



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH VARIASI WAKTU MIXING 75-135 MENIT
TERHADAP KARAKTERISTIK PELAT BIPOLAR
PADA PEMFC**

SKRIPSI

**HILDA JUNIANA
0706268594**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
UNIVERSITAS INDONESIA
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH VARIASI WAKTU MIXING 75-135 MENIT
TERHADAP KARAKTERISTIK PELAT BIPOLAR
PADA PEMFC**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**HILDA JUNIANA
0706268594**

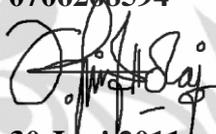
**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
UNIVERSITAS INDONESIA
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Hilda Juniana

NPM : 0706268594

Tanda Tangan : 

Tanggal : 30 Juni 2011

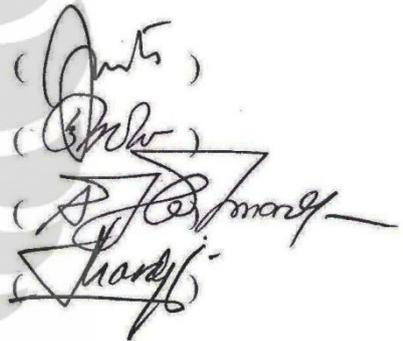
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Hilda Juniana
NPM : 0706268594
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Variasi Waktu Mixing 75-135 Menit
Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar pada PEMFC

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Ir. Yunita Sadeli, M.Sc.
Pembimbing 2 : Dr. Ir. Bambang Prihandoko, MT
Penguji 1 : Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil.Eng
Penguji 2 : Dr. Ir. Sri Harjanto



(Yunita)
(Bambang)
(Akhmad)
(Sri Harjanto)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan penyertaan-Nya hingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Pengaruh Variasi Waktu Mixing 75-135 Menit Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar pada PEMFC”**. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Sarjana Teknik dari Departemen Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis berharap, penulisan skripsi ini dapat membantu penelitian dan perkembangan dalam bidang energi alternatif di Indonesia, khususnya dibidang *fuel cell*.

Penulis menyadari bahwa penyelesaian skripsi ini dapat terwujud tidak lepas dari dukungan, bantuan, serta bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Yunita Sadeli, M.Sc selaku dosen pembimbing dari Departemen Metalurgi dan Material yang telah menyediakan waktu, tenaga, pikiran, serta bantuan lain baik dalam bentuk moril maupun materil.
2. Dr. Ir. Bambang Prihandoko, MT sebagai pembimbing dari Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang telah membantu dan membimbing dalam penulisan skripsi ini.
3. Seluruh staf pengajar serta karyawan Departemen Metalurgi dan Material atas segala dukungan dari masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan.
4. Staf laboratorium serta karyawan di Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia yang telah menyediakan waktu, tempat, serta arahan selama penelitian yang dilakukan oleh penulis.

Dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan dan kesalahan, oleh karena itu penulis menerima kritik dan saran yang dapat dijadikan perbaikan di masa depan. Semoga apa yang sudah diberikan dan dihasilkan dari skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan di Indonesia.

Depok, 30 Juni 2011

Penulis

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

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

Nama : Hilda Juniana
NPM : 0706268594
Program Studi : Metalurgi & Material
Departemen : Metalurgi & Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

**PENGARUH VARIASI WAKTU MIXING 75-135 MENIT TERHADAP
KARAKTERISTIK PELAT BIPOLAR PADA PEMFC**

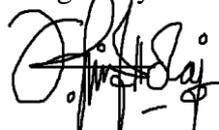
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak bebas Royalti Noeksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 30 Juni 2011

Yang menyatakan


(Hilda Juniana)

ABSTRAK

Nama : Hilda Juniana
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Variasi Waktu Mixing 75-135 Menit Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar pada PEMFC

Sel tunam merupakan salah satu energi alternatif yang dipilih karena sangat efisien, ramah lingkungan, serta memiliki waktu pakai yang lama. Namun sel tunam memiliki harga yang cukup tinggi akibat material penyusun yang menyebabkan massanya menjadi berat dan proses manufaktur yang rumit. Pada PEMFC (*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*), pelat bipolar merupakan komponen utama yang memenuhi sekitar 80% volume, 70% bobot, dan 60% biaya produksi. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mencari alternatif bahan baku dan metode produksinya.

Penelitian ini mengembangkan komposit pelat bipolar menggunakan matriks epoksi dengan penguat limbah grafit EAF (*Electric Arc Furnace*) dan *carbon black*. Partikel grafit dan *carbon black* berukuran kurang dari 44 μ . Pelat bipolar difabrikasi dengan melakukan variasi waktu *mixing* antara grafit dan *carbon black* selama 75, 90, 105, 120, dan 135 menit. Kemudian proses dilanjutkan dengan *compression molding* pada temperatur 100°C dengan tekanan sebesar 55 MPa selama 4 jam.

Sifat mekanis dan listrik pelat bipolar diuji melalui pengujian densitas (ASTM D792), porositas (ASTM C20), fleksural (ASTM D790), dan konduktivitas (ASTM B193). Fokus penelitian ini untuk mengetahui pengaruh waktu *mixing* terhadap homogenitas, sifat mekanis, dan konduktivitas listrik pelat bipolar yang dihasilkan. Performa terbaik didapat pada pelat bipolar yang dihasilkan dengan menggunakan waktu *mixing* sebesar 135 menit dengan nilai densitas sebesar 1,75 gr/cm³, nilai porositas sebesar 0.24%, kekuatan fleksural sebesar 57.12 MPa, serta nilai konduktivitas listrik sebesar 1,02 S/cm.

Kata kunci:

Pelat bipolar, PEMFC, epoksi resin, grafit EAF, *carbon black*, variasi waktu *mixing*, densitas, porositas, kekuatan fleksural, konduktivitas listrik.

ABSTRACT

Name : Hilda Juniana
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : The Effect of Mixing Time Variation 75-135 Minutes on the Characteristic of Bipolar Plate for PEMFC

Fuel cell is one of the chosen alternative energy because it is very efficient, environmentally friendly, and long-term usage. However, fuel cell has a fairly high price due to its constituent material which causes the mass to be heavy and complicated manufacturing process. In PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell), bipolar plate is a major component that meets about 80% by volume, 70% weight, and 60% of production cost. Therefore, this research was conducted to find out the alternative raw materials and production methods.

This research develops a composite bipolar plate using an epoxy as a matrix with Electric Arc Furnace waste (graphite EAF) and carbon black as a reinforcement. Graphite and carbon black particles were measuring less than 44 μ . Bipolar plates were fabricated by mixing time variation between graphite and carbon black for 75, 90, 105, 120, and 135 minutes. Afterwards, the process was followed by compression molding at a temperature of 110°C with a pressure of 55 MPa for 4 hours.

Mechanical and electrical properties of bipolar plates were tested by density (ASTM D792), porosity (ASTM C20), flexural (ASTM D790), and conductivity (ASTM B193) testing. The focus of this research to determine the influence of mixing time on homogeneity, mechanical properties, and electrical conductivity of the bipolar plate produced. The best performance obtained on a bipolar plate generated using the mixing time of 135 minutes with a value of 1,75 gr/cm^3 density, porosity value of 0.24%, flexural strength of 57.12 MPa, and electrical conductivity of 1,02 S/cm.

Keywords:

Bipolar plate, PEMFC, epoxy resin, graphite EAF, carbon black, mixing time variation, density, porosity, flexural strength, electrical conductivity.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	5
1.5 Sistematika Penulisan	6
2. DASAR TEORI.....	7
2.1 Sel Tunam.....	7
2.2 <i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell</i> (PEMFC).....	8
2.2.1 Prinsip Dasar PEMFC.....	11
2.2.2 Struktur Sistem PEMFC.....	12
2.3 Pelat Bipolar pada PEMFC.....	14
2.3.1 Klasifikasi Pelat Bipolar.....	16
2.3.2 Material Penyusun Pelat Bipolar.....	18
2.3.2.1 Resin Epoksi.....	18
2.3.2.2 Grafit.....	20
2.3.2.3 <i>Carbon Black</i>	23
a. Ukuran Partikel dan Luas Permukaan.....	24
b. Struktur.....	24
2.3.2.4 Metanol.....	26
2.4 Metode Fabrikasi.....	27
2.4.1 <i>Mixing</i>	27
2.4.2 <i>Compression Molding (Hot Pressing)</i>	29
3. METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	31
3.1.1 Diagram Alir Fabrikasi Pembuatan Pelat Bipolar.....	31
3.1.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel.....	32
3.2 Alat dan Bahan.....	32
3.2.1 Alat.....	32
3.2.2 Bahan.....	33
3.2.2.1 Resin Epoksi.....	34
3.2.2.2 Grafit EAF.....	35

3.2.2.3 <i>Carbon Black</i>	35
3.2.2.4 Metanol.....	35
3.3 Proses Pembuatan Sampel.....	37
3.3.1 Penghalusan.....	37
3.3.2 Penimbangan.....	37
3.3.3 Pencampuran.....	38
3.3.4 Pencetakan Pelat.....	38
3.3.5 Pembuatan Spesimen Uji.....	39
3.3.5 Proses Karakterisasi Pelat Bipolar.....	40
3.3.5.1 Pengujian Konduktivitas Listrik.....	40
3.3.5.2 Pengujian Densitas (Rapat Massa).....	41
3.3.5.3 Pengujian Porositas.....	42
3.3.5.4 Pengujian Tekuk (<i>Flexural</i>)	43
4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	46
4.1 Pengamatan Visual Hasil Pencetakan Pelat Bipolar.....	46
4.2 Karakterisasi Pelat Bipolar.....	47
4.2.1 Pengujian Densitas.....	48
4.2.2 Pengujian Porositas.....	50
4.2.3 Pengujian Fleksural.....	52
4.2.4 Pengujian Konduktivitas.....	55
4.3 Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar dengan Variasi Waktu <i>Mixing</i>	57
5. KESIMPULAN.....	58
DAFTAR REFERENSI.....	59
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR GAMBAR

