dibandingkan 100 milik tembaga pada suhu 20 °C [38].

Penyebab penurunan ini bisa disebabkan oleh 2 hal. Pertama, porositas komposit yang semakin meningkat dengan penambahan Alumunium seperti telah dibahas pada bagian 4.3.2 di atas. Dan kedua, kemungkinan serbuk Alumunium menjadi teroksidasi pada permukaannya sehingga resistansinya menjadi lebih besar. Dalam pembuatannya komposit ini sudah diusahakan untuk melindungi Alumunium dengan resin pada saat pencampuran. Tetapi dengan perlakuan pencampuran dan pencetakan menggunakan perlakuan panas, Alumunium dapat teroksidasi menjadi Alumina.



Gambar 4.18 Konduktivitas listrik komposit pengaruh penambahan Alumunium.

4.3.5. Pengujian Kuat Lentur.

Gambar 4.19 memperlihatkan hasil pengujian kuat lentur pada komposit akibat penambahan serbuk Alumunium. Pada gambar terlihat kekutan lentur naik menjadi 22,72 MPa setelah penambahan Alumunium 2 wt% (spesimen 2E-A). Kemudian kekuatan lentur kembali turun menjadi 12,36 MPa setelah penambahan 10 wt% Alumunium.

Penurunan kekuatan lentur ini sangat dipengaruhi oleh dua hal: porositas komposit dan pembasahan epoxy resin yang kurang. Penambahan Alumunium mengakibatkan porositas yang semakin besar. Dengan semakin banyaknya pori, maka semakin berkurang kekuatan komposit. Selain porositas, jumlah Alumunium yang semakin banyak dengan perbandingan resin yang tetap pada proses pembuatannya akan mengurangi kemampuan epoxy resin membassahi seluruh permukaan grafit (meningkatkan jumlah partikel yang permukaannya tidak terikat oleh resin). Ketika terjadi penekanan, bagian yang *porous* dan yang tidak terikat resin menjadi titik lemah komposit sehingga mudah patah.

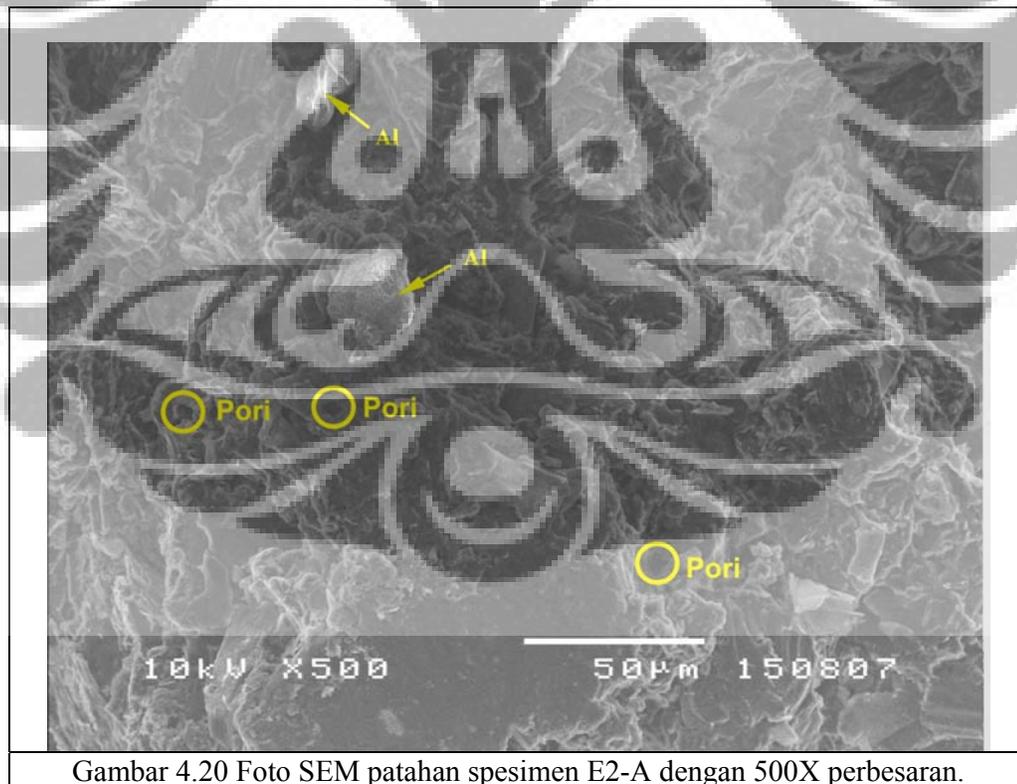


Gambar 4.19 Kuat lentur komposit pengaruh penambahan Alumunium.

4.3.6. Analisa Morfologi Permukaan (SEM).

Sama seperti pada penambahan karbon black, pengamatan morfologi permukaan spesimen akibat pengaruh Aluminium diwakili oleh satu spesimen yang dianggap terbaik. Pengamatan SEM dilakukan hanya pada spesimen E2-A, penambahan 2 wt% Aluminium. E2-A dipilih sebagai objek pengamatan karena memiliki sifat konduktivitas dan kuat lentur yang paling baik

Gambar 4.20 memperlihatkan hasil foto SEM spesimen E2-A dengan perbesaran 500X. Pada gambar terlihat bahwa ukuran partikel tersebar beragam dengan dominasi partikel halus. Partikel ini dominan diikat atau dilapisi oleh epoxy resin yang diwakili oleh warna terang yang merata pada seluruh bagian. Keberadaan partikel Aluminium juga terlihat jelas dengan warna terang dan berukuran lebih besar, sekitar 30 μm , seperti ditunjukkan pada gambar.

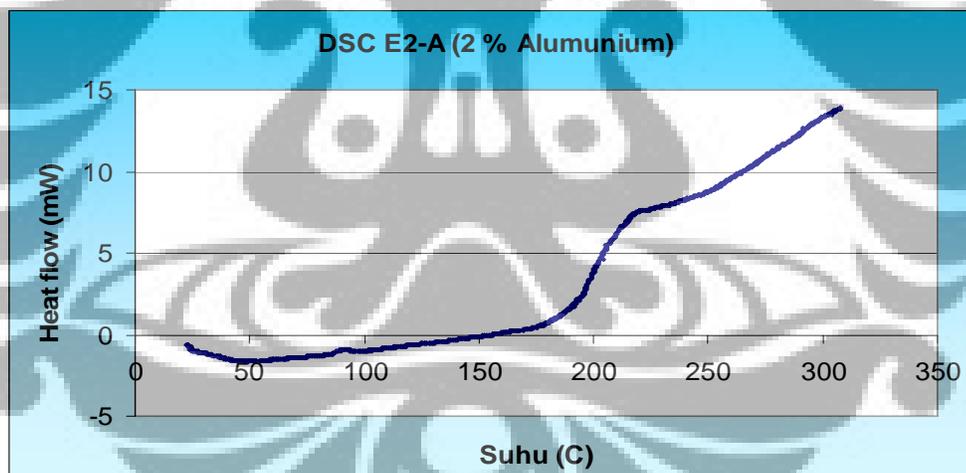


Gambar 4.20 Foto SEM patahan spesimen E2-A dengan 500X perbesaran.

Walaupun terlihat struktur keseluruhan permukaan sangat rapat, tetapi terlihat juga adanya beberapa pori berupa lingkaran hitam pada bagian ini. Hal ini sesuai dengan pembahasan 4.3.2 yang menjelaskan tentang peningkatan porositas karena penambahan Alumunium. Pada gambar juga terlihat adanya permukaan grafit terutama yang berukuran partikel lebih besar yang permukaannya tidak tertutupi lapisan resin. Hal ini bisa disebabkan oleh kurangnya rekatan resin dan atau resinnya lepas pada saat adanya gaya tekan pada saat pengujian.

4.3.7. Pengujian Sifat Panas (DSC).

Pengujian DSC juga dilakukan untuk melihat ketahanan komposit terhadap pengaruh panas pada penambahan Alumunium. Pengujian sifat thermal dilakukan dari suhu ruang hingga 300 °C terhadap spesimen E2-A karena sifatnya yang lebih unggul dibandingkan dengan komposisi lainnya.



Gambar 4. 21 DSC spesimen E2-A, 2% penambahan Alumunium.

Hasil pengujian DSC terhadap spesimen E2-A diperlihatkan dalam grafik pada Gambar 4.21. Pada gambar ini terlihat bahwa penyerapan kalor (endotermik) dari suhu ruang 23 °C hingga 156 °C. Selanjutnya spesimen mulai transisi menuju eksotermik dengan melepaskan sedikit kalor hingga skitar 180 °C dan melepaskan lebih banyak kalor setelahnya. Dari proses ini, dapat disimpulkan bahwa hingga suhu 160 °C spesimen masih berada dalam kondisi keras dan cukup stabil.

transisi (T_g) dari keras menuju lunaknya berada diantara 190-220 °C. Dengan hasil ini, komposit E2-A layak digunakan untuk pelat bipolar dengan ketahanan terhadap pemanasan hingga sekitar 180 °C.

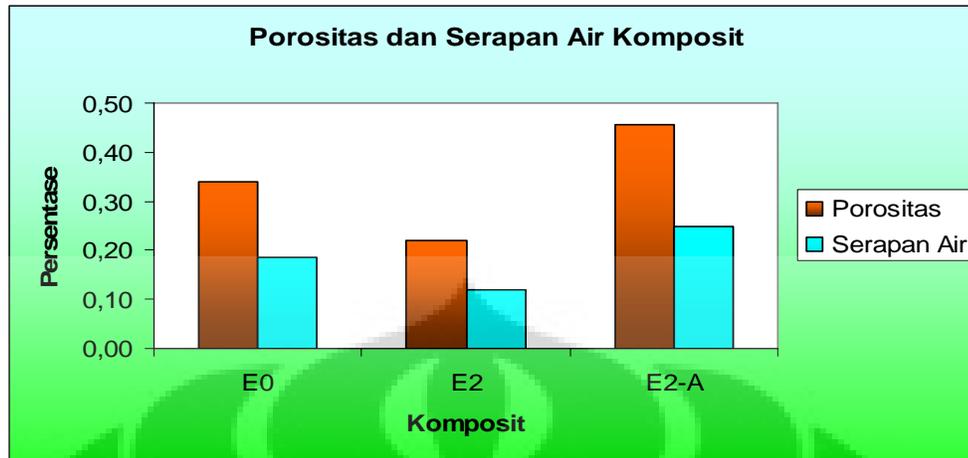
4.4. Perbandingan Sifat Komposit Terbaik.

Dari ketiga proses yang telah dibahas di atas, diambil komposit-komposit yang dianggap terbaik, yaitu E0 (perbandingan 80% grafit dan 20% epoxy resin) dari hasil tahap pertama, E2 (penambahan 10 wt % karbon black) dari tahap kedua, dan E2-A (penambahan 2 wt% Alumunium) dari tahap ketiga untuk dibandingkan.

4.4.1. Porositas dan Serapan Air.

Gambar 4.22 memperlihatkan perbandingan porositas dan serapan air pada komposit E0, E2, dan E2-A. Penambahan 10 wt% karbon black menurunkan porositas dan serapan air. Porositas menurun dari 0,339 % menjadi 0,220 % dan serapan air dari 0,186 % menjadi 0,118 %. Dengan penambahan 2% Alumunium pada komposit E2-A, terjadi peningkatan porositas dan serapan air. Porositas dan serapan airnya menjadi 0,455% dan 0,247%, terjadi peningkatan sebesar 106,82 %. Penambahan serbuk Alumunium yang partikelnya berukuran lebih besar daripada grafit dan karbon black meningkat jumlah pori dalam komposit, porositas meningkat dan jumlah air yang bisa terserap pun juga meningkat.

Komposit pelat bipolar yang baik tidak boleh *porous* karena pelat ini harus berfungsi sebagai saluran gas yang memisahkan dua jenis gas yang berbeda (H_2 dan O_2). Dengan besar nilai porositas dan serapan air yang lebih kecil dari 0,5 %, ketiga komposit ini cukup baik sebagai pelat bipolar PEMFC yang mensyaratkan tidak terjadi kebocoran gas dan air pada salurannya.

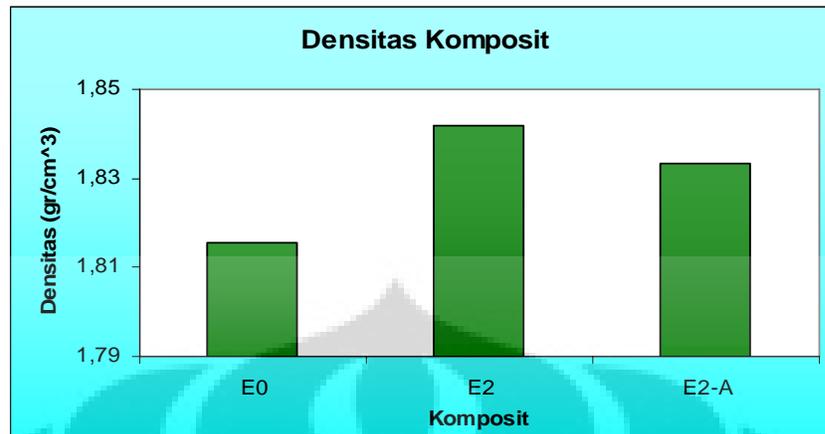


Gambar 4.22 Perbandingan porositas dan serapan air komposit terbaik.

4.4.2. Densitas.

Gambar 4.23 memperlihatkan perbandingan densitas komposit yang terbaik; E0, E2, dan E2-A. Terlihat densitas E0 paling kecil, $1,816 \text{ gr/cm}^3$ dan E2 yang paling besar, $1,842 \text{ gr/cm}^3$. Peningkatan densitas ini disebabkan oleh densitas karbon black teknis yang digunakan lebih besar dari pada grafit dan porositas komposit yang lebih kecil (gambar 4.22). Densitas E2-A berada sedikit lebih rendah dari E2 ($1,833 \text{ gr/cm}^3$) karena adanya penambahan porositas yang cukup besar akibat keberadaan partikel Alumunium yang berukuran relatif lebih besar dari pada grafit dan karbon black, seperti diperlihatkan oleh gambar 4.22.

Dari hasil ini, ketiga komposit densitasnya jauh lebih kecil dari syarat maksimum sebagai pelat bipolar yang baik, yaitu lebih kecil dari 5 gr/cm^3 , sehingga ketiga komposit ini sangat baik untuk digunakan sebagai pelat bipolar PEMFC karena ringan ($< 1,85 \text{ gr/cm}^3$). Aplikasi *fuel cell* jenis PEMFC untuk keperluan yang ringkas/*portable* dan transportasi menuntut *stack fuel cell* yang seringan mungkin.

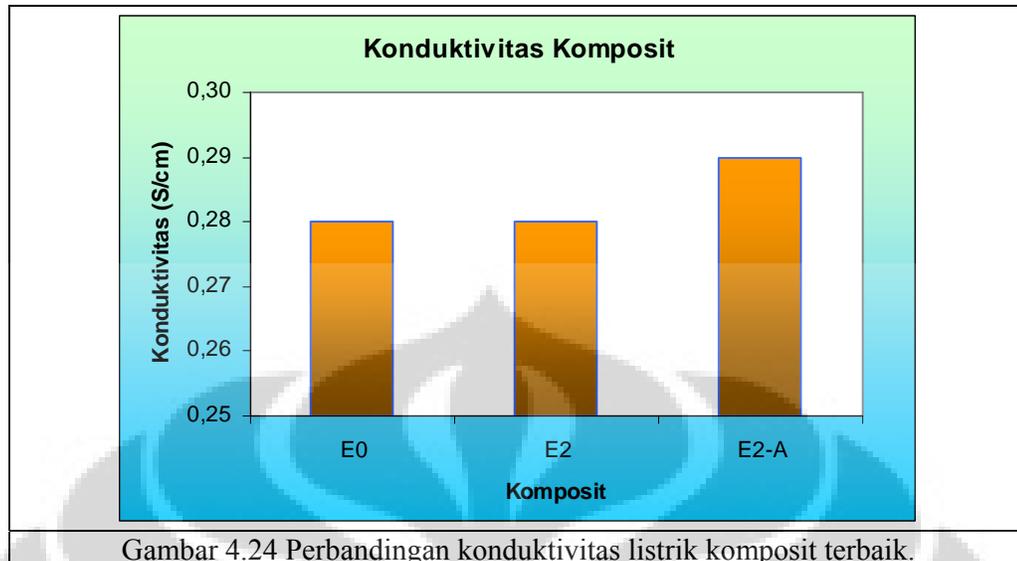


Gambar 4.23 Perbandingan densitas komposit terbaik.

4.4.3. Konduktivitas Listrik.

Perbandingan nilai konduktivitas listrik untuk ketiga komposit terbaik ditunjukkan pada Gambar 4.24 berikut. Konduktivitas listrik pada komposit dasar dengan 80 wt% grafit sebesar 0,28 S/cm. Dengan penambahan 10% karbon black, konduktivitasnya tetap sama yaitu 0,28 S/cm. Dengan penambahan 2% Alumunium, konduktivitasnya sedikit naik menjadi 0,29 S/cm. Peranan Alumunium dalam jumlah ini cukup baik, Alumunium bisa terlapsi oleh resin sehingga mengurangi oksidasi akibat proses pemanasan pada saat pembuatan. Alumunium bisa membantu daya hantar listrik komposit menjadi lebih baik. Tetapi dengan porositas yang meningkat seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.22, konduktivitas listriknya hanya meningkat sedikit, yakni sebesar 0,28 %.

Ketiga komposit terbaik dari tiga proses ini memiliki nilai konduktivitas yang masih sangat rendah dibandingkan yang disyaratkan sebagai pelat bipolar yang baik yaitu >100 S/cm. Sehingga masih diperlukan upaya lebih lanjut untuk meningkatkan konduktivitasnya agar dapat diaplikasikan pada *fuel cell* jenis PEMFC.

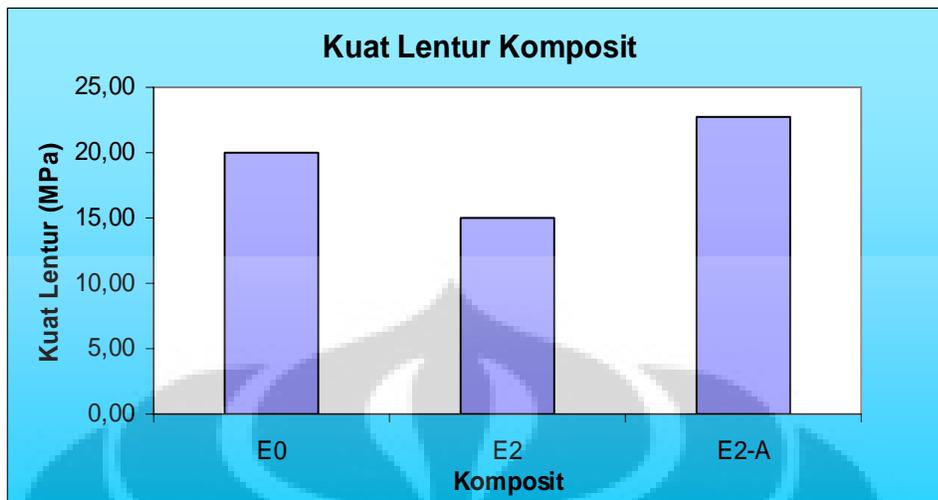


Gambar 4.24 Perbandingan konduktivitas listrik komposit terbaik.

4.4.4. Kuat Lentur.

Gambar 4.25 menunjukkan perbandingan kekuatan lentur tiga komposit. Dengan penambahan 10 wt% karbon black teknis pada komposit E2, kekuatan lentur komposit menjadi menurun dari 19,97 MPa menjadi 15,02 MPa. Sifat karbon black yang *amorfous* melemahkan kekuatan komposit. Dengan penambahan Alumunium sebanyak 2 wt%, membantu kekuatan komposit. Alumunium seperti logam lainnya memiliki kekuatan lentur yang jauh lebih besar dibandingkan grafit dan karbon black. Dengan 2 wt% Alumunium kekuatan lenturnya naik menjadi 22,75 MPa, atau naik sebesar 51,46 %. Kekuatan lentur juga dipengaruhi oleh porositas komposit (porositas diperlihatkan pada Gambar 4.22), porositas yang tinggi menurunkan kekuatan komposit.

Syarat minimum kuat lentur untuk pelat bipolar PEMFC adalah 25 MPa. Ketiga hasil di atas yang paling mendekati nilai minimum ini adalah komposit E2-A, sebesar 22,75 MPa. Tetapi masih diperlukan usaha lanjutan untuk meningkatkan kekuatan lentur komposit ini agar dapat diaplikasikan sebagai pelat bipolar pada *fuel cell* jenis PEMFC.



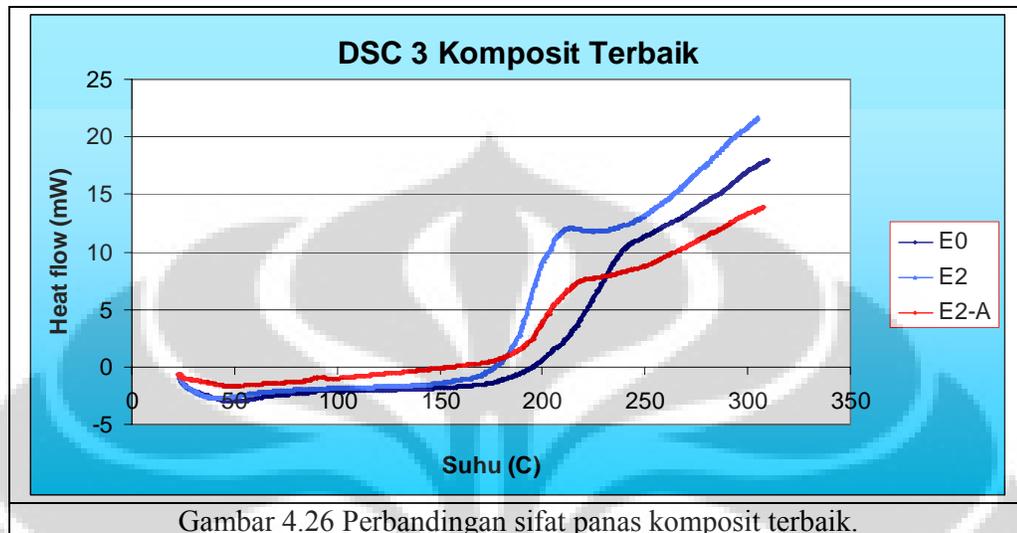
Gambar 4.25 Perbandingan kuat lentur komposit terbaik.