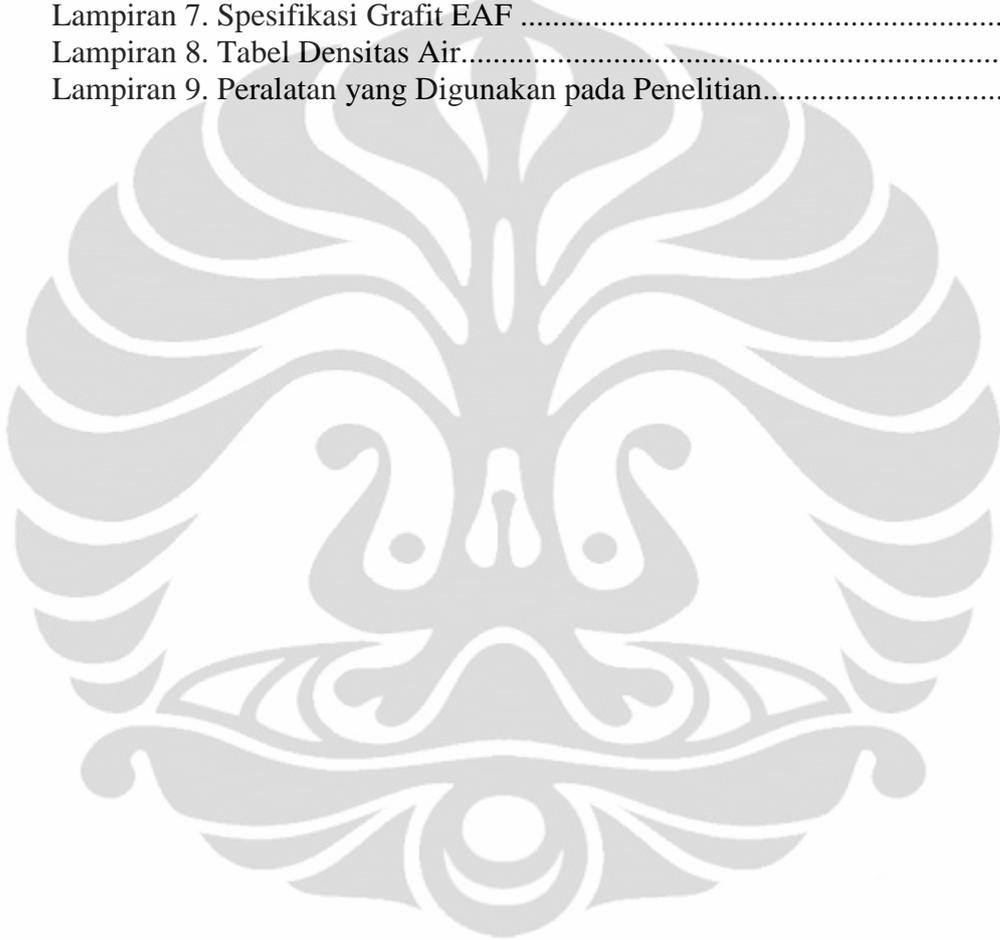
Gambar 1.1	Konsumsi Energi Dunia.....	1
Gambar 1.2	Skema Cara Kerja PEMFC.....	3
Gambar 2.1	Pemanfaatan sel tunam berdasarkan jenisnya.....	10
Gambar 2.2	Mekanisme PEMFC.....	12
Gambar 2.3	Struktur Sistem PEMFC.....	13
Gambar 2.4	Klasifikasi Material Pelat Bipolar.....	16
Gambar 2.5	Reaksi Pembentukan Epoksi	18
Gambar 2.6	Reaksi Antara Epoksi Resin dan <i>Hardener</i>	19
Gambar 2.7	Struktur Kristal Grafit	20
Gambar 2.8	Tungku Busur Listrik.....	22
Gambar 2.9	Pengaruh Jumlah Grafit Terhadap Resistansi Listrik.....	22
Gambar 2.10	Struktur dari <i>Carbon Black</i>	25
Gambar 2.11	Skema <i>Carbon Black</i> pada Sistem Komposit.....	25
Gambar 2.12	Pengaruh Penambahan <i>Carbon Black</i>	26
Gambar 2.13	Struktur Metanol.....	27
Gambar 2.14	NQM-0.4 Model <i>Planetary Ball Mill</i>	27
Gambar 2.15	Mesin <i>Hydraulic Press</i>	30
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian (Fabrikasi Pelat Bipolar).....	31
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian (Karakterisasi Pelat Bipolar).....	32
Gambar 3.3	Spesimen uji konduktivitas, densitas, dan porositas.....	39
Gambar 3.4	Spesimen uji fleksural.....	39
Gambar 3.5	Skema Uji Konduktivitas.....	40
Gambar 3.6	Skema Uji Fleksural.....	44
Gambar 3.7	Proses Pengujian Fleksural.....	44
Gambar 4.1	Pelat yang Dihasilkan pada Variasi Waktu <i>Mixing</i> : a) 75 Menit, b) 90 Menit, c) 105 Menit, d) 120 Menit, dan e) 135 Menit.....	46
Gambar 4.2	Pengaruh Waktu <i>Mixing</i> Terhadap Densitas.....	49
Gambar 4.3	Pengaruh Waktu <i>Mixing</i> Terhadap Porositas.....	51
Gambar 4.4	Pengaruh Waktu <i>Mixing</i> Terhadap Kekuatan Fleksural.....	53
Gambar 4.5	Pengaruh Waktu <i>Mixing</i> Terhadap Konduktivitas.....	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis-Jenis Sel Tunam.....	9
Tabel 2.2 Komponen Penyusun PEMFC.....	13
Tabel 2.3 Target Teknis DOE untuk pelat bipolar.....	15
Tabel 2.4 Kelebihan dan Kekurangan Material Penyusun Pelat Bipolar.....	17
Tabel 2.5 Pengaruh Ukuran dan Bentuk Partikel Grafit.....	23
Tabel 2.6 Klasifikasi Manufaktur dan Penggunaan <i>Carbon Black</i>	24
Tabel 2.7 Sifat Umum Metanol.....	26
Tabel 2.8 Spesifikasi <i>Planetary Ball Mill</i>	28
Tabel 3.1 Spesifikasi Epoksi Resin.....	34
Tabel 3.2 Spesifikasi <i>Hardener</i>	34
Tabel 3.3 Spesifikasi Metanol.....	36
Tabel 3.4 Komposisi pelat bipolar dan variasi waktu <i>mixing</i>	37
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Densitas.....	48
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Porositas.....	50
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Fleksural.....	53
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Konduktivitas.....	55
Tabel 4.5 Perbandingan Karakteristik Pelat dengan Variasi Tekanan pada Variasi Waktu <i>Mixing</i>	57

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Pengujian Porositas.....	63
Lampiran 2. Hasil Pengujian Densitas.....	64
Lampiran 3. Hasil Pengujian Fleksural.....	65
Lampiran 4. Hasil Pengujian Konduktivitas.....	66
Lampiran 5. Spesifikasi Resin Epoksi.....	68
Lampiran 6. Spesifikasi Epoksi <i>Hardener</i>	69
Lampiran 7. Spesifikasi Grafit EAF	70
Lampiran 8. Tabel Densitas Air.....	72
Lampiran 9. Peralatan yang Digunakan pada Penelitian.....	74

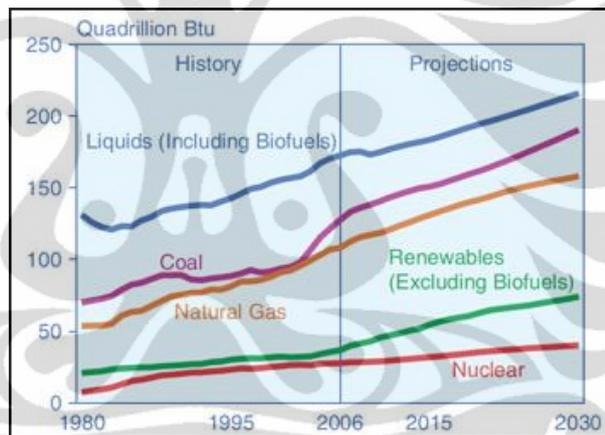


BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi dunia yang terus meningkat saat ini menjadi salah satu permasalahan yang sedang dihadapi oleh seluruh negara di dunia, begitu pula di Indonesia. Permasalahan ini disebabkan oleh pemenuhan kebutuhan energi dunia yang sebagian besar bersumber pada bahan bakar fosil, seperti minyak bumi dan batu bara, yang merupakan sumber daya alam tidak terbarukan (*unrenewable resources*). Pada Gambar 1.1, ditunjukkan bagaimana *trend* peningkatan konsumsi energi dunia dari tahun 1980-2006 dan proyeksinya hingga tahun 2030^[1].



Gambar 1.1 Konsumsi energi dunia^[1]

Sumber: *International Energy Annual 2006 (June-December 2008)*

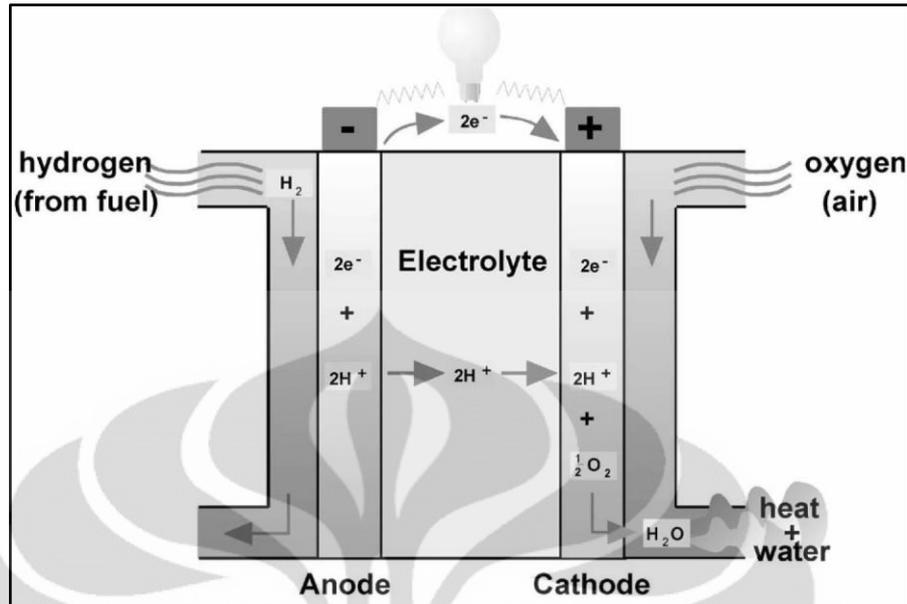
Kebutuhan energi yang diperkirakan meningkat sangat tajam adalah kebutuhan industri kebutuhan sektor transportasi. Sektor lain seperti perumahan serta kebutuhan komersial tidak terlampau banyak. Tentu saja semua ini didasarkan atas perkembangan *trend* yang meningkat dari tahun-tahun sebelumnya^[2]. Dengan pola konsumsi energi seperti ini, seluruh potensi energi dunia akan habis pada tahun 2050. Mengingat konsumsi energi di Indonesia mengalami grafik kenaikan rata-rata 7% per tahun selama 10 tahun terakhir, pemerintah Indonesia berkomitmen mengembangkan energi terbarukan. Jika tidak dikembangkan energi terbarukan sejak dini, Indonesia akan mengalami masalah energi kedepannya^[3]. Berbagai negara di dunia, khususnya negara-negara maju,

sudah melakukan bermacam-macam riset dan teknologi untuk mencari sumber energi alternatif sebagai pengganti energi berbasis minyak bumi ataupun batu bara, baik dari segi fungsi, harga maupun emisi yang dihasilkan sehingga dapat digunakan oleh seluruh kalangan masyarakat. Namun hal ini bukanlah mudah, ada berbagai persoalan yang timbul didalamnya, mulai dari besarnya biaya yang harus dikeluarkan, keterbatasan teknologi, hingga belum cukupnya kuantitas yang dapat dicapai oleh energi alternatif untuk memenuhi seluruh energi yang dibutuhkan.