4.4.5. Sifat Panas.

Perbandingan sifat panas tiga komposit terbaik ditunjukkan pada Gambar 4.26. Dengan penambahan karbon black dan kemudian penambahan Alumunium, suhu balik dari kondisi endotermik menuju eksotermik semakin rendah. Mula-mula pada suhu 198 °C pada E0, turun ke 178 °C pada E2, dan menjadi 160 °C pada E2-A. Bagian endotermik ini menunjukkan bahwa komposit masih stabil dan belum melunak sedangkan bagian eksotermik terutama di atas 200 °C menunjukkan komposit mulai melewati titik transisi gelasnyanya dan menjadi lunak. Penurunan suhu transisi ini disebabkan semakin sedikitnya jumlah epoxy resin yang berada pada spesimen uji. Penambahan karbon black dan Alumunium menyebabkan epoxy resin yang melekat pada serbuk *filler* semakin tipis (sedikit), sehingga menurunkan kapasitas panas material kompositnya yang akhirnya membuat suhu transisinya turun pada grafik DSC.

Suhu operasi PEMFC umumnya berkisar antara 60-100 °C. Namun untuk meningkatkan *power density* dan efisiensi daya yang dihasilkan, suhu operasi ditingkatkan. Sehingga memerlukan pelat bipolar yang tahan pada suhu yang lebih tinggi dari 100 °C. Dari hasil DSC di atas, komposit pelat bipolar yang dibuat memiliki ketahanan panas yang baik (180 °C), sehingga layak digunakan sebagai

pelat bipolar pada PEMFC biasa dan bisa juga untuk aplikasi pada suhu yang lebih tinggi.



Gambar 4.26 Perbandingan sifat panas komposit terbaik.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Proses optimasi komposisi menghasilkan 80 wt% grafit dan 20 wt% epoxy resin sebagai komposisi optimum dengan porositas 0,339 %, densitas 1,816 gr/cm³, konduktivitas listrik 0,28 S/cm, kuat lenturnya 19,97 MPa, dan tahan panas hingga 200 °C. Penambahan karbon black teknis 10 wt% membuat komposit menjadi semakin padat hingga menurunkan porositasnya, tetapi penambahan karbon black juga menurunkan konduktivitas listrik dan kekuatan lentur karena karbon black lebih bersifat *amorfous* dibandingkan grafit yang kristalin. Peningkatan porositas komposit membuat konduktivitas listrik dan kekuatan lentur komposit menjadi menurun. Penambahan 2 wt% Alumunium menghasilkan komposit terbaik dengan densitas 1,833 gr/cm³, porositas dan serapan air < 0,5 %, konduktivitas listrik 0,29 S/cm, kuat lentur 22,75 MPa, dan stabil hingga suhu 180 °C.

5.2. Saran.

Berdasarkan hasil yang didapat dari ketiga tahapan pembuatan pelat bipolar ini, sangat penting untuk memperbaiki sifat konduktivitas listrik dan peningkatan kekuatan mekaniknya. Peranan epoxy resin sebagai penghantar listrik dan pengikat menjadi kunci, sehingga diperlukan modifikasi pada resin yang digunakan agar menjadi lebih konduktif dan lebih kuat. Penggunaan suatu aditif polimer konduktif bisa menjadi pilihan yang patut dicoba. Pemilihan aditif juga harus mempertimbangan harga keekonomiannya agar komposit pelat bipolar yang dihasilkan tetap murah.

DAFTAR PUSTAKA

1. EG & G Services, "Fuel Cell Hand Book- Seventh Edition", Parson, Inc. Science Application International Corporation, U.S. Department of Energy, 2004.
2. Nikhil H. Jalani, "Development Nanocomposite Polymer Electrolyte Membrane for Higher Temperatur PEM Fuel Cells", Dissertation for PhD in Worcester Polytechnic Institute, USA, 2006.
3. <http://www.fuelcelltoday.com>
4. <http://www.fuelcell.org>.
5. C. Bernay, M. Marchand, M. Cassir, "Prospect of different fuel cell technologies for vehicle application", Journal of Power Sources 108, pp 139-152, 2002.
6. Steven G. Chalk, James F. Miller, Fred W. Wagner, "Challenges for fuel cells in transport applications", Journal of Power Sources 86, pp 40-51, 2000.
7. Allen Hermann, Tapas Chaudhuri, Priscila Spagnol, "Bipolar plates for PEM fuel cells: A review", International Journal of Hydrogen Energy 30, pp 1297-1302, 2005.
8. Xiangguo Li, Imran Sabir, "Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs", International Journal of Hydrogen Energy 30, pp 359-371, 2005.
9. Joyce S. Cooper, "Design analysis of PEMFC bipolar plates considering stack manufacturing and environment impact", Journal of Power Sources 129, pp 152-169, 2004.
10. J. Scholta, B. Rohland, V. Trapp, U. Focken, "Investigations, on novel low-cost graphite composite bipolar plates", Journal of Power Sources 84, pp 231-234, 1999.
11. Haruki Tsuchiya, Osamu Kobayashi, "Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve", International Journal of Hydrogen Energy 29, pp 985-990, 2004.
12. <http://www.balard.com>

13. A. Heinzl, F. Mahlendorf, O. Niemzig, C. Kreuz, "Injection moulded low cost bipolar plates for PEM fuel cells", *Journal of Power Sources* 131, pp 35-40, 2004.
14. Viral Mehta, Joyce Smith Cooper, "Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing", *Journal of Power Sources* 114, pp 32-53, 2003.
15. E. Middelma, W. Kout, B. Vogelaar, "Bipolar plate for PEM fuel cells", *Journal of Power Sources* 118, pp 44-46, 2003.
16. Vaibhav V. Nikam, Ramana G. Reddy, "Corrugated bipolar sheets as fuel distributors in PEMFC", *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006 (article in press).
17. Richard Blunk, Mahmoud Hassan Abd Elhamid, Daniel Lisi, Youssef Mikhail, "Polymeric composite bipolar plates for vehicle applications", *Journal of Power Sources*, 2005 (article in press).
18. Zhang Jie, Zou Yan-wen, He Jun, "Influence of graphite particle size and its shape on performance of carbon composite bipolar plate", *Journal of Zhejiang University SCIENCE* 6A (10), pp 1080-1083, 2005.
19. Hsu-Chiang Kuan, Chen-Chi M. Ma., Ke Hong Chen, Shih-Ming Chen, "Preparation, electrical, mechanical and thermal properties of composites bipolar plate for a fuel cell", *Journal of Power Sources* 134, pp 7-17, 2004.
20. M.H. Oh, Y.S. Yoon, S.G. Park, "The electrical and physical properties of alternative material bipolar plate for PEM fuel cell system", *Electrochimica Acta* 50, pp 777-780, 2004.
21. E. A. Cho, U.-S. Jeon, H.Y. Ha, S.-A. Hong, I.-H. Oh, "Characteristics of composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells", *Journal of Power Sources* 125, pp 178-182, 2004.
22. A. Müller, P. Kauranen, A. von Ganski, B. Hell, "Injection moulding of graphite composite bipolar plate", *Journal of Power Sources* 154, pp 467-471, 2006.
23. S.I.Heo et al., "Development of preform moulding technique using expanded graphite for proton exchange membrane fuel cell bipolar plates", *Journal of Power Sources* 171 (2007) 396-404.

24. A.Pozio et al., "Bipolar Plate materials for PEMFCs: A conductivity and stability study", *Journal of Power Sources* 179 (2008) 631-639.
25. I.U.Hwang et al., "Bipolar plate made of carbon fiber epoxy composite for polymer electrolyte membrane fuel cells", *Journal of Power Sources* 184 (2008) 90-94.
26. S.H.Liao et al, "Preparation and properties of carbon nanotube/polypropylene nanocomposite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells", *Journal of Power Sources* 185 (2008) 1225-1232.
27. Renanto Prahastio Pratama, "Pembuatan dan karakterisasi pelat bipolar grafit dengan aditif tembaga (II) asetat monohidrat", Skripsi Departemen Metalurgi dan Material – FTUI, 2009.
28. Ihsan Husaeni, "Penambahan reinforment MnO_2 pada pembuatan carbon composite bipolar plate dengan bahan dasar grafit electric arc furnace", Skripsi Departemen Metalurgi dan Material – FTUI, 2009.
29. William D. Callister. Jr, "Material Science and Engineering An Intorduction", Seventh Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2007.
30. Anne Zulfia, *Diktat Kuliah Komposit Lanjut MMM8210852*, Departemen Metalurgi dan Material – FTUI, 2009.
31. <http://imagisco.com>
32. American Standards for Testing Material International, ASTM D792-00, Density and Specific Gravity (relative Density) of Plastics by Displacement.
33. American Standards for Testing Material International, ASTM C20-00, Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Bricks and Shapes by Boiling Water.
34. American Standards for Testing Material International, ASTM D790-00, Standard Test Methods for Flexural Properties of Plastics.
35. <http://images.google.co.id>.
36. Joko Triyono, Materi ajar mata kuliah Lab Lanjut, 2008.
37. http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_black
38. <http://www.wisetool.com/designation/cond.htm>

Lampiran 1. Komposisi Pembuatan Pelat Bipolar.

A. Optimasi Komposisi.

| SAMPEL | | FILLER (Grafit) | | BINDER (Resin) | | MASSA TOTAL (gr) |
|--------|--------------|-----------------|-------|----------------|---------------|------------------|
| Kode | Perbandingan | % | (gr) | Epoxy (gr) | Hardener (gr) | |
| A0 | 6 : 4 | 60 | 123 | 41 | 41 | 205 |
| B0 | 6,5 : 3,5 | 65 | 130 | 35 | 35 | 200 |
| C0 | 7 : 3 | 70 | 133 | 28,5 | 28,5 | 190 |
| D0 | 7,5 : 2,5 | 75 | 142,5 | 23,75 | 23,75 | 190 |
| E0 | 8 : 2 | 80 | 152 | 19 | 19 | 190 |
| F0 | 8,5 : 1,5 | 85 | 161 | 14,25 | 14,25 | 190 |
| G0 | 9 : 1 | 90 | 171 | 9,5 | 9,5 | 190 |

B. Penambahan Karbon Black.

| SAMPEL | | FILLER (80 %) | | BINDER (20 %) | | MASSA TOTAL (gr) |
|--------|-------------------------|---------------|------------------|---------------|---------------|------------------|
| Kode | Penambahan Karbon Black | Grafit (gr) | Karbon Black(gr) | Epoxy (gr) | Hardener (gr) | |
| E0 | 0 % | 152 | 0 | 19 | 19 | 190 |
| E1 | 5 % | 144,4 | 7,6 | 19 | 19 | 190 |
| E2 | 10 % | 140,4 | 15,6 | 19,5 | 19,5 | 195 |
| E3 | 15 % | 136 | 24 | 20 | 20 | 200 |
| E4 | 20 % | 131,2 | 32,8 | 20,5 | 20,5 | 205 |

C. Penambahan Alumunium.

| SAMPEL | | FILLER (80 %) | | | BINDER (20 %) | | MASSA TOTAL (gr) |
|--------|----------------------|---------------|----------------|------------------|---------------|---------------|------------------|
| Kode | Penambahan Alumunium | Grafit (gr) | Alumunium (gr) | Karbon Black(gr) | Epoxy (gr) | Hardener (gr) | |
| E2-A | 2 % | 140,8 | 3,2 | 16 | 20 | 20 | 200 |
| E2-B | 4 % | 141,04 | 6,56 | 16,4 | 20,5 | 20,5 | 205 |
| E2-C | 6 % | 141,12 | 10,08 | 16,8 | 21 | 21 | 210 |
| E2-D | 8 % | 141,04 | 13,76 | 17,2 | 21,5 | 21,5 | 215 |
| E2-E | 10 % | 140,8 | 17,6 | 17,6 | 22 | 22 | 220 |

Lampiran 2. Hasil Pengujian Densitas.