Salah satu energi alternatif yang saat ini sedang dikembangkan di beberapa negara maju, termasuk Indonesia, adalah energi yang berbahan dasar gas hidrogen, biasanya dikenal sebagai sel tunam (*fuel cell*). Sebagai energi alternatif, gas hidrogen menjadi bahan yang paling diminati karena gas hidrogen mampu diubah menjadi listrik dengan hasil samping hanya berupa air dan panas. Selain itu, sel tunam juga memiliki kelebihan dari segi efektivitas, kebisingan yang rendah, serta ramah lingkungan sehingga sesuai dengan isu pemanasan global yang sedang gencar saat ini. Sel tunam juga tidak mengalami *discharged* dan akan terus menghasilkan energi seiring suplai bahan bakar secara simultan terhadapnya.

Sampai saat ini sudah terdapat enam jenis sel tunam yang dibedakan berdasarkan pada elektrolit yang digunakan dan kondisi operasi sel (suhu dan tekanan). Keenam sel tersebut ialah *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC), *Alkali Fuel Cell* (AFC), *Molten Carbonat Fuel Cell* (MCFC), *Posphoric Acid Fuel Cell* (PAFC), *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC) dan *Direct Methanol-Ethanol Fuel Cell* (DMFC/DEFC)^[4].

Sebagai sebuah sistem pembangkit listrik, sel tunam menghasilkan energi dari reaksi kimia yang merupakan pencampuran gas hidrogen yang berasal dari air dengan oksigen dari udara. Reaksi ini merupakan reaksi kebalikan elektrolisis, dimana arus listrik dipakai sebagai energi untuk mengurai air menjadi hidrogen dan oksigen. Secara skematik, cara kerja sel tunam khususnya *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) dapat dilihat pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2 Skema cara kerja PEMFC^[5]

Sumber: World Fuel Cell Council

Pada sel tunam, proses kimia yang disebut pertukaran ion terjadi didalam elektolit dan hasilnya adalah listrik, air dan panas. Sel tunam menghasilkan energi listrik tanpa adanya pembakaran dari bahan bakarnya sendiri, sehingga tidak ada polusi yang mengakibatkan kerusakan lingkungan.

Salah satu dari jenis sel tunam yang mulai dikembangkan yaitu *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC). PEMFC memiliki banyak keunggulan, antara lain korosi minimal karena hanya terdapat hasil sampingan berupa air (H₂O) yang memiliki pH netral, merupakan konduktor proton yang baik, waktu pakai yang panjang mencapai 11.000 jam, ramah lingkungan, tidak bising, temperatur aplikasi yang relatif rendah $\pm 80^{\circ}\text{C}$ karena sel tunam harus beroperasi pada kondisi air (H₂O) produk tidak boleh menguap lebih cepat dibandingkan pembentukannya bertujuan untuk menjaga agar membran terhidrasi^[6]. Namun hingga saat ini, PEMFC belum dapat diproduksi secara massal. Terdapat permasalahan yang dihadapi dalam pembuatan PEMFC, salah satunya yaitu tingginya biaya produksi. Biaya produksi ini berkaitan dengan pembuatan pelat bipolar. Pelat bipolar merupakan komponen utama pada PEMFC yang memenuhi sekitar 80% volume sel tunam, 70% bobot sel tunam, dan 60% biaya produksi^[7]. Pelat bipolar sendiri merupakan bagian dari sistem dan perangkat separator sel tunam yang merupakan “jantung” dari sistem tersebut

Universitas Indonesia

yang memiliki fungsi ganda. Pelat bipolar berfungsi sebagai elektrolit dan pemisah dua gas reaktan (hidrogen dan oksigen). Sebagai elektrolit, pelat bipolar ini menjadi sarana transportasi ion hidrogen dan penghantar elektron dari reaksi anoda menuju katoda, sehingga reaksi pada katoda menghasilkan energi listrik, penghantar panas dari dan menuju elektroda, mengalirkan produk akhir dalam bentuk air dari tiap sel, penghalang perpindahan gas antar sel, dan menjaga stabilitas struktur dari PEMFC itu sendiri^[7].

Pemecahan dalam pengurangan biaya produksi pelat bipolar sangat diperlukan, yaitu dengan mencari alternatif bahan baku dan metode produksinya. Hal ini diperlukan untuk mendapatkan pelat bipolar yang murah serta efisien yang dapat mengurangi biaya produksi serta membuat PEMFC dapat diproduksi secara massal.

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini akan dilakukan variasi pada waktu *mixing* antara grafit dan *carbon black*. Variasi waktunya adalah antara 75, 90, 105, 120, dan 135 menit. Variasi waktu *mixing* ini dilakukan untuk memaksimalkan distribusi partikel grafit dan *carbon black* agar lebih homogen sekaligus melihat pengaruhnya terhadap nilai konduktivitas listrik dari pelat bipolar komposit yang dihasilkan.

Material yang dipakai untuk membuat pelat bipolar pada penelitian ini adalah material epoksi sebagai matriks serta grafit dan *carbon black* sebagai penguat (*reinforcement*). Dengan penelitian ini diharapkan didapatkannya karakteristik pelat bipolar yang sesuai dengan persyaratan umum yang ada sehingga dapat dipakai dalam perangkat sel tunam dan dapat diaplikasikan untuk pemenuhan berbagai keperluan energi listrik.

Untuk mengoptimalkan karakteristik pelat bipolar, dilakukan proses pencampuran awal antara grafit dan *carbon black* dengan alat *planetary ball mill* selama 75, 90, 105, 120, dan 135 menit. Kemudian campuran grafit-*carbon black* dicampur dengan epoksi dan juga *hardener*. Setelah tercampur secara homogen, dilakukan pencetakan terhadap bakalan tersebut dengan dilakukan penekanan sebesar 55 MPa menggunakan mesin *hot press*. Pelat yang dihasilkan tersebut

kemudian dipreparasi menjadi sampel untuk pengujian konduktivitas, densitas, porositas, dan fleksural dari pelat bipolar tersebut. Pengujian ini ditujukan untuk mengetahui kesesuaian karakteristik pelat bipolar sesuai dengan persyaratan umum yang ada.

Secara umum, ada beberapa faktor penting yang dapat mempengaruhi sifat dan karakteristik dari pelat bipolar, yaitu: material penyusun pelat, fasa yang terdispersi dalam pelat matriks, dan juga distribusi ukuran partikel grafit dan *carbon black* yang dapat mempengaruhi konduktivitas listrik pelat bipolar^[8].

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini antara lain:

1. Mengetahui pengaruh waktu *mixing* terhadap karakteristik pelat bipolar PEMFC yang dihasilkan
2. Mengetahui karakteristik dari pelat bipolar melalui beberapa pengujian tertentu
3. Mengembangkan komposit material untuk pelat bipolar PEMFC yang memiliki nilai ekonomis tinggi serta karakteristik baik

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Pada penelitian ini yang menjadi fokus utama adalah waktu *mixing* antara grafit dan *carbon black* yang kemudian di *mixing* dengan bahan penyusun lainnya, yaitu epoksi dan *hardener* yang diharapkan mampu meningkatkan homogenitas sehingga mampu meningkatkan konduktivitas pelat bipolar yang dihasilkan.

1. Polimer termoset (epoksi resin) yang digunakan sebesar 20% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit, dengan perbandingan resin epoksi:*hardener*, yaitu 1:1.
2. Kandungan bahan berupa grafit dan *carbon black* yang digunakan sebesar 80% dari total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit, dengan komposisi grafit 95% dan *carbon black* 5% dengan 325 mesh (lebih kecil dari 44 μm).
3. Total berat bahan penyusun pelat bipolar komposit adalah 144 gram.

4. Dilakukan *mixing* antara grafit dan *carbon black* selama 75, 90, 105, 120, dan 135 menit. Kemudian dilanjutkan dengan pembuatan bakalan dengan metode *hot blending* pada temperatur 100°C selama ± 20 menit, kemudian dilakukan proses *compression moulding* dengan tekanan sebesar 55 MPa pada temperatur 100°C selama 4 jam sehingga menghasilkan pelat bipolar yang siap uji.
5. Pelat bipolar yang dihasilkan diuji dengan pengujian konduktivitas listrik (*four point probe testing*), densitas (ASTM D792), porositas (ASTM C20), dan fleksural (ASTM D790) untuk mengetahui karakteristik dari pelat bipolar komposit tersebut.

1.5 Sistematika Penulisan

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

BAB 1: PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang penelitian, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan penelitian.

BAB 2: TEORI PENUNJANG

Bab ini menguraikan tentang studi literatur yang berkaitan dengan penelitian pada skripsi ini.

BAB 3: METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi prosedur penelitian serta daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

BAB 4: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan data-data hasil penelitian serta analisis dari hasil penelitian yang dibandingkan dengan hasil dari studi literatur.

BAB 5: KESIMPULAN

Bab ini berisikan kesimpulan akhir penelitian berdasarkan hasil dan pembahasannya.

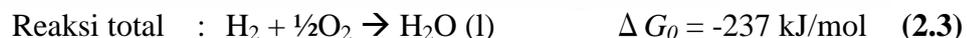
BAB 2

TEORI PENUNJANG

2.1 Sel Tunam

Sel tunam merupakan perangkat konversi energi elektrokimia yang mengubah energi kimia dari hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂) ke dalam energi listrik dan panas melalui reaksi reduksi elektrokimia. Karena itu, sel tunam tidak mencemari lingkungan seperti penghasil listrik konvensional lainnya yang memanfaatkan bahan bakar fosil. Sebagai sumber bahan bakar, hidrogen dapat berasal dari gas alam, propana, butana, metanol, serta bahan bakar diesel, sedangkan oksigen berasal dari udara. Selain tidak menyebabkan polusi, sel tunam juga tidak memerlukan sistem pengisian ulang seperti pada baterai. Energi yang dihasilkan pada sel tunam akan terus dihasilkan selama bahan bakar disuplai^[9].

Sel tunam memiliki elektroda positif (katoda) dan elektroda negatif (anoda) yang didalamnya terjadi reaksi kimia hingga menghasilkan energi listrik. Selain itu, terdapat juga elektrolit yang akan membawa muatan-muatan listrik dari satu elektroda ke elektroda lain, serta katalis yang akan mempercepat reaksi di elektroda. Umumnya, jenis-jenis sel tunam dibedakan oleh elektrolit yang digunakan. Persamaan reaksi yang terjadi pada katoda dan anoda adalah sebagai berikut:



Air dan panas yang dihasilkan setiap jenis sel tunam merupakan hasil sampingan berdasarkan reaksi kimia yang terjadi di katoda dan anoda. Kemurnian gas hidrogen akan sangat mempengaruhi emisi buangan dari sistem sel tunam berbasis polimer. Semakin tinggi kemurnian hidrogennya, tingkat emisi semakin mendekati angka nol (*zero emission*).

Kelebihan dari sel tunam adalah kemampuannya untuk mengkonversikan energi kimia secara langsung menjadi energi listrik dengan efisiensi proses yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem termal mekanis

konvensional, yang kemudian menghasilkan lebih banyak energi listrik dari jumlah bahan bakar yang sama. Sel tunam dapat mengkonversikan 50–70% bahan bakar yang tersedia menjadi energi listrik (90% dengan *recovery* panas). Hal tersebut dapat terjadi, dikarenakan sistem operasinya tidak melibatkan proses pembakaran, maka hampir dipastikan bebas polusi dan memiliki sistem operasi yang lebih tenang (dalam parameter kebisingan) akibat tidak adanya komponen yang dipindahkan^[9].

Dalam aplikasinya, sel tunam menghasilkan energi yang cukup besar dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sistem energi lain, misalnya *reciprocating engines*, *biomass-based generators*, *photovoltaic*, *wind turbines*, dan *micro-turbines*.

2.2 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Jenis-jenis sel tunam dapat dibedakan berdasarkan jenis elektrolit yang digunakan, dapat dilihat pada Tabel 2.1. Berdasarkan tabel tersebut, sel tunam jenis *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) merupakan jenis *fuel cell* yang dapat beroperasi pada temperatur rendah (40-80°C) dan hanya membutuhkan hidrogen dengan kemurnian rendah. Selain itu kelebihan dari PEMFC yaitu juga memiliki densitas daya tinggi (*high power density*), relatif cepat dalam permulaan menghasilkan energi (*quick start-up*) serta respon yang cepat terhadap perubahan masukan^[10].

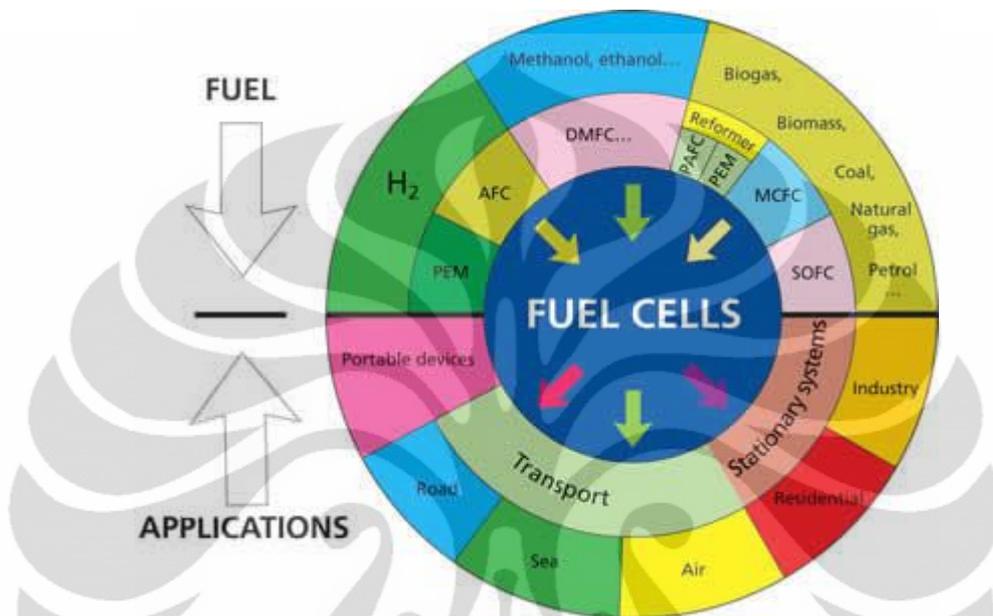
Tabel 2.1 Jenis-jenis sel tunam^[4]

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolit	<i>Hydrated Polymeric Ion Exchange Membranes</i>	<i>Mobilized or Immobilized Potassium Hydroxide in asbestos matrix</i>	<i>Immobilized Liquid phosphoric Acid in SiC</i>	<i>Immobilized Liquid Molten Carbonate in LiAlO₂</i>	<i>Perovskites (Ceramics)</i>
Elektroda	Karbon	Logam transisi	Karbon	Nikel dan nikel oksida	<i>Perovskites and Perovskites/metal content</i>
Katalis	Platina	Platina	Platina	Material elektroda	Material elektroda
Interconnect	Karbon atau logam	Logam	Grafit	Baja tahan karat atau nikel	Nikel, keramik, atau baja
Temperatur operasi	40 – 80 °C	65 – 220 °C	205 °C	650 °C	600 – 1000 °C
Jenis muatan	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ⁻	O ⁻
External reformer for hydrocarbon fuels	Ya	Ya	Ya	Tidak, untuk beberapa bahan bakar	Tidak, untuk beberapa bahan bakar & desain sel
External shift conversion of CO to hydrogen	Ya, ditambah pemurnian menghilangkan CO	Ya, ditambah pemurnian menghilangkan CO dan CO ₂	Ya	Tidak	Tidak
Komponen sel utama	Berbasis karbon	Berbasis karbon	Berbasis grafit	Berbasis baja tahan karat	Keramik
Pengaturan produk air	Penguapan	Penguapan	Penguapan	Produk gas	Produk gas
Pengaturan produk panas	<i>Process gas + liquid cooling medium</i>	<i>Process gas + electrolyte circulation</i>	<i>Process gas + liquid cooling medium or steam generation</i>	<i>Internal reforming + process gas</i>	<i>Internal reforming + process gas</i>

Sumber : Introduction to Fuel Cell Technology

Dari beberapa jenis sel tunam yang dikembangkan, PEMFC merupakan sumber energi yang paling berpotensi untuk aplikasi pada perumahan dan bidang otomotif. Hal ini dikarenakan beberapa keunggulan yang dimiliki oleh PEMFC, seperti mampu menghasilkan energi yang besar, temperatur operasi yang rendah, sehingga membuat sel ini dapat bereaksi lebih cepat, dan dapat

meminimalisasi adanya unsur penyebab korosi^[4], suplai bahan bakar yang baik, serta daya tahan yang baik^[11]. Pemanfaatan sel tunam dalam berbagai bidang dapat kita lihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Pemanfaatan sel tunam berdasarkan jenisnya^[12]

Sumber: http://ec.europa.eu/research/rtdinfo/42/01/article_1317_en.html

Dalam prakteknya, kehilangan tegangan dan *overpotential* yang terjadi selama beroperasi dapat mengurangi efisiensi dari keunggulannya tersebut^[11]. Sel ini juga mengalami keterbatasan terhadap bahan bakar yang digunakan, yaitu hidrogen, mengingat kadar H₂ diudara cukup rendah dan biaya pembuatannya pun masih mahal, sehingga perlu dilakukan pengembangan untuk mengurangi keterbatasan tersebut^[7].

Pengoperasian PEMFC juga memiliki permasalahan efisiensi berkaitan dengan sumber bahan bakar. Sumber bahan bakar hidrogen umumnya memiliki pengotor berupa karbon monoksida (CO). Pengotor akan bereaksi dengan katalis Pt yang berada di anoda. Kondisi ini menyebabkan fungsi katalis terhambat dan menurunkan efisiensi sistem. Oleh karena itu dibutuhkan sumber bahan bakar hidrogen dengan tingkat kemurnian tinggi. Hidrogen murni memiliki densitas rendah sehingga perlu *hydrogen storage* berupa tabung bertekanan tinggi. Namun kondisi ini sulit diaplikasikan pada *Fuel Cell Vehicle* (FCV) karena dengan begitu

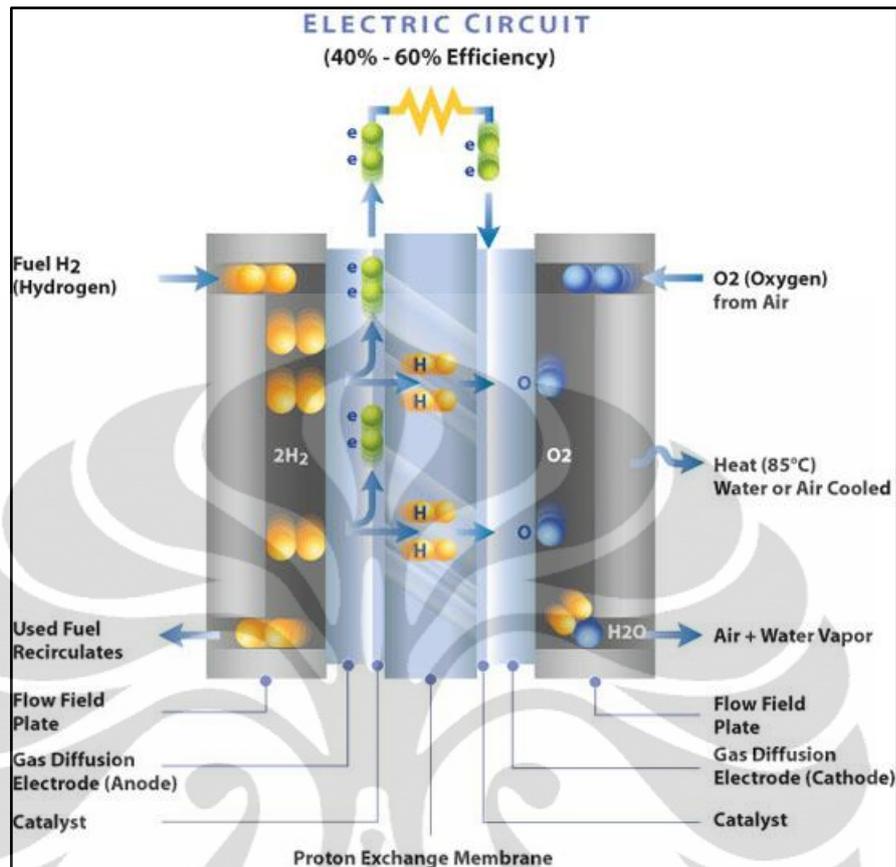
Universitas Indonesia

dibutuhkan kapasitas penyimpanan yang besar sehingga berat kendaraan meningkat. Solusinya adalah menggunakan sumber bahan hidrogen dengan densitas yang lebih besar sehingga kapasitas penyimpanan menjadi kecil, meskipun dibutuhkan tambahan biaya untuk membuat *fuel reformer*^[13].

PEMFC beroperasi pada kisaran temperatur 80°C. Hal ini membuatnya cepat bereaksi untuk menghasilkan energi yang dibutuhkan. Sel tunam ini memiliki rasio energi terhadap berat yang tinggi serta ketahanan korosi dan durabilitas komponen yang baik. Karakteristik tersebut menjadi dasar pemanfaatan PEMFC sebagai FCV dengan tingkat kebutuhan efisiensi yang tinggi. Pencapaian nilai efisiensi tersebut tentunya juga memerlukan pengaturan keseimbangan air dan panas hasil reaksi elektrokimia secara baik serta pengaturan kualitas sumber bahan bakar hidrogen^[4].