Metoda: ASTM D 792

A. Optimasi Komposisi.

A0 (6 : 4)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 2,112 | 0,762 | 1,559 | 1,545 |
| II | 2,300 | 0,815 | 1,544 | |
| III | 2,180 | 0,772 | 1,543 | |
| IV | 1,803 | 0,642 | 1,548 | |
| V | 2,145 | 0,749 | 1,532 | |

B0 (6,5 : 3,5)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 2,778 | 1,050 | 1,602 | 1,618 |
| II | 2,675 | 1,029 | 1,620 | |
| III | 2,388 | 0,927 | 1,629 | |
| IV | 2,932 | 1,129 | 1,621 | |
| V | 2,487 | 0,953 | 1,616 | |

C0 (7 : 3)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 2,847 | 1,158 | 1,680 | 1,672 |
| II | 2,770 | 1,120 | 1,673 | |
| III | 2,354 | 0,945 | 1,665 | |
| IV | 2,547 | 1,029 | 1,672 | |
| V | 2,842 | 1,144 | 1,668 | |

D0 (7,5 : 2,5)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 3,231 | 1,396 | 1,755 | 1,755 |
| II | 2,916 | 1,258 | 1,753 | |
| III | 3,338 | 1,444 | 1,757 | |
| IV | 3,191 | 1,377 | 1,753 | |
| V | 3,060 | 1,325 | 1,758 | |

E0 (8 : 2)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 2,505 | 1,128 | 1,813 | 1,816 |
| II | 2,930 | 1,322 | 1,816 | |
| III | 3,275 | 1,476 | 1,815 | |
| IV | 3,457 | 1,558 | 1,815 | |
| V | 3,119 | 1,410 | 1,819 | |

F0 (8,5 : 1,5)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 2,565 | 1,134 | 1,787 | 1,782 |
| II | 2,185 | 0,954 | 1,769 | |
| III | 2,553 | 1,131 | 1,790 | |
| IV | 2,792 | 1,235 | 1,787 | |
| V | 2,952 | 1,296 | 1,777 | |

G0 (9 : 1)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 2,470 | 1,149 | 1,864 | 1,835 |
| II | 2,224 | 0,976 | 1,776 | |
| III | 2,982 | 1,363 | 1,836 | |
| IV | 2,741 | 1,260 | 1,845 | |
| V | 3,782 | 1,748 | 1,853 | |

B. Penambahan Karbon Black.**E1
(5%)**

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 3,358 | 1,513 | 1,812 | 1,814 |
| II | 3,268 | 1,469 | 1,808 | |
| III | 3,384 | 1,523 | 1,811 | |
| IV | 3,121 | 1,415 | 1,822 | |
| V | 3,079 | 1,393 | 1,819 | |

E2 (10%)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 3,223 | 1,487 | 1,849 | 1,842 |
| II | 3,045 | 1,397 | 1,840 | |
| III | 3,263 | 1,499 | 1,842 | |
| IV | 3,361 | 1,540 | 1,838 | |
| V | 3,166 | 1,454 | 1,841 | |

E3 (15%)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 2,910 | 1,352 | 1,860 | 1,850 |
| II | 2,707 | 1,248 | 1,847 | |
| III | 2,581 | 1,189 | 1,846 | |
| IV | 2,923 | 1,352 | 1,853 | |
| V | 3,116 | 1,432 | 1,843 | |

E4 (20%)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 3,378 | 1,604 | 1,897 | 1,899 |
| II | 2,928 | 1,385 | 1,889 | |
| III | 3,073 | 1,482 | 1,923 | |
| IV | 3,210 | 1,516 | 1,887 | |
| V | 2,565 | 1,220 | 1,898 | |

C. Penambahan Alumunium.**E2 - A (2% Al)**

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 3,463 | 1,575 | 1,827 | 1,833 |
| II | 3,563 | 1,615 | 1,822 | |
| III | 3,167 | 1,461 | 1,849 | |
| IV | 3,753 | 1,717 | 1,836 | |
| V | 2,939 | 1,341 | 1,832 | |

E2 - B (4% Al)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 3,004 | 1,355 | 1,815 | 1,816 |
| II | 3,490 | 1,582 | 1,822 | |
| III | 3,492 | 1,577 | 1,817 | |
| IV | 3,403 | 1,531 | 1,811 | |
| V | 3,109 | 1,401 | 1,814 | |

E2 - C (6% Al)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 3,834 | 1,750 | 1,833 | 1,836 |
| II | 3,561 | 1,637 | 1,844 | |
| III | 2,909 | 1,329 | 1,834 | |
| IV | 3,258 | 1,488 | 1,834 | |
| V | 2,485 | 1,135 | 1,834 | |

E2 - D (8% Al)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 3,771 | 1,707 | 1,820 | 1,811 |
| II | 3,301 | 1,488 | 1,814 | |
| III | 3,159 | 1,421 | 1,811 | |
| IV | 3,248 | 1,457 | 1,807 | |
| V | 3,247 | 1,453 | 1,803 | |

E2 - E (10% Al)

| Sampel | A (gr) | B (gr) | D (gr/cm ³) | Densitas rata-rata (gr/cm ³) |
|--------|--------|--------|-------------------------|--|
| I | 3,603 | 1,621 | 1,811 | 1,825 |
| II | 3,142 | 1,424 | 1,822 | |
| III | 3,300 | 1,493 | 1,820 | |
| IV | 3,366 | 1,538 | 1,834 | |
| V | 2,834 | 1,299 | 1,839 | |

Lampiran 3. Hasil Pengujian Porositas dan Serapan Air.

Metoda: ASTM C 20

A. Optimasi Komposisi.

A0 (6 : 4)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|--------|--------|--------|--------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| I | 2,166 | 0,780 | 2,175 | 0,631 | 0,638 | 0,406 | 0,410 |
| II | 1,789 | 0,647 | 1,798 | 0,730 | | 0,470 | |
| III | 2,130 | 0,774 | 2,138 | 0,609 | | 0,390 | |
| IV | 2,285 | 0,822 | 2,293 | 0,578 | | 0,372 | |
| V | 2,097 | 0,751 | 2,106 | 0,642 | | 0,415 | |

B0 (6,5 : 3,5)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|--------|--------|--------|--------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| I | 2,384 | 0,933 | 2,395 | 0,793 | 0,629 | 0,487 | 0,387 |
| II | 2,476 | 0,958 | 2,484 | 0,511 | | 0,315 | |
| III | 2,773 | 1,075 | 2,783 | 0,597 | | 0,368 | |
| IV | 2,668 | 1,035 | 2,678 | 0,621 | | 0,382 | |
| V | 2,924 | 1,135 | 2,935 | 0,622 | | 0,383 | |

C0 (7 : 3)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|--|----------------------------|--|
| I | 2,762 | 1,123 | 2,771 | 0,522 | 0,524 | 0,311 | 0,312 |
| II | 2,538 | 1,038 | 2,546 | 0,517 | | 0,307 | |
| III | 2,833 | 1,147 | 2,842 | 0,502 | | 0,300 | |
| IV | 2,346 | 0,955 | 2,354 | 0,593 | | 0,354 | |
| V | 2,838 | 1,159 | 2,846 | 0,486 | | 0,289 | |

D0 (7,5 : 2,5)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|--|----------------------------|--|
| I | 3,226 | 1,399 | 3,233 | 0,387 | 0,398 | 0,220 | 0,227 |
| II | 3,333 | 1,441 | 3,341 | 0,400 | | 0,228 | |
| III | 2,911 | 1,260 | 2,917 | 0,410 | | 0,234 | |
| IV | 3,185 | 1,376 | 3,192 | 0,385 | | 0,220 | |
| V | 3,057 | 1,323 | 3,064 | 0,408 | | 0,232 | |

E0 (8 : 2)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| I | 3,266 | 1,475 | 3,272 | 0,306 | 0,339 | 0,168 | 0,186 |
| II | 2,498 | 1,136 | 2,503 | 0,395 | | 0,216 | |
| III | 2,922 | 1,325 | 2,928 | 0,356 | | 0,195 | |
| IV | 3,448 | 1,557 | 3,454 | 0,306 | | 0,168 | |
| V | 3,111 | 1,409 | 3,117 | 0,334 | | 0,183 | |

F0 (8,5 : 1,5)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| I | 2,170 | 0,942 | 2,179 | 0,703 | 0,561 | 0,401 | 0,317 |
| II | 2,777 | 1,225 | 2,785 | 0,539 | | 0,303 | |
| III | 2,539 | 1,116 | 2,547 | 0,531 | | 0,299 | |
| IV | 2,934 | 1,284 | 2,942 | 0,428 | | 0,242 | |
| V | 2,550 | 1,121 | 2,559 | 0,605 | | 0,341 | |

G0 (9 : 1)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|--------|--------|--------|--------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| I | 2,214 | 1,005 | 2,273 | 4,668 | 1,949 | 2,674 | 1,090 |
| II | 3,761 | 1,756 | 3,806 | 2,185 | | 1,191 | |
| III | 2,965 | 1,360 | 2,991 | 1,612 | | 0,887 | |
| IV | 2,454 | 1,134 | 2,460 | 0,468 | | 0,253 | |
| V | 2,722 | 1,249 | 2,734 | 0,815 | | 0,445 | |

B. Penambahan Karbon Black.**E1 (5%)**

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|--------|--------|--------|--------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| I | 3,333 | 1,504 | 3,338 | 0,256 | 0,243 | 0,141 | 0,133 |
| II | 3,242 | 1,469 | 3,246 | 0,248 | | 0,136 | |
| III | 3,358 | 1,517 | 3,362 | 0,228 | | 0,125 | |
| IV | 3,095 | 1,405 | 3,099 | 0,254 | | 0,139 | |
| V | 3,057 | 1,393 | 3,061 | 0,228 | | 0,124 | |

E2 (10%)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|--|----------------------------|--|
| I | 3,199 | 1,485 | 3,203 | 0,256 | 0,220 | 0,138 | 0,118 |
| II | 3,020 | 1,400 | 3,023 | 0,234 | | 0,126 | |
| III | 3,237 | 1,498 | 3,240 | 0,207 | | 0,111 | |
| IV | 3,334 | 1,542 | 3,338 | 0,195 | | 0,105 | |
| V | 3,141 | 1,453 | 3,144 | 0,207 | | 0,111 | |

E3 (15%)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|--|----------------------------|--|
| I | 2,890 | 1,342 | 2,895 | 0,303 | 0,389 | 0,163 | 0,209 |
| II | 2,686 | 1,257 | 2,692 | 0,425 | | 0,227 | |
| III | 2,562 | 1,190 | 2,568 | 0,436 | | 0,234 | |
| IV | 2,903 | 1,346 | 2,908 | 0,352 | | 0,189 | |
| V | 3,092 | 1,437 | 3,099 | 0,427 | | 0,230 | |

E4 (20%)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| I | 3,358 | 1,602 | 3,365 | 0,408 | 0,411 | 0,214 | 0,216 |
| II | 2,911 | 1,389 | 2,917 | 0,406 | | 0,213 | |
| III | 3,056 | 1,460 | 3,063 | 0,424 | | 0,223 | |
| IV | 3,190 | 1,520 | 3,197 | 0,406 | | 0,213 | |
| V | 2,551 | 1,221 | 2,557 | 0,412 | | 0,216 | |

C. Penambahan Alumunium.

E2 - A (2% Al)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| I | 3,435 | 1,573 | 3,446 | 0,566 | 0,455 | 0,309 | 0,247 |
| II | 3,534 | 1,613 | 3,546 | 0,626 | | 0,342 | |
| III | 3,146 | 1,451 | 3,152 | 0,358 | | 0,194 | |
| IV | 3,726 | 1,710 | 3,732 | 0,316 | | 0,172 | |
| V | 2,916 | 1,348 | 2,922 | 0,407 | | 0,219 | |