2.2.1 Prinsip Dasar PEMFC

Prinsip dasar PEMFC ini cukup sederhana, yaitu hidrogen dan oksigen akan bereaksi menghasilkan energi listrik. Selain itu, pada saat yang bersamaan terbentuk air (H_2O) dan panas sebagai hasil sampingan. Gas hidrogen bertekanan masuk ke dalam sisi anoda dari sel tunam, yang kemudian dialirkan melalui katalis dengan memberikan tekanan. Molekul H_2 akan terpecah menjadi dua proton H^+ dan dua elektron e^- setelah bersentuhan dengan logam platina yang berfungsi sebagai katalis^[14]. Dua proton H^+ tersebut bergerak menuju katoda dengan menembus membran tipis berpori yang dibantu oleh adanya medan listrik pada membran, sedangkan elektron yang terkonduksi di anoda akan keluar melalui *external wire* karena terhalang oleh membran menuju sisi katoda dari sel tunam dan dipergunakan untuk menghasilkan energi listrik^[15]. Gas oksigen akan dialirkan melalui katalis dan membentuk dua atom oksigen dimana masing-masing atom mempunyai satu pasang elektron dan menarik dua proton H^+ melalui membran sehingga akan bereaksi menghasilkan molekul air (H_2O). Mekanisme cara kerja PEMFC dapat dilihat pada Gambar 2.2.



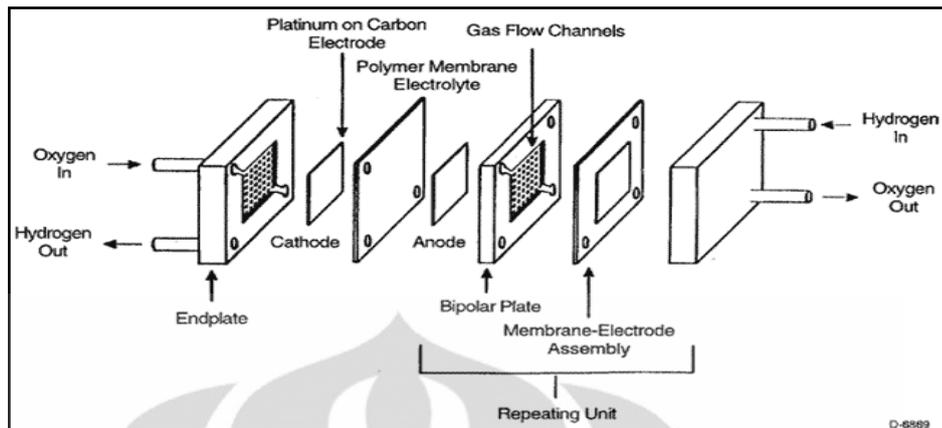
Gambar 2.2 Mekanisme PEMFC^[16]

Sumber: <http://archive.kaskus.us/thread/4740135>

Secara teoritis, substansi apapun yang mempunyai kemampuan oksidasi kimia dapat digunakan sebagai bahan bakar pada anoda sel tunam. Pada katoda, cairan apapun yang dapat tereduksi secara sempurna juga dapat digunakan sebagai oksidan. Namun harga, ketersediaan, dan reaktivitas menjadi pertimbangan dalam penggunaannya dalam aplikasi sel^[15].

2.2.2 Struktur Sistem PEMFC

PEMFC memiliki beberapa komponen primer yang memegang peranan penting dalam menjalankan fungsi dari PEMFC itu sendiri, yaitu *Membrane Electrolyte Assembly* (MEA), pelat bipolar, *endplate*, dan pengumpul arus. Susunan komponen PEMFC dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Struktur Sistem PEMFC^[17]

Sumber: *Typical PEM fuel cell stack construction* (Woodman 1999)

Karakter dan fungsi dari komponen utama dalam PEMFC, secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2 Komponen penyusun PEMFC^[7]

Komponen	Material	Fungsi
Membrane Electrolyte Assembly (MEA)	Terdiri dari dua elektroda, satu membran elektrolit, dan dua <i>Gas Diffusion Layer</i> . Polimer solid terimpregnasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda.	<ul style="list-style-type: none"> • Memisahkan reaksi setengah sel antara anoda-katoda. • Mendistribusikan proton dari anoda ke katoda. • Mendistribusikan gas secara merata pada lapisan difusi gas kedalam lapisan katalis. • Mengalirkan elektron dari area aktif menuju pelat bipolar. • Membantu pengaturan air.
Pelat Bipolar	Grafrit, <i>stainless steel</i> , atau komposit polimer.	<ul style="list-style-type: none"> • Mendistribusikan gas di area aktif membran. • Mengalirkan elektron dari anoda ke katoda. • Mendistribusikan air keluar sel.
End Plate		Membentuk rangkaian PEMFC yang terintegrasi.
Pengumpul Arus	Logam dengan kontak elektrik & konduktivitas yang baik (Cu).	Menyimpan dan mentransfer arus dari dalam menuju keluar sirkuit.

Sumber: *Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)* (Yuhua Wang : 2006)

2.3 Pelat Bipolar pada PEMFC

Pelat bipolar merupakan komponen yang memiliki fungsi utama dalam sistem PEMFC dikarenakan memiliki fungsi ganda, yaitu mengalirkan gas ke *gas diffusion layer* melalui *flow channel* dan mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda^[18]. Pelat bipolar banyak mendapat perhatian dari kalangan ilmuwan karena beratnya mempengaruhi hampir 70-90% berat sel dan harga komponennya dapat mencapai 30-60% dari harga total sehingga perlu diperhatikan penggunaan dan pengembangan dari material serta desain pelat bipolar.

Dalam susunan sel bahan bakar, pelat bipolar memisahkan gas yang ada pada sel, mengalirkan arus listrik dan juga berperan sebagai penyokong struktur dari sel. Pelat bipolar mempunyai *flow channel* di kedua sisinya, yang membentuk kutub anoda dan katoda yang saling berlawanan pada sisi pelat. Dalam sel tunggal, pelat pemisah hanya memiliki *flow channel* pada satu sisi, biasa dinamakan pelat monopolar^[19].

Adanya dua kutub pada pelat, membuat fungsi pelat bipolar menjadi lebih kompleks, yaitu^[7]:

- a. mampu untuk membawa elektron menuju sirkuit, termasuk: mengumpulkan dan mengalirkan elektron dari anoda dan katoda, menghubungkan komponen sel membentuk susunan sel tunam yang menghasilkan tegangan,
- b. mampu mengalirkan gas secara merata ke seluruh elektroda,
- c. memisahkan oksidan dan gas bahan bakar, dan mengangkut gas H₂ menuju anoda serta gas O₂ menuju katoda yang kemudian menghasilkan air,
- d. menyediakan kekuatan mekanis dan ketangguhan yang baik agar dapat menyokong membran dan elektroda,
- e. menyediakan konduksi termal untuk mengatur temperatur bahan bakar dan melepaskan panas dari elektroda ke bagian pendingin.

Banyaknya fungsi pelat bipolar, menyebabkan material yang dibutuhkan untuk membentuk pelat bipolar harus memenuhi kriteria sebagai berikut^[20]:

- a. memiliki kekuatan yang baik sehingga dapat menyokong komponen lainnya
- b. memiliki permeabilitas yang baik
- c. dapat diproses dengan mudah

- d. memiliki berat dan volum yang rendah sehingga dapat digunakan pada transportasi
- e. memiliki ketahanan pada temperatur sekitar 80° C

Fungsi pelat bipolar yang dapat mengalirkan arus listrik, menyebabkan material pelat harus mempunyai konduktivitas yang tinggi dan dapat mengalirkan gas. Selain itu, material yang digunakan juga memiliki ketahanan korosi yang baik karena kondisi operasi pelat bipolar pada pH 2-3 sehingga cenderung akan membentuk lapisan oksida yang akan mengganggu katalis serta dapat meningkatkan ketahanan listrik dari pelat.

Pelat bipolar PEMFC umumnya dibuat dengan menggunakan grafit dan *stainless steel*^[19]. Material grafit memiliki konduktivitas yang tinggi, lebih inert, dan tahan terhadap korosi, namun harganya cukup mahal baik dari material maupun biaya produksi, begitu pula dengan *stainless steel*. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengembangan material baru. Target keberhasilan dalam mengembangkan pelat bipolar untuk PEMFC mengacu pada standar *US Department of Energy* (DOE), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3.

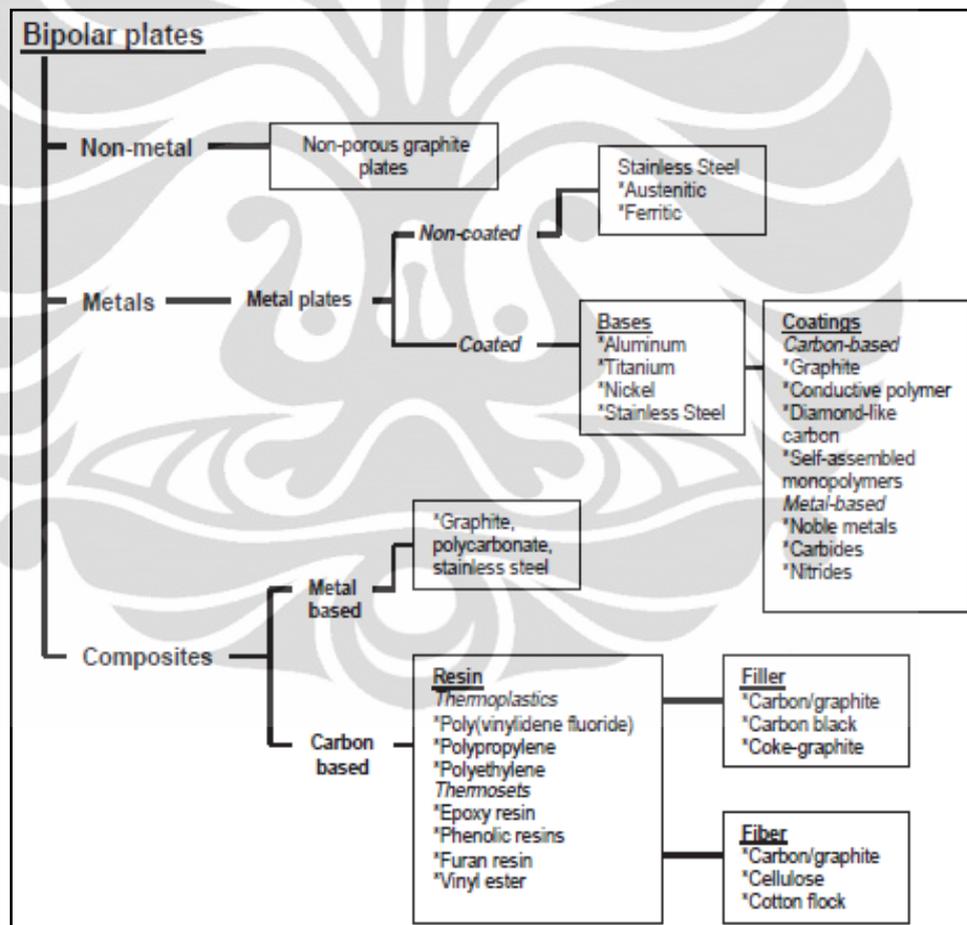
Tabel 2.3 Target teknis DOE untuk pelat bipolar^[21]

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

Sumber: *Advanced Energy Technology, Inc.*, 2006

2.3.1 Klasifikasi Pelat Bipolar

Pelat bipolar harus dibuat dari material yang memiliki sifat konduktivitas listrik yang tinggi dan tidak dapat dilewati oleh gas atau memiliki sifat permeabilitas yang rendah. Sifat tersebut dibutuhkan untuk menghasilkan aliran elektron yang baik dalam sistem operasi sel tunam. Sifat tersebut dapat diperoleh dari beberapa material dasar pembentuk pelat bipolar seperti material grafit, logam, maupun komposit^[22]. Material dasar tersebut memiliki sifat tertentu yang membedakan proses fabrikasi, biaya produksi serta aplikasi dari pelat bipolar. Jenis-jenis material dasar penyusun pelat bipolar dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Klasifikasi material pelat bipolar^[22]

Sumber: *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (2005) 1297–1302

Setiap material dasar yang digunakan sebagai penyusun pelat bipolar difungsikan untuk aplikasi tertentu yang spesifik. Material tersebut memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing yang menjadi dasar perbedaan

pemanfaatannya, seperti terlihat pada Tabel 2.4. Hal ini dikarenakan dalam kondisi pengaplikasian yang berbeda maka dibutuhkan sifat pelat bipolar yang berbeda pula baik dari segi sifat mekanis, sifat kimia, sifat kelistrikan maupun sifat termal.

Tabel 2.4 Kelebihan dan kekurangan material penyusun pelat bipolar^[20]

Material	Kelebihan	Keterbatasan
Grafit	<ul style="list-style-type: none"> • Ketahanan korosi baik. • Resistivitas rendah. • Resistansi kontak rendah. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sifat mekanik yang buruk (getas). • Porositas • Volume dan berat yang besar. • Biaya produksi tinggi.
Komposit Karbon-Karbon	<ul style="list-style-type: none"> • Densitas rendah. • Ketahanan korosi baik • Resistansi kontak rendah. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kekuatan mekanik rendah. • Konduktivitas listrik rendah. • Harga relatif mahal.
Komposit Karbon-Polimer	<ul style="list-style-type: none"> • Relatif murah. • Ketahanan korosi baik. • Densitas rendah. • Tidak perlu adanya permesinan tambahan untuk membuat <i>flow field</i>. • Ketersediaan bahan baku. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kekuatan mekanik rendah. • Konduktivitas listrik rendah.
Logam	<ul style="list-style-type: none"> • Konduktivitas listrik tinggi. • Konduktivitas panas tinggi. • Biaya produksi rendah. • Sifat mekanik baik • Proses fabrikasi relatif mudah. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rentan terjadi korosi (terbentuk oksida pada membran)

Sumber: *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells – From Materials to Processing* (Xiao Zi Yuan, et al: 2006)

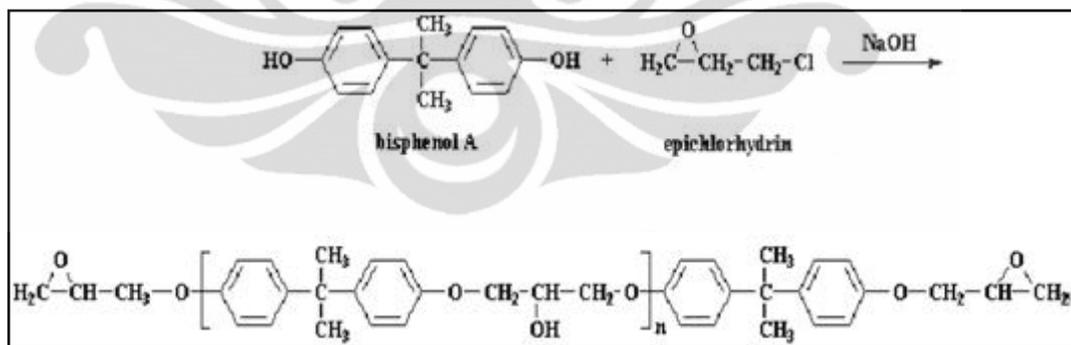
Pertimbangan dari segi ekonomi juga menjadi bagian penting. Pemilihan material yang tepat sebagai penyusun pelat bipolar perlu dilakukan dengan cermat agar penggunaan sel tunam sebagai penghasil energi listrik dapat bernilai ekonomis dan memiliki efisiensi yang tinggi.

2.3.2 Material Penyusun Pelat Bipolar

Material penyusun pelat bipolar perlu mendapat perhatian karena sifat dan karakteristik dari pelat bipolar yang dihasilkan bergantung pada material yang digunakan.

2.3.2.1 Resin Epoksi

Epoksi merupakan salah satu jenis termoset yang tidak dapat menerima siklus pemanasan dan pendinginan secara berkelanjutan, seperti yang ditunjukkan oleh polimer jenis termoplastik. Ketika dipanaskan pada tahap awal, polimer ini akan melunak dan mampu mengalir di dalam cetakan. Namun pada temperatur yang tinggi, epoksi akan mengalami reaksi kimia sehingga menjadi keras dan tidak mampu kembali ke bentuk semula sehingga jika dipanaskan ulang, epoksi tidak mampu melunak kembali melainkan akan terdegradasi. Epoksi juga merupakan salah satu jenis polimer yang mengalami proses *curing*, baik secara polimerisasi maupun *cross link* ketika dicampur dengan unsur katalis atau *hardener*. Biasanya epoksi resin dihasilkan dari reaksi antara *epichlorohydrin* dan *bisphenol A*, seperti yang terlihat pada Gambar 2.5.



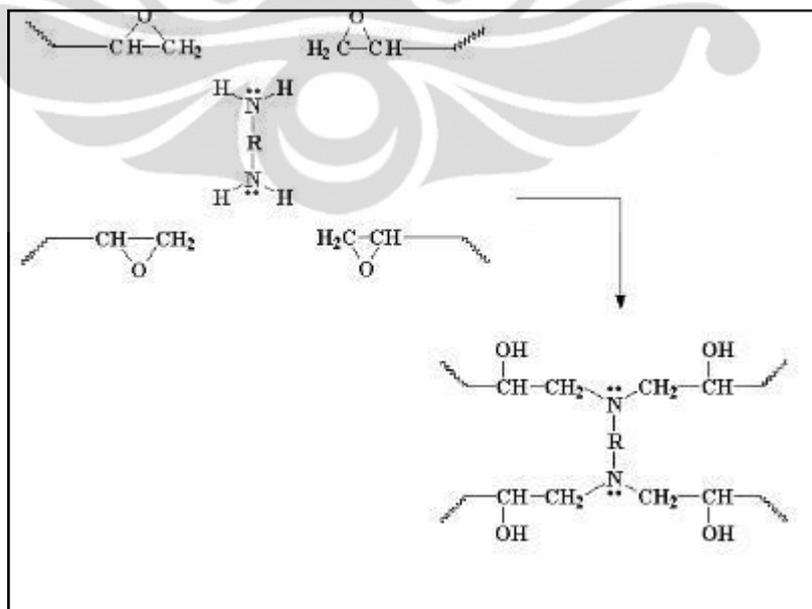
Gambar 2.5 Reaksi pembentukan epoksi^[23]

Sumber: <http://www.huntsman.com/advanced materials/index.cfm?PageID=5865>

Struktur kimia dan berbagai macam proses reaksi *curing* akan mempengaruhi sifat dari epoksi. Pada umumnya, epoksi memiliki sifat, sebagai berikut^[23]:

- a. Kekuatan adhesi yang sangat baik
- b. Ketahanan yang baik terhadap panas dan zat kimia lain
- c. Memiliki *moisture resistance* yang baik
- d. Sifat mekanis yang cukup baik (tergantung jenis epoksi)
- e. Sifat *electrical insulating* (isolator listrik) yang sangat baik
- f. Dengan mudah dapat diperbaiki sifatnya, misalnya konduktivitas listrik dapat mudah ditingkatkan dengan penambahan material lain yang mampu menghantarkan listrik dengan baik.

Pada pembuatan pelat bipolar dengan material komposit berbasis karbon, epoksi dapat digunakan sebagai pengikat. Hal ini dikarenakan epoksi memiliki daya isi dan menjadi matriks yang baik pada sistem komposit. Selain itu reaksi yang terjadi antara epoksi resin dengan unsur lain tidak memerlukan daya pembasahaan yang besar sehingga proses pencampuran menjadi lebih sederhana. Reaksi yang terjadi antara resin epoksi dan *hardener* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



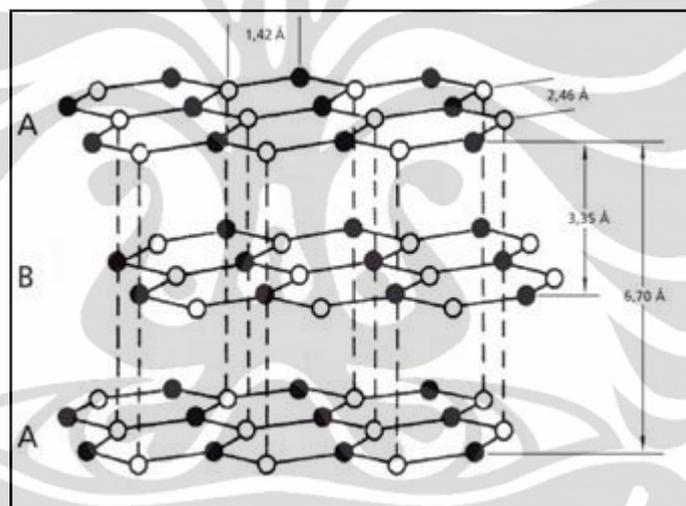
Gambar 2.6 Reaksi antara epoksi resin dan *hardener*^[23]

Sumber: <http://www.psrc.usm.edu/macrog/epoxy.html>

Pada komponen pelat bipolar, epoksi resin dicampurkan dengan *hardener* dengan tujuan untuk menghasilkan reaksi *curing* sehingga diperoleh polimer yang mempunyai sifat mekanis baik. Umumnya, proses *curing* yang dilakukan dengan pemberian panas akan menghasilkan polimer dengan ketahanan terhadap panas dan bahan kimia yang baik dibandingkan dengan proses *curing* pada temperatur ruang^[23].

2.3.2.2 Grafit

Grafit adalah salah satu bentuk modifikasi dari karbon yang menyerupai struktur dari intan.