E2 - B (4% Al)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|--|----------------------------|--|
| I | 2,965 | 1,339 | 2,971 | 0,398 | 0,382 | 0,219 | 0,209 |
| II | 3,451 | 1,573 | 3,458 | 0,408 | | 0,223 | |
| III | 3,450 | 1,567 | 3,457 | 0,360 | | 0,197 | |
| IV | 3,360 | 1,525 | 3,367 | 0,375 | | 0,205 | |
| V | 3,070 | 1,397 | 3,076 | 0,369 | | 0,202 | |

E2 - C (6% Al)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|--|----------------------------|--|
| I | 3,803 | 1,758 | 3,811 | 0,385 | 0,477 | 0,208 | 0,258 |
| II | 3,533 | 1,636 | 3,540 | 0,362 | | 0,195 | |
| III | 2,878 | 1,327 | 2,887 | 0,538 | | 0,292 | |
| IV | 3,226 | 1,489 | 3,237 | 0,635 | | 0,344 | |
| V | 2,460 | 1,133 | 2,466 | 0,465 | | 0,252 | |

E2 - D (8% Al)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| I | 3,716 | 1,700 | 3,729 | 0,646 | 0,770 | 0,353 | 0,421 |
| II | 3,239 | 1,478 | 3,254 | 0,828 | | 0,454 | |
| III | 3,103 | 1,416 | 3,116 | 0,753 | | 0,412 | |
| IV | 3,188 | 1,459 | 3,203 | 0,854 | | 0,467 | |
| V | 3,190 | 1,457 | 3,203 | 0,768 | | 0,420 | |

E2 - E (10% Al)

| Sampel | D (gr) | S (gr) | W (gr) | Porositas P (%) | Porositas P Rata-rata (%) | Serapan Air (%) | Serapan Air Rata-rata (%) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| I | 3,520 | 1,617 | 3,549 | 1,526 | 1,421 | 0,838 | 0,778 |
| II | 3,074 | 1,415 | 3,102 | 1,648 | | 0,904 | |
| III | 3,226 | 1,486 | 3,257 | 1,716 | | 0,942 | |
| IV | 3,313 | 1,536 | 3,333 | 1,069 | | 0,579 | |
| V | 2,791 | 1,290 | 2,809 | 1,145 | | 0,623 | |

Lampiran 4. Hasil Pengujian Kuat Lentur (*Flexural Strength*).

Metoda: ASTM D 790

A. Optimasi Komposisi.

A0 (6 : 4)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 13,00 | 4,00 | 32,00 | 14,77 | 17,09 |
| II | 64,00 | 12,50 | 4,05 | 41,60 | 19,48 | |
| III | 64,00 | 12,50 | 4,05 | 35,20 | 16,48 | |
| IV | 64,00 | 12,70 | 3,80 | 32,00 | 16,75 | |
| V | 64,00 | 11,85 | 3,70 | 30,40 | 17,99 | |

B0 (6,5 : 3,5)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 12,60 | 4,65 | 32,00 | 11,28 | 14,82 |
| II | 64,00 | 13,10 | 4,45 | 46,40 | 17,17 | |
| III | 64,00 | 13,35 | 4,35 | 36,80 | 13,98 | |
| IV | 64,00 | 13,20 | 4,25 | 49,60 | 19,97 | |
| V | 64,00 | 12,95 | 4,50 | 32,00 | 11,71 | |

C0 (7 : 3)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 13,10 | 4,90 | 46,40 | 14,16 | 14,60 |
| II | 64,00 | 12,90 | 4,65 | 41,60 | 14,32 | |
| III | 64,00 | 13,10 | 4,40 | 41,60 | 15,75 | |
| IV | 64,00 | 13,70 | 4,35 | 40,00 | 14,81 | |
| V | 64,00 | 12,90 | 4,80 | 43,20 | 13,95 | |

D0 (7,5 : 2,5)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 13,20 | 5,00 | 70,40 | 20,48 | 21,13 |
| II | 64,00 | 13,35 | 5,10 | 73,60 | 20,35 | |
| III | 64,00 | 12,60 | 4,95 | 65,60 | 20,40 | |
| IV | 64,00 | 13,10 | 4,50 | 60,80 | 22,00 | |
| V | 64,00 | 13,30 | 4,65 | 67,20 | 22,43 | |

E0 (8 : 2)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 13,10 | 4,50 | 62,40 | 22,58 | 19,97 |
| II | 64,00 | 13,40 | 4,40 | 56,00 | 20,72 | |
| III | 64,00 | 13,10 | 4,80 | 57,60 | 18,32 | |
| IV | 64,00 | 13,20 | 4,80 | 57,60 | 18,18 | |
| V | 64,00 | 13,40 | 4,60 | 59,20 | 20,04 | |

F0 (8,5 : 1,5)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 14,80 | 4,80 | 59,20 | 16,67 | 15,94 |
| II | 64,00 | 13,30 | 4,65 | 48,00 | 16,02 | |
| III | 64,00 | 13,80 | 4,15 | 36,80 | 14,86 | |
| IV | 64,00 | 12,90 | 5,05 | 54,40 | 15,87 | |
| V | 64,00 | 12,70 | 4,80 | 49,60 | 16,27 | |

G0 (9 : 1)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 13,90 | 4,65 | 67,20 | 21,46 | 22,16 |
| II | 64,00 | 13,40 | 4,15 | 56,00 | 23,29 | |
| III | 64,00 | 13,10 | 4,45 | 56,00 | 20,72 | |
| IV | 64,00 | 14,30 | 4,60 | 76,80 | 24,37 | |
| V | 64,00 | 13,85 | 4,60 | 64,00 | 20,96 | |

B. Penambahan Karbon Black.**E1
(5%)**

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 14,10 | 4,10 | 30,40 | 12,31 | 14,14 |
| II | 64,00 | 13,20 | 3,85 | 32,00 | 15,70 | |
| III | 64,00 | 13,85 | 3,80 | 32,00 | 15,36 | |
| IV | 64,00 | 12,60 | 3,50 | 19,20 | 11,94 | |
| V | 64,00 | 13,50 | 3,75 | 30,40 | 15,37 | |

E2 (10%)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 14,10 | 3,60 | 25,60 | 13,45 | 15,02 |

| | | | | | |
|------------|-------|-------|------|-------|-------|
| II | 64,00 | 12,80 | 3,60 | 30,40 | 17,59 |
| III | 64,00 | 13,65 | 3,80 | 33,60 | 16,36 |
| IV | 64,00 | 13,45 | 3,85 | 25,60 | 12,33 |
| V | 64,00 | 13,35 | 3,35 | 24,00 | 15,38 |

E3 (15%)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|------------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 12,45 | 3,80 | 17,60 | 9,40 | 12,18 |
| II | 64,00 | 13,10 | 3,55 | 17,60 | 10,23 | |
| III | 64,00 | 13,20 | 3,55 | 24,00 | 13,85 | |
| IV | 64,00 | 13,10 | 3,70 | 25,60 | 13,70 | |
| V | 64,00 | 13,35 | 3,55 | 24,00 | 13,69 | |

E4 (20%)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|------------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 12,10 | 4,15 | 35,20 | 16,22 | 13,32 |
| II | 64,00 | 13,20 | 3,95 | 25,60 | 11,93 | |
| III | 64,00 | 12,85 | 4,00 | 28,80 | 13,45 | |
| IV | 64,00 | 13,20 | 3,60 | 22,40 | 12,57 | |
| V | 64,00 | 12,50 | 3,85 | 24,00 | 12,44 | |

C. Penambahan Alumunium.

E2 - A (2% Al)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|------------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 13,80 | 4,50 | 54,40 | 18,69 | 22,72 |
| II | 64,00 | 13,30 | 4,60 | 80,00 | 27,29 | |
| III | 64,00 | 13,85 | 3,30 | 40,00 | 25,46 | |
| IV | 64,00 | 13,60 | 4,55 | 62,40 | 21,28 | |
| V | 64,00 | 13,60 | 4,65 | 64,00 | 20,89 | |

E2 - B (4% Al)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|------------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 12,95 | 4,60 | 41,60 | 14,57 | 14,10 |
| II | 64,00 | 13,35 | 5,10 | 51,20 | 14,16 | |
| III | 64,00 | 13,35 | 5,10 | 51,20 | 14,16 | |
| IV | 64,00 | 12,70 | 4,10 | 30,40 | 13,67 | |
| V | 64,00 | 13,75 | 4,90 | 48,00 | 13,96 | |

E2 - C (6% Al)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 13,50 | 5,00 | 54,40 | 15,47 | 16,80 |
| II | 64,00 | 12,80 | 4,40 | 51,20 | 19,83 | |
| III | 64,00 | 12,80 | 5,00 | 57,60 | 17,28 | |
| IV | 64,00 | 13,10 | 5,00 | 51,20 | 15,01 | |
| V | 64,00 | 13,40 | 4,50 | 46,40 | 16,42 | |

E2 - D (8% Al)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 13,40 | 4,60 | 36,80 | 12,46 | 13,09 |
| II | 64,00 | 13,55 | 5,25 | 51,20 | 13,16 | |
| III | 64,00 | 14,40 | 4,75 | 48,00 | 14,18 | |
| IV | 64,00 | 13,10 | 4,60 | 40,00 | 13,85 | |
| V | 64,00 | 13,45 | 4,40 | 32,00 | 11,80 | |

E2 - E (10% Al)

| Sampel | L (mm) | b (mm) | d (mm) | P (N) | σ_{FM} (Mpa) | σ_{FM} Rata-rata (Mpa) |
|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|-------------------------------|
| I | 64,00 | 13,30 | 4,65 | 35,20 | 11,75 | 12,36 |
| II | 64,00 | 13,50 | 4,70 | 41,60 | 13,39 | |
| III | 64,00 | 13,35 | 4,70 | 35,20 | 11,46 | |
| IV | 64,00 | 13,10 | 4,90 | 40,00 | 12,21 | |
| V | 64,00 | 13,65 | 4,65 | 40,00 | 13,01 | |

Lampiran 5. Hasil Pengujian Konduktivitas.

Metoda: Four Point Probe

A. Optimasi Komposisi.

A0 (6 : 4)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 32,20 | 0,03 | 0,03 |
| II | 45,90 | 0,02 | |
| III | 56,20 | 0,02 | |
| IV | 59,60 | 0,02 | |
| V | 22,30 | 0,04 | |

B0 (6,5 : 3,5)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 27,30 | 0,04 | 0,04 |
| II | 36,50 | 0,03 | |
| III | 23,40 | 0,04 | |
| IV | 28,30 | 0,04 | |
| V | 21,80 | 0,05 | |

C0 (7 : 3)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 9,77 | 0,10 | 0,09 |
| II | 8,93 | 0,11 | |
| III | 13,69 | 0,07 | |
| IV | 12,44 | 0,08 | |
| V | 9,36 | 0,11 | |

D0 (7,5 : 2,5)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 6,28 | 0,16 | 0,20 |
| II | 5,10 | 0,20 | |
| III | 4,88 | 0,20 | |
| IV | 5,09 | 0,20 | |
| V | 4,33 | 0,23 | |

E0 (8 : 2)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 3,22 | 0,31 | 0,28 |
| II | 2,74 | 0,36 | |
| III | 3,34 | 0,30 | |
| IV | 4,28 | 0,23 | |
| V | 5,25 | 0,19 | |

F0 (8,5 : 1,5)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 3,54 | 0,28 | 0,25 |
| II | 4,60 | 0,22 | |
| III | 4,39 | 0,23 | |
| IV | 4,03 | 0,25 | |
| V | 3,85 | 0,26 | |

G0 (9 : 1)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 4,76 | 0,21 | 0,20 |
| II | 4,45 | 0,22 | |
| III | 5,26 | 0,19 | |
| IV | 6,64 | 0,15 | |
| V | 4,38 | 0,23 | |