Gambar 2.7 Struktur kristal grafit^[24]

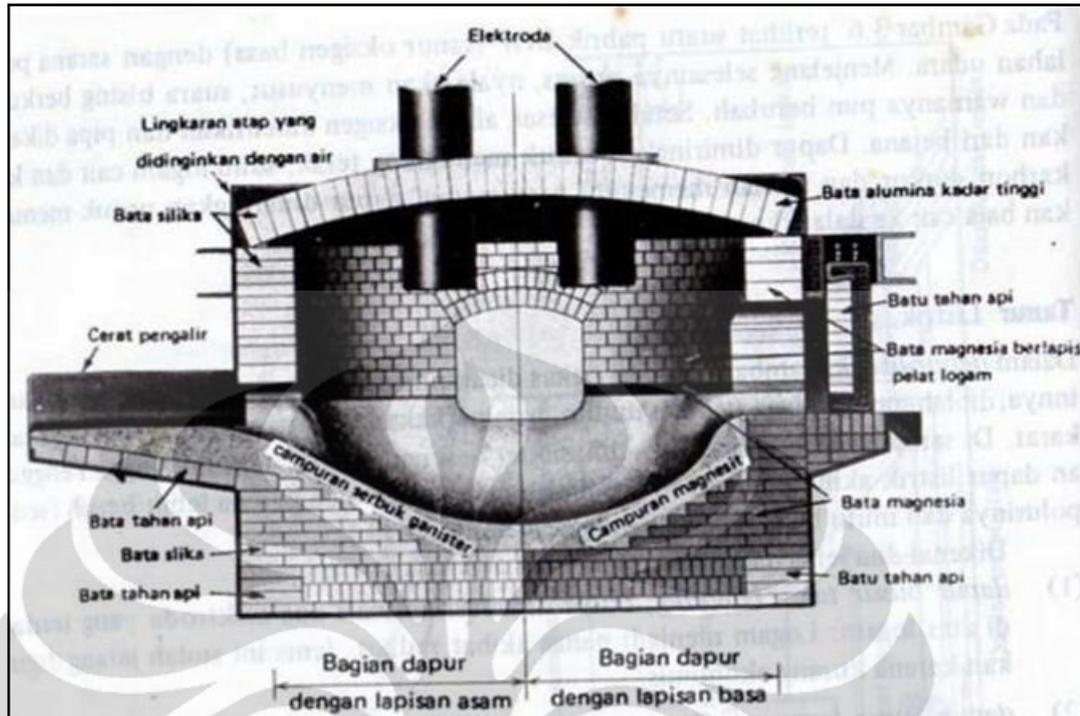
Sumber: *Technical Information: Graphite for Polymer Materials*, GK KROPFMUHL

Gambar 2.7 menunjukkan struktur kristal grafit adalah heksagonal yang tersusun atas atom karbon yang terbentuk dari kisi planar dengan ikatan kovalen dan antar lapisannya memiliki ikatan Van der Waals^[24]. Perbedaan jenis ikatan ini menimbulkan derajat anisotropik pada grafit. Perbedaan jenis ikatan ini berada dalam arah kristalografi yang berbeda. Sebagai contoh, grafit mampu berlaku sebagai pelumas padat sebagai akibat dari sifat anisotropik tersebut. Ikatan Van der Waals yang lemah memungkinkan tiap lapisan bergerak secara individual dan memberikan sifat lubrikasi yang baik^[25].

Keunikan sifat dari grafit berasal dari keistimewaan struktur lapisan dan sifat inert terhadap kimia menjadikan material ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi karena^[24]:

- a. Memiliki konduktivitas panas dan listrik yang sangat baik
- b. Memiliki sifat pelumasan yang baik pada tekanan dan temperatur yang tinggi
- c. Ketahanan oksidasi dan daya tahan terhadap unsur kimia tinggi
- d. Kemampuan untuk mengikat molekul kimia diantara lapisan grafit

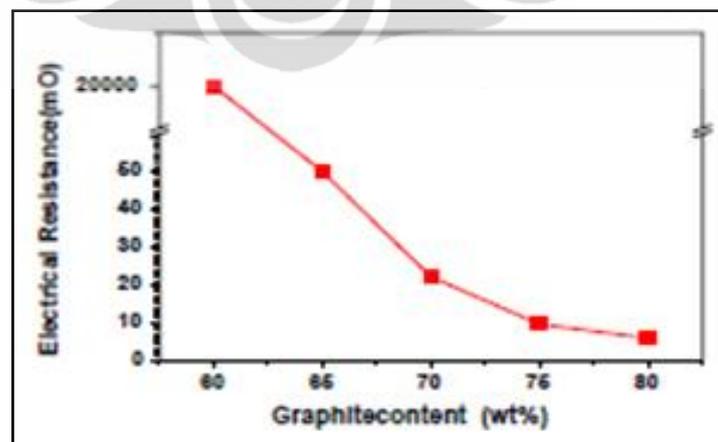
Grafit alami terbentuk akibat tekanan dan panas yang tinggi dari dalam bumi, sedangkan grafit sintesis terbentuk secara mekanis, dimana grafit ini memiliki kekuatan mekanik yang tinggi dan mengandung sedikit abu. Pada proses peleburan besi dan baja, khususnya menggunakan tungku busur listrik seperti Gambar 2.8, dibutuhkan suatu elektroda yang berfungsi untuk menghantarkan arus yang besar sehingga dapat melebur besi spons (*sponge iron*) dan besi tua (*scrap*) sebagai bahan baku utama pembuatan besi dan baja. Material yang memiliki konduktivitas yang tinggi dibutuhkan untuk mencapai tujuan tersebut sehingga dapat menghasilkan busur listrik. Oleh karena itu, grafit dipilih sebagai material utama untuk aplikasi elektroda karena memiliki konduktivitas yang tinggi. Grafit yang digunakan sebagai elektroda adalah grafit sintesis yang diperoleh dengan memanaskan karbon pada temperatur tinggi.



Gambar 2.8 Tungku busur listrik^[26]

Sumber: <http://bajabesi.blogspot.com/>

Grafrit limbah proses peleburan besi baja digunakan penguat pada sistem komposit dikarenakan harganya yang murah dibandingkan grafit sintesis lainnya dan juga mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah elektroda. Grafit dapat berfungsi sebagai aditif konduktif yang dapat mengurangi resistansi listrik dari komposit pelat bipolar, seperti yang terlihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Pengaruh jumlah grafit terhadap resistansi listrik^[27]

Sumber: *Journal of Power Sources* 134 (2004) 7–17

Ukuran, arah dan bentuk dari partikel grafit juga akan mempengaruhi sifat yang dihasilkan, terutama konduktivitas listrik. Grafit yang memiliki arah orientasi partikel yang tegak lurus terhadap arah penekanan pada saat pencetakan akan memiliki nilai konduktivitas yang lebih baik dibandingkan dengan arah orientasi yang sejajar dengan arah penekanan^[28], seperti dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Pengaruh ukuran dan bentuk partikel dari grafit^[28]

Sample	Particle Size	Direction	Bulk Electrical Conductivity (S/cm)	Thermometric Conductivity [W/(m.°C)]	Flexural Strength (MPa)
Spherical Graphite	44-63 μm	//	84	18.9	39.5
		\perp	387.3	71.9	
	< 44 μm	//	60	12.5	44
		\perp	326.9	61.4	
Flake-like Graphite	44-63 μm	//	76	20.3	35
		\perp	566.5	113	
	< 44 μm	//	45.8	13	39.8
		\perp	420.3	105.5	

Sumber: *Influence of graphite particle size and its shape on performance of carbon composite bipolar plate.*

Selain itu, kekuatan fleksural dari grafit yang berbentuk bulat lebih baik daripada grafit dengan bentuk *flake* karena tegangan yang diterima oleh grafit akan tersebar merata di seluruh permukaannya sehingga regangan yang terjadi akan semakin kecil. Pada Tabel 2.5 terlihat pula bahwa semakin kecil ukuran dari partikel akan menurunkan nilai konduktivitasnya, namun akan meningkatkan kekuatan fleksuralnya.

2.3.2.3 Carbon Black

Carbon black merupakan partikel yang terbentuk dari karbon sebagai unsur penyusun utama, yang memiliki mikrostruktur hampir sama dengan grafit. Umumnya *carbon black* dihasilkan dari proses pembakaran tidak sempurna dari hidrokarbon cair. Klasifikasi *carbon black* dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Klasifikasi manufaktur dan penggunaan *carbon black*^[29]

Chemical Process	Production Process	Feedstock	Uses
Thermal-oxidation decomposition			
Closed System (Turbulent flow)	Furnace black process	Aromatic oils based on coal tar or crude oil, natural gas	Tires, non-tire rubber applications, and pigments
	Lampblack process	Aromatic oils based on coal tar or crude oil	Mechanical rubber goods, electrodes, and carbon brushes
Open system (Diffusion flames)	Dequssa gas black process	Coal tar distillates	Mechanical rubber goods, electrodes, and carbon brushes
	(Channel black process)*	Natural gas	Pigments
Thermal decomposition			
Discontinuous	Thermal black process	Natural Oas (Oils)	Speciality applications
Continous	Acetylene black process	Acetylene	Electric cells and conductive and antistatic rubber and plastic applications

Sumber: <http://www.chem.mtu.edu/org/ctc/pdf/ehw%20dissertation.pdf>

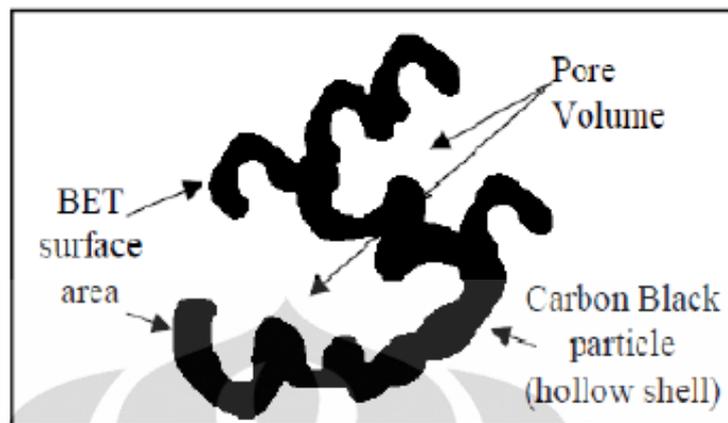
Fungsi dari *carbon black* ditentukan dari kombinasi antara komposisi kimia karbon, energi permukaan, dan partikel. Umumnya, sifat *carbon black* berhubungan dengan proses pelarutan yang bergantung pada ukuran dan struktur partikel^[30].

a. Ukuran Partikel/Luas Permukaan

Ukuran dari partikel dan luas permukaan akan menentukan sifat yang dihasilkan dari *carbon black*. Ukuran partikel yang kecil akan lebih mudah untuk dibasahi dan dapat dengan mudah larut ketika dicampur dengan material lain daripada *carbon black* yang memiliki ukuran yang besar. Hal tersebut dikarenakan partikel kecil memiliki luas permukaan yang tinggi.