B. Penambahan Karbon Black.**E1 (5%)**

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 4,91 | 0,20 | 0,22 |
| II | 4,21 | 0,24 | |
| III | 4,29 | 0,23 | |
| IV | 4,61 | 0,22 | |
| V | 4,55 | 0,22 | |

E2 (10%)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 3,36 | 0,30 | 0,28 |
| II | 4,12 | 0,24 | |
| III | 4,23 | 0,24 | |
| IV | 3,58 | 0,28 | |
| V | 3,03 | 0,33 | |

E3 (15%)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 6,62 | 0,15 | 0,18 |
| II | 5,70 | 0,18 | |
| III | 4,64 | 0,22 | |
| IV | 5,22 | 0,19 | |
| V | 5,40 | 0,19 | |

E4 (20%)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 4,88 | 0,20 | 0,25 |
| II | 4,58 | 0,22 | |
| III | 3,37 | 0,30 | |
| IV | 4,06 | 0,25 | |
| V | 3,61 | 0,28 | |

C. Penambahan Alumunium.

E2 - A (2% Al)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 3,29 | 0,30 | 0,29 |
| II | 2,94 | 0,34 | |
| III | 3,26 | 0,31 | |
| IV | 4,09 | 0,24 | |
| V | 3,77 | 0,27 | |

E2 - B (4% Al)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 3,96 | 0,25 | 0,22 |
| II | 4,05 | 0,25 | |
| III | 4,79 | 0,21 | |
| IV | 5,19 | 0,19 | |
| V | 5,18 | 0,19 | |

E2 - C (6% Al)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 4,37 | 0,23 | 0,23 |
| II | 4,45 | 0,22 | |
| III | 3,57 | 0,28 | |
| IV | 4,32 | 0,23 | |
| V | 6,18 | 0,16 | |

E2 - D (8% Al)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 5,33 | 0,19 | 0,18 |
| II | 5,36 | 0,19 | |
| III | 5,44 | 0,18 | |
| IV | 6,84 | 0,15 | |
| V | 4,64 | 0,22 | |

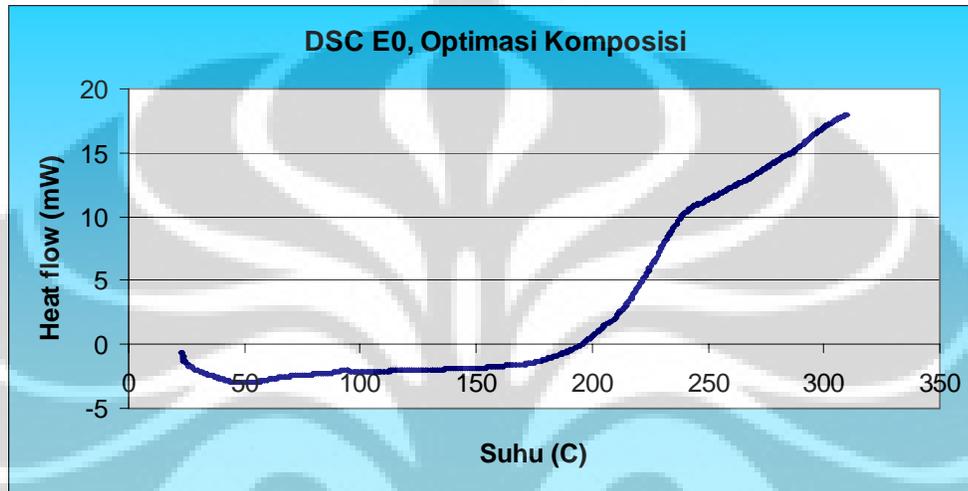
E2 - E (10% Al)

| Sampel | Resistance (Ω -cm) | Konduktivitas (S/cm) | Konduktivitas Rata-rata (S/cm) |
|--------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| I | 5,09 | 0,20 | 0,23 |
| II | 3,94 | 0,25 | |
| III | 4,04 | 0,25 | |
| IV | 4,20 | 0,24 | |
| V | 4,43 | 0,23 | |

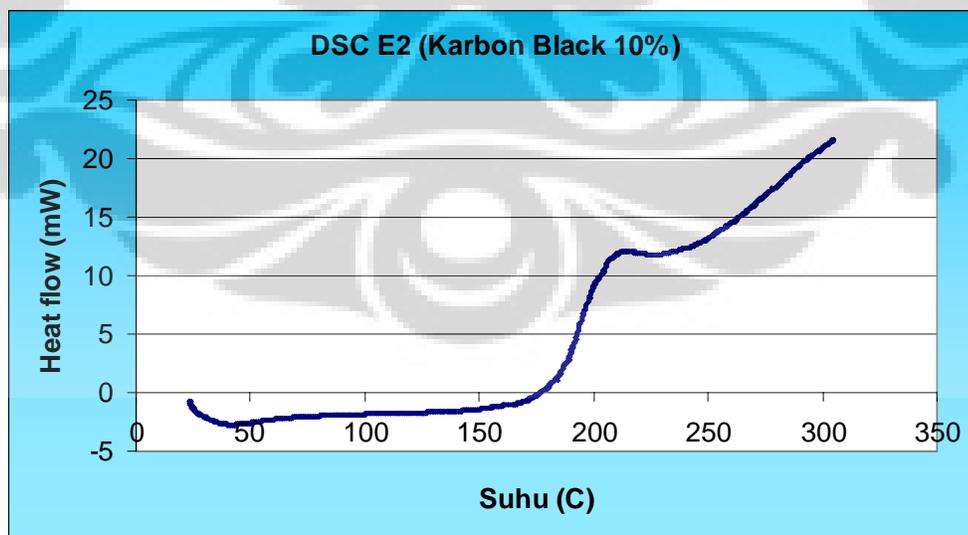
Lampiran 6. Hasil Pengujian Sifat Thermal (DSC).

Metoda: DSC/TGA

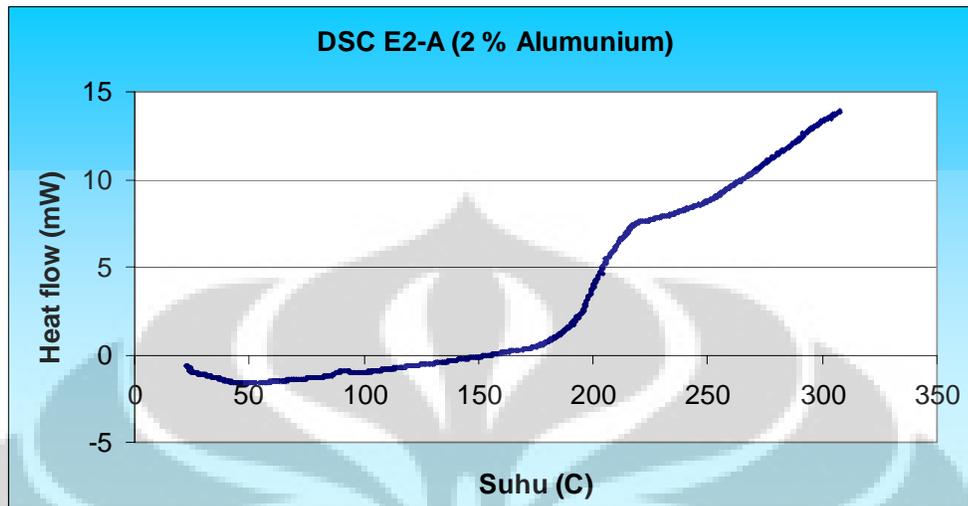
A. Optimasi Komposisi, E0.



B. Penambahan Karbon Black, E2.



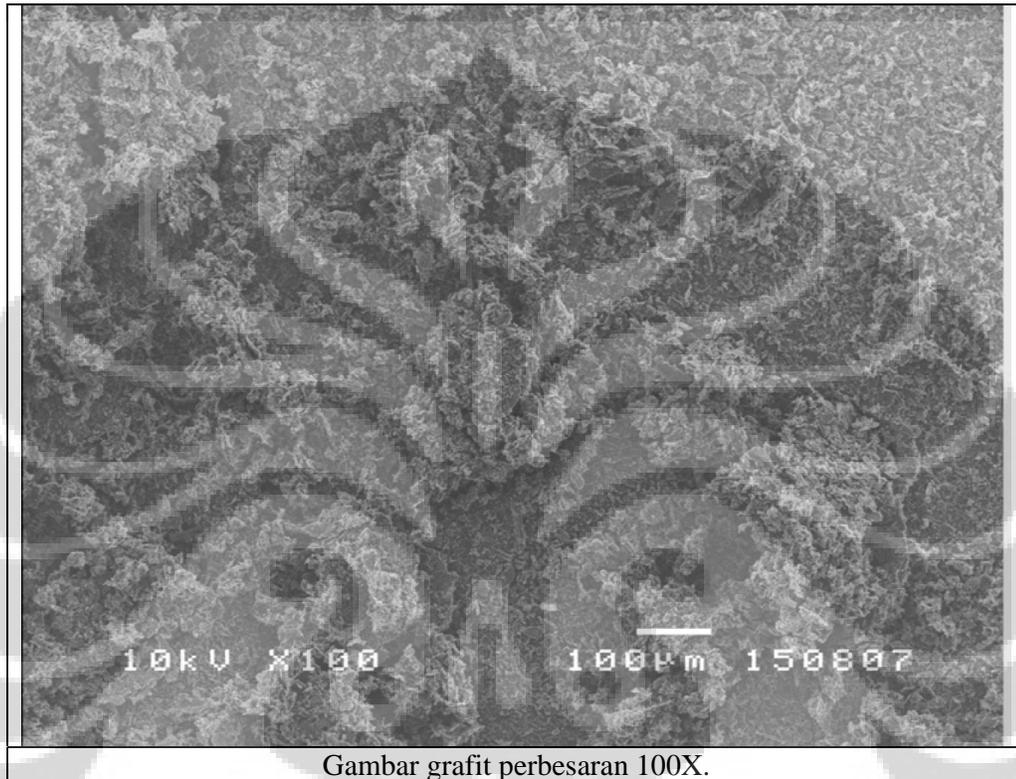
C. Penambahan Alumunium, E2-A.



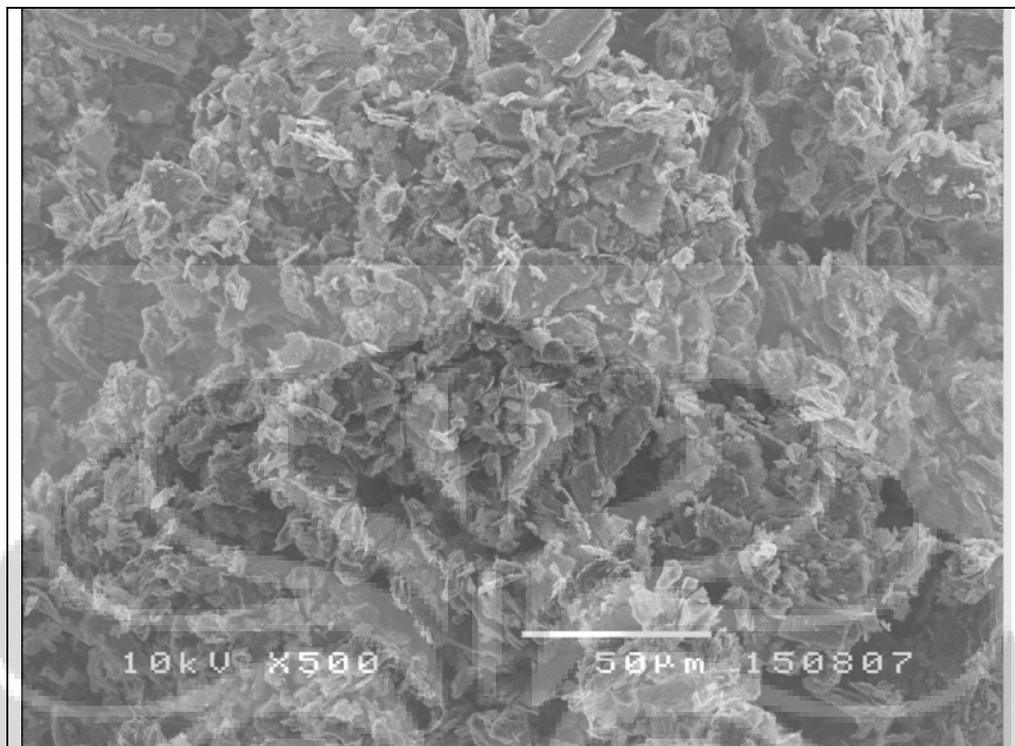
Lampiran 7. Hasil Analisis Morfologi.

Metoda: SEM

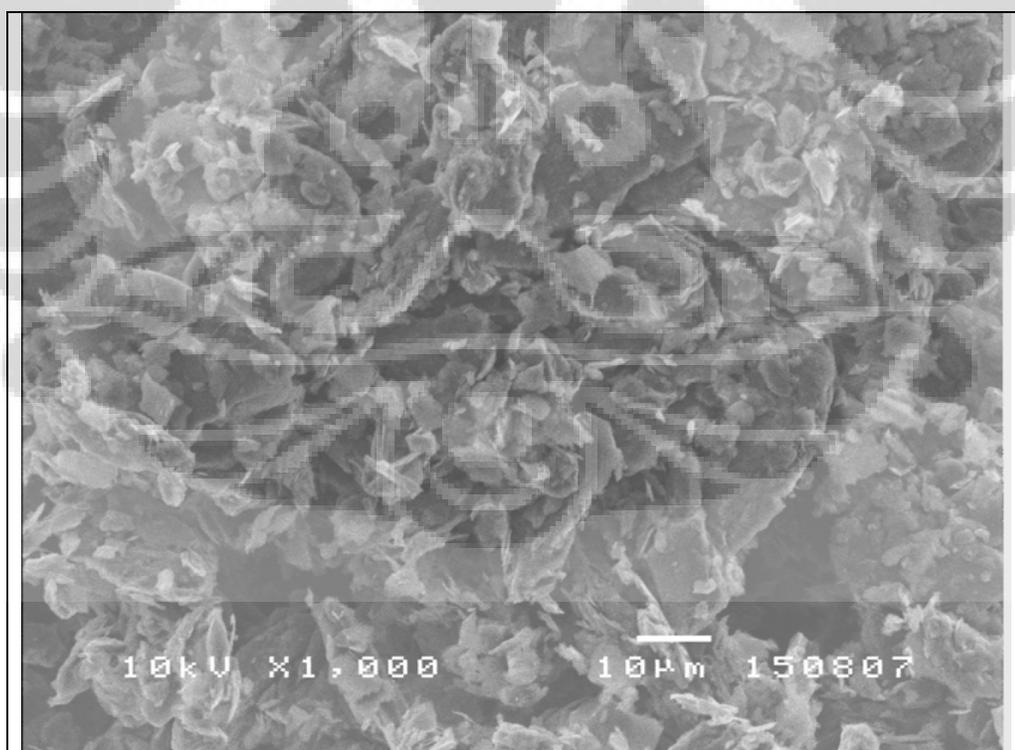
1. Grafit.



Gambar grafit perbesaran 100X.

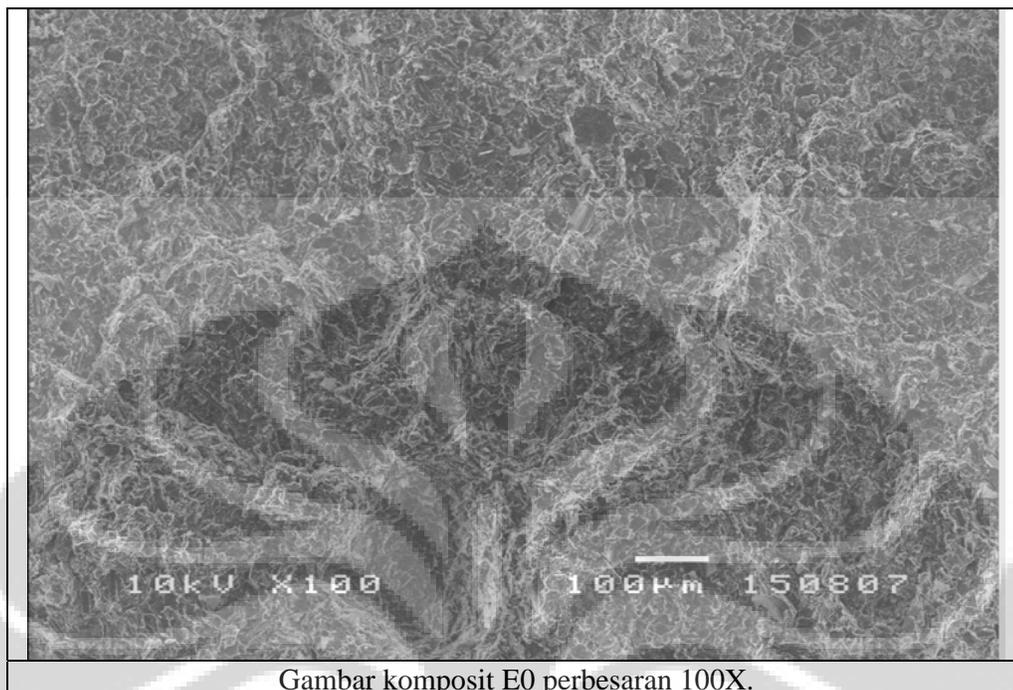


Gambar grafit perbesaran 500X.

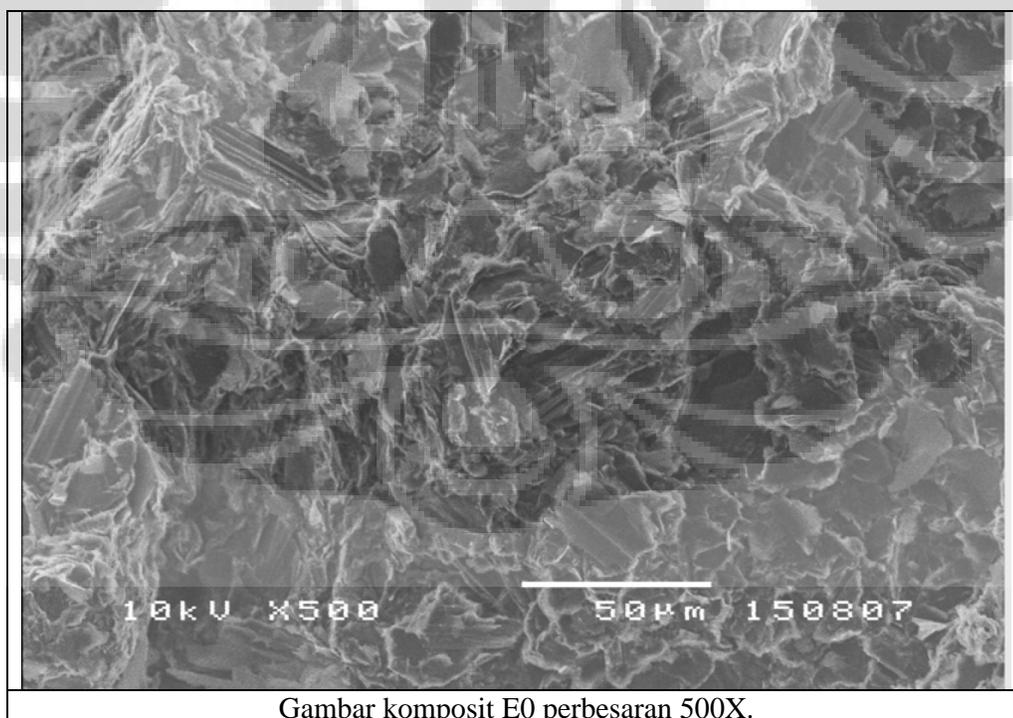


Gambar grafit perbesaran 1000X.

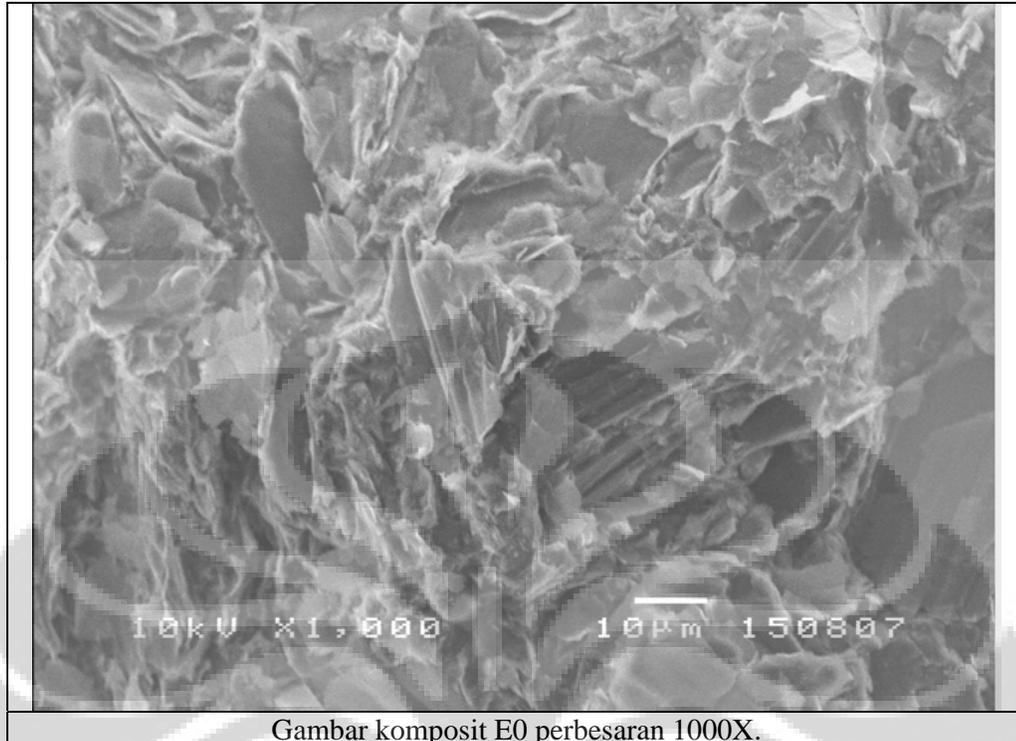
2. Komposit E0, Optimasi Komposisi.



Gambar komposit E0 perbesaran 100X.

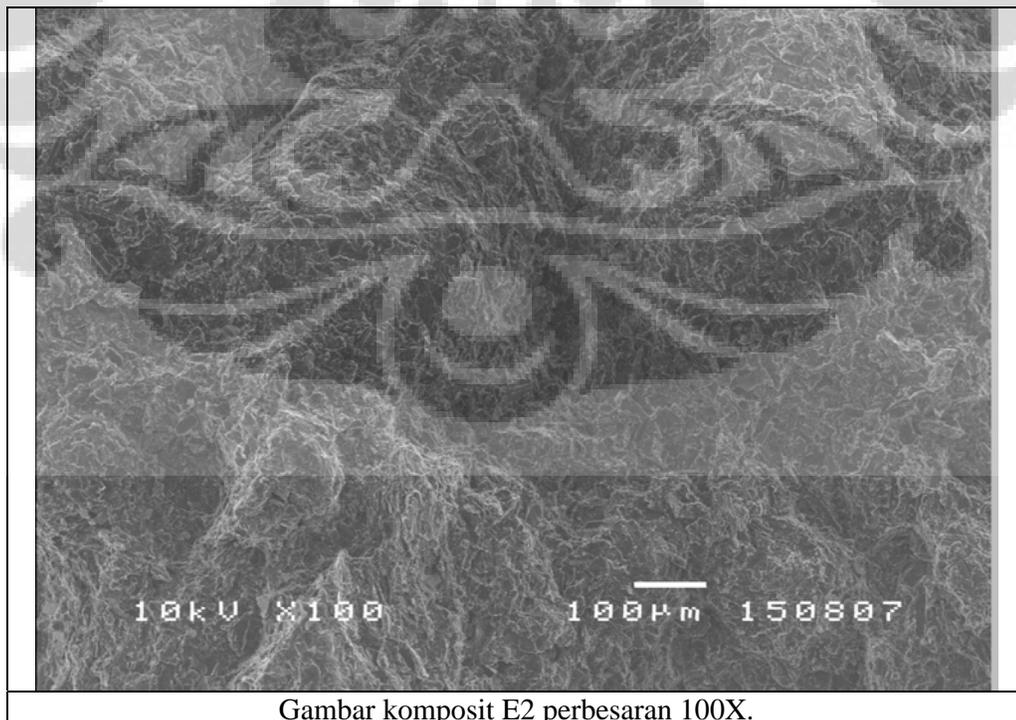


Gambar komposit E0 perbesaran 500X.

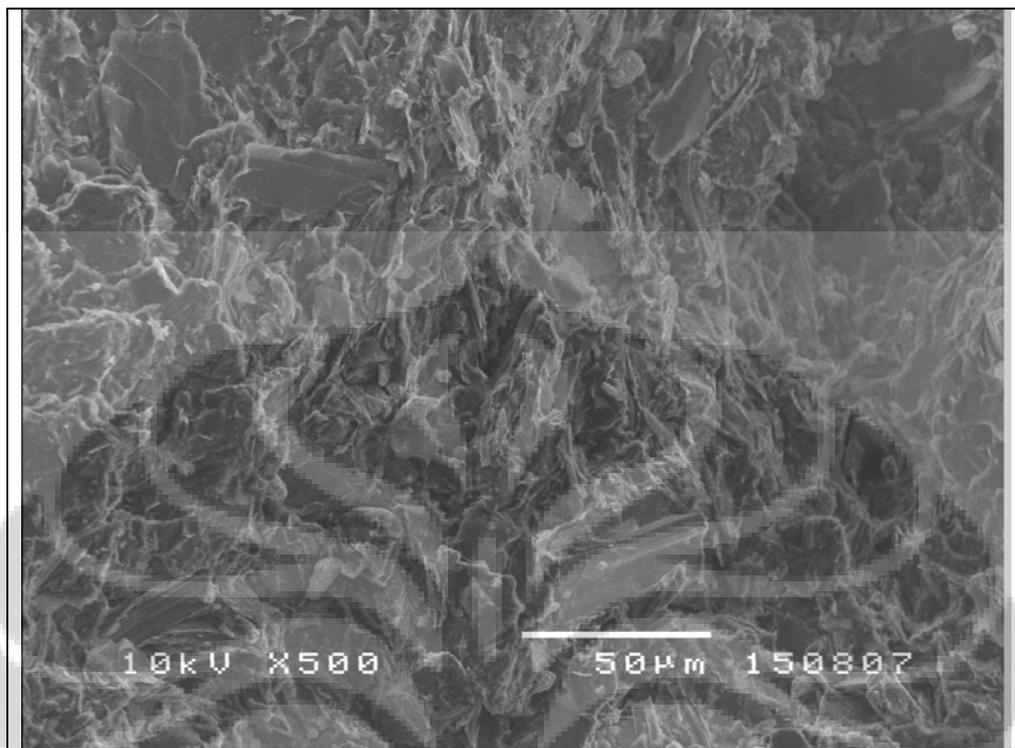


Gambar komposit E0 perbesaran 1000X.

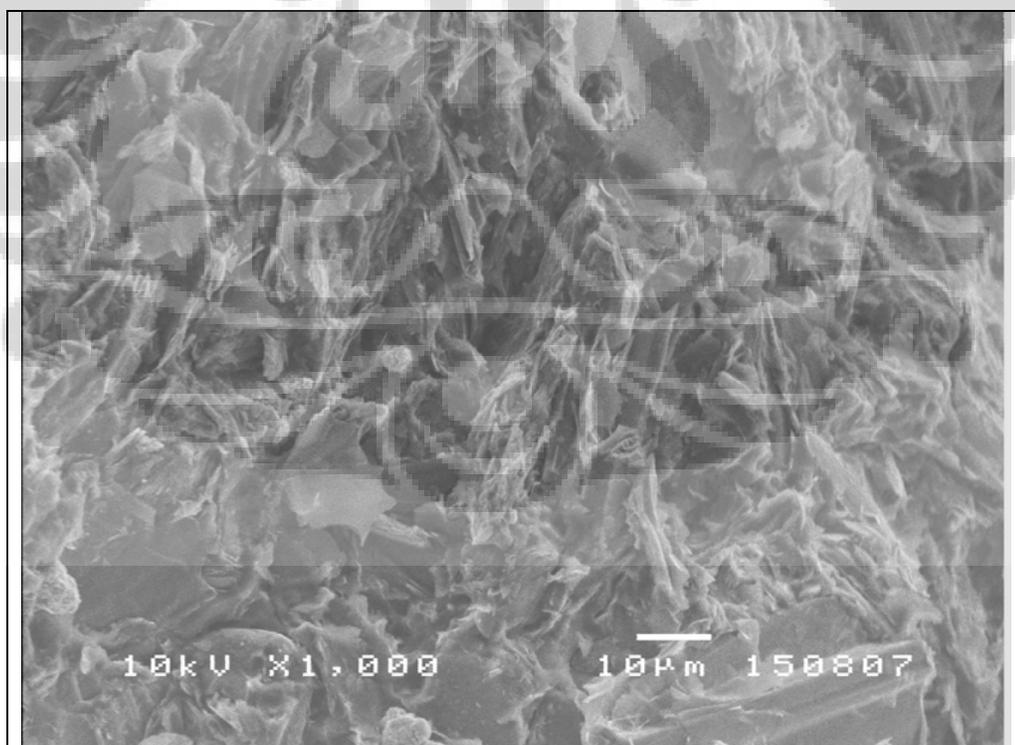
3. Komposit E2, Penambahan Karbon Black.



Gambar komposit E2 perbesaran 100X.

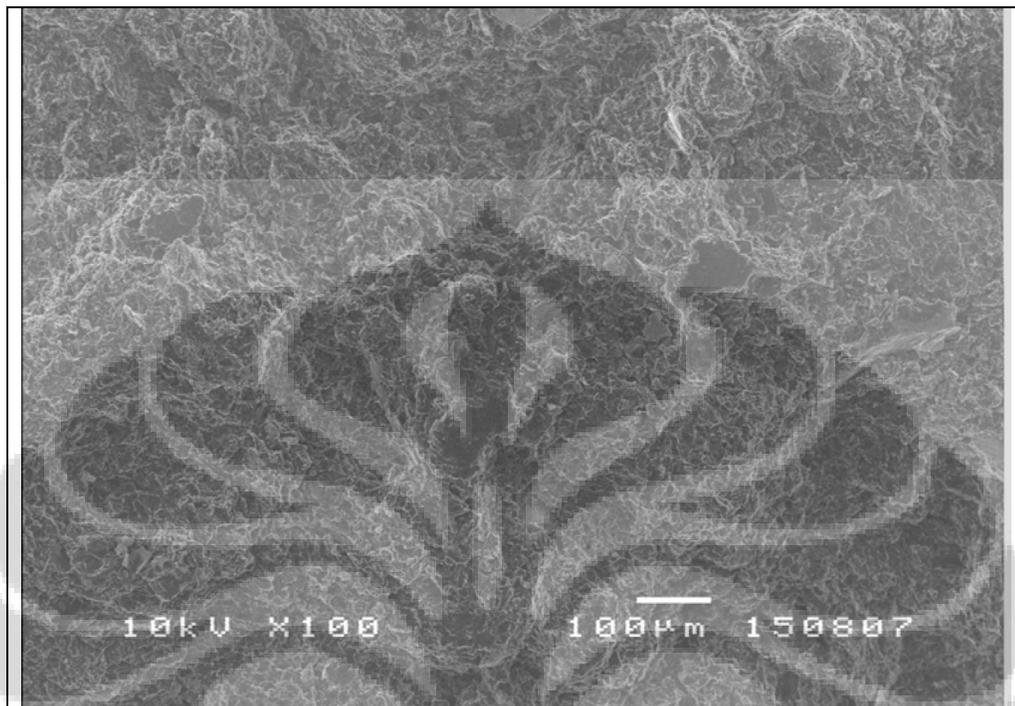


Gambar komposit E2 perbesaran 500X.

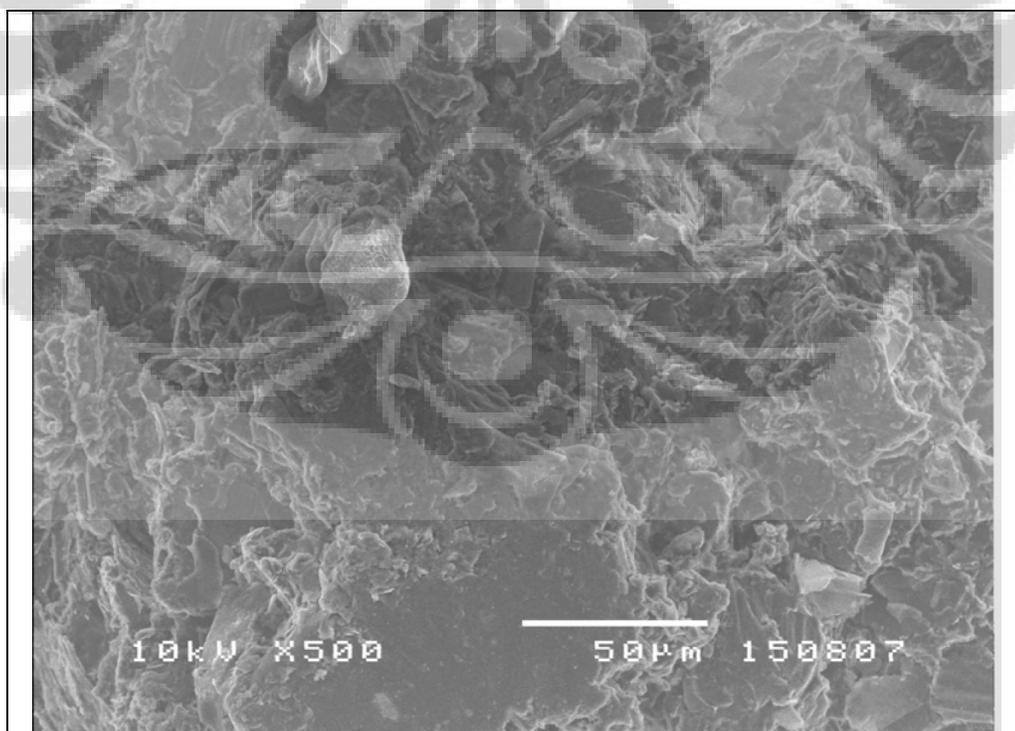


Gambar komposit E2 perbesaran 1000X.

4. Komposit E2-A, Penambahan Alumunium.



Gambar komposit E2-A perbesaran 100X.



Gambar komposit E2-A perbesaran 500X.