b. Struktur

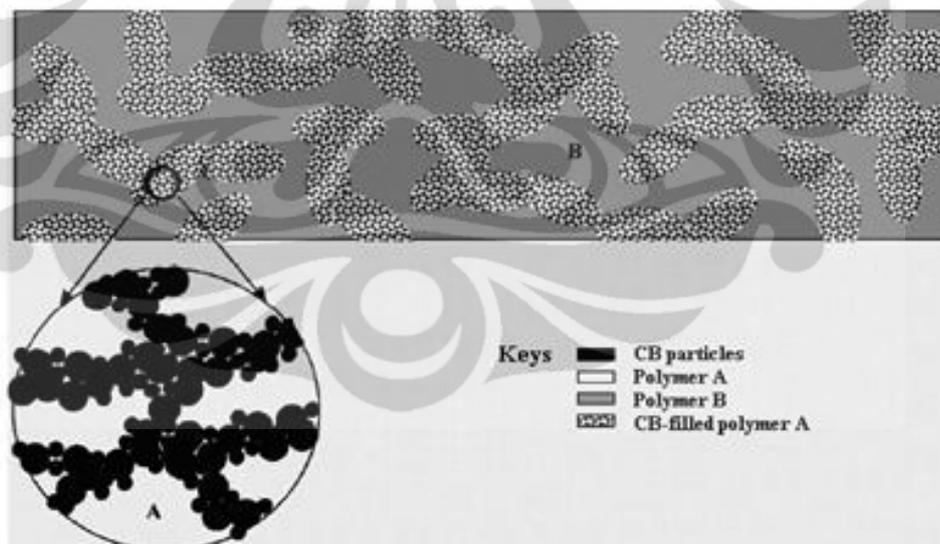
Carbon black berpengaruh terhadap daya pembahasan, seperti dapat dilihat pada Gambar 2.10. Saat *carbon black* dicampurkan dengan polimer resin, maka resin akan mengisi bidang kosong dari karbon dan membentuk ikatan kimia yang baik.



Gambar 2.10 Struktur dari *carbon black*^[29]

Sumber: <http://www.chem.mtu.edu/org/ctc/pdf/ehw%20dissertation.pdf>

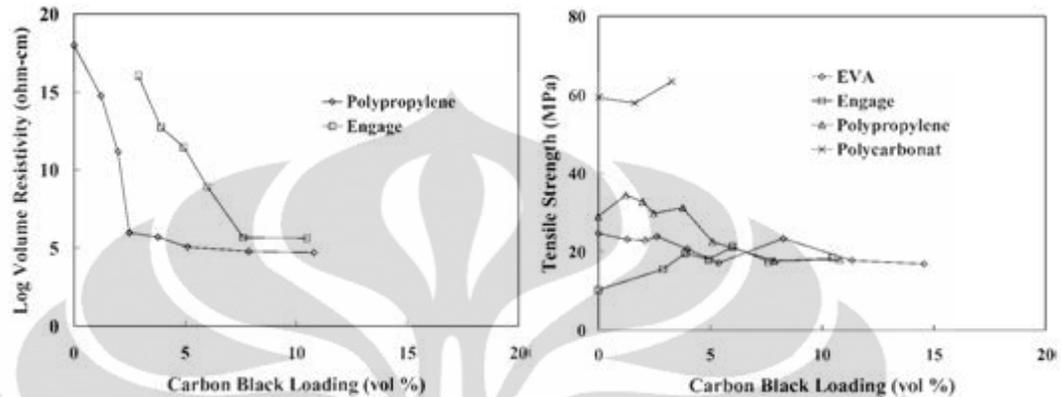
Pada sistem komposit, partikel grafit dan *carbon black* sebagai pengikat dengan polimer akan membentuk jaringan antar karbon sehingga dengan mudah dapat mengalirkan arus listrik dan mengurangi efek isolator dari polimer, dengan skema yang dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Skema *carbon black* pada sistem komposit^[20]

Sumber: *International Journal of Hydrogen Energy* (2005) 257-268

Namun, penambahan *carbon black* dengan jumlah yang besar akan menurunkan sifat mekanis dari pelat bipolar karena *carbon black* memiliki struktur yang berpori sehingga beban yang dapat diterima oleh pelat menjadi berkurang^[31], seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Pengaruh penambahan *carbon black*^[15]

Sumber: <http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd032706165027/unrestrictedNJalani.pdf>

2.3.2.4 Metanol

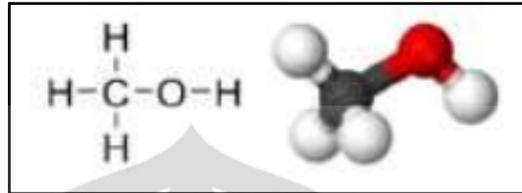
Metanol yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar ini berfungsi sebagai pelarut dan pengencer untuk resin epoksi serta epoksi *hardener*, sehingga epoksi dapat bercampur dengan grafit dan *carbon black*. Dengan adanya metanol, daya pembasahan epoksi terhadap grafit serta *carbon black* meningkat dan dapat membasahi seluruh permukaan grafit sehingga ikatan yang terbentuk antara grafit dan *carbon black* dengan epoksi menjadi lebih kuat. Sifat umum metanol dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Sifat umum metanol^[32]

Molecular Formula	CH ₃ OH
Molar mass	32.05 gr/mol
Appearance	Colorless liquid
Density	0.7918 gr/cm ³
Melting point	-97°C, -142.9°F (1.76 K)
Boiling point	64.7°C, 148.4°F (337.8 K)
Solubility in water	miscible

Sumber: <http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol>

Metanol sebenarnya adalah zat kimia beracun dengan formula CH_3OH . Struktur metanol dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Struktur Metanol^[32]

Sumber: <http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol>

2.4 Metode Fabrikasi

2.4.1 *Mixing*

Dalam pembuatan pelat bipolar pada penelitian ini, pencampuran antara grafit dan *carbon black* dilakukan dengan menggunakan alat *planetary ball mill* seperti dapat dilihat pada Gambar 2.14. *Planetary ball mill* didesain untuk proses pencampuran, penggilingan (*fine grinding*), preparasi sampel dalam jumlah kecil, pengembangan produk baru, serta memproduksi material berteknologi tinggi dengan volume kecil^[33].



Gambar 2.14 NQM-0.4 Model *Planetary Ball Mill*^[33]

Sumber: www.mtixtl.com

Pencampuran ini dilakukan agar partikel *carbon black* dapat terdistribusi secara merata (homogen) di dalam grafit sebelum dilakukan proses pembentukan bakalan. Dengan melakukan proses *mixing* di dalam *planetary ball mill*, efektifitas dan efisiensi dapat tercapai. Spesifikasi *planetary ball mill* tersebut dapat kita lihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Spesifikasi *planetary ball mill*^[33]

Voltage	AC 208-240V , 50 / 60Hz, single phase
Power	500W
Speed Adjustment	Variable by changing frequency of AC motor
Rotary Rate	Main plate rotation in cycle: 30-350 rpm Mixing tank rotation in its selves: 60-700 rpm
Digital display	<ul style="list-style-type: none"> • Digital display the speed in RPM • Timer controls major platen's running time from 1 to 999 minutes • Timer control tank rotation time from clockwise to anticlockwise direction: 1- 99 minutes
Dimension	450 x 490 x 530 mm
Net Weight	55 kg
Tank (Jar)	<ul style="list-style-type: none"> • Four 500 ml Alumina jars are included • 32 ZrO₂(YSZ) balls with various size are included (8 balls per jar) <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div> <p>500 ml Alumina Jar (Included) 4-pcs o-rings 500ml SS jar (Optional)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alumina jars and vacuum stainless steel jar without vacuum are available up to 500 ml at extra cost (click above picture to enlarge)
Shipment Dimension	45" x30" x 38"
Shipment weight	180 Lbs

Sumber: www.mtixtl.com

Proses *mixing* ini dilakukan dengan cara menaruh campuran serbuk *carbon black* dan grafit ke dalam wadah (*jar*) yang didalam setiap jarnya diletakkan dua buah bola baja tahan karat sebagai bola penggiling. Wadah tersebut berfungsi sebagai tempat sekaligus penahan gerakan bola-bola penggiling dan campuran serbuk saat proses *mixing* dilakukan. Untuk penelitian ini, bola penggiling lebih berfungsi sebagai alat pencampur serbuk agar terbentuk campuran yang memiliki

Universitas Indonesia

homogenitas baik. Bola penggiling yang dipergunakan adalah bola dengan bahan baja tahan karat yang memiliki kekerasan tinggi sehingga resiko terjadinya kontaminasi akibat efek benturan antara serbuk, bola penggiling, dan dinding wadah lebih rendah.

Hasil yang diperoleh dari proses pencampuran dengan *planetary ball mill* ini akan sangat bergantung kepada komposisi bahan yang kita pakai dan parameter prosesnya, seperti waktu pencampuran dan kecepatan perputarannya. Pada penelitian ini, waktu *mixing* 75, 90, 105, 120, dan 135 menit menjadi faktor penentu dari hasil pencampuran yang diperoleh karena kecepatan putar yang dipakai konstan yaitu sebesar 360 rpm.

2.4.2 Compression Moulding (Hot Pressing)

Compression moulding merupakan cara yang sederhana dan efektif bagi komposit polimer dengan komposisi bahan pengisi tinggi. Dengan *compression moulding* campuran serbuk tidak perlu dibuat menjadi sangat cair sehingga komposisi bahan pengisi berbasis polimer dapat menjadi lebih tinggi dalam komposit yang menyebabkan konduktivitas listrik dapat tercapai sesuai dengan yang diinginkan^[14].

Sebagian besar dari proses *compression moulding* yang digunakan dalam literatur^[14] dimulai dengan senyawa serbuk atau campuran yang dipreparasi dengan *kneader* atau *extruder* pada temperatur yang sesuai dari resin polimer dan partikel konduktif. Campuran serbuk tersebut kemudian dimasukkan ke dalam cetakan yang dipanaskan, dimana campuran tersebut dapat mengalir, mengisi lubang lubang cetakan, kemudian dicetak dengan tekanan langsung pada pelat bipolar. Apabila material polimernya adalah resin termoset, konversi kimia dari resin harus terjadi sebelum pelat dipindahkan dari cetakan, dengan kata lain harus diperhatikan waktu pencetakannya^[14]. Keuntungan penggunaan proses *compression*, yaitu bahwa campuran serbuk tidak perlu untuk dibuat menjadi sangat cair^[14]. Oleh karena itu, dapat digunakan matriks polimer dalam sistem komposit pelat bipolar sehingga konduktivitas listrik yang memadai dapat tercapai. Gambar 2.15 menunjukkan alat *compression moulding* yang dipakai pada penelitian ini. Untuk pencetakan pelat bipolar dengan variasi waktu *mixing*

ini, tekanan dan temperatur penekanan yang digunakan merupakan tekanan dan temperatur maksimum dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, yaitu sebesar: 55 MPa dan 100°C dengan waktu penekanan selama 4 jam^[34,35].



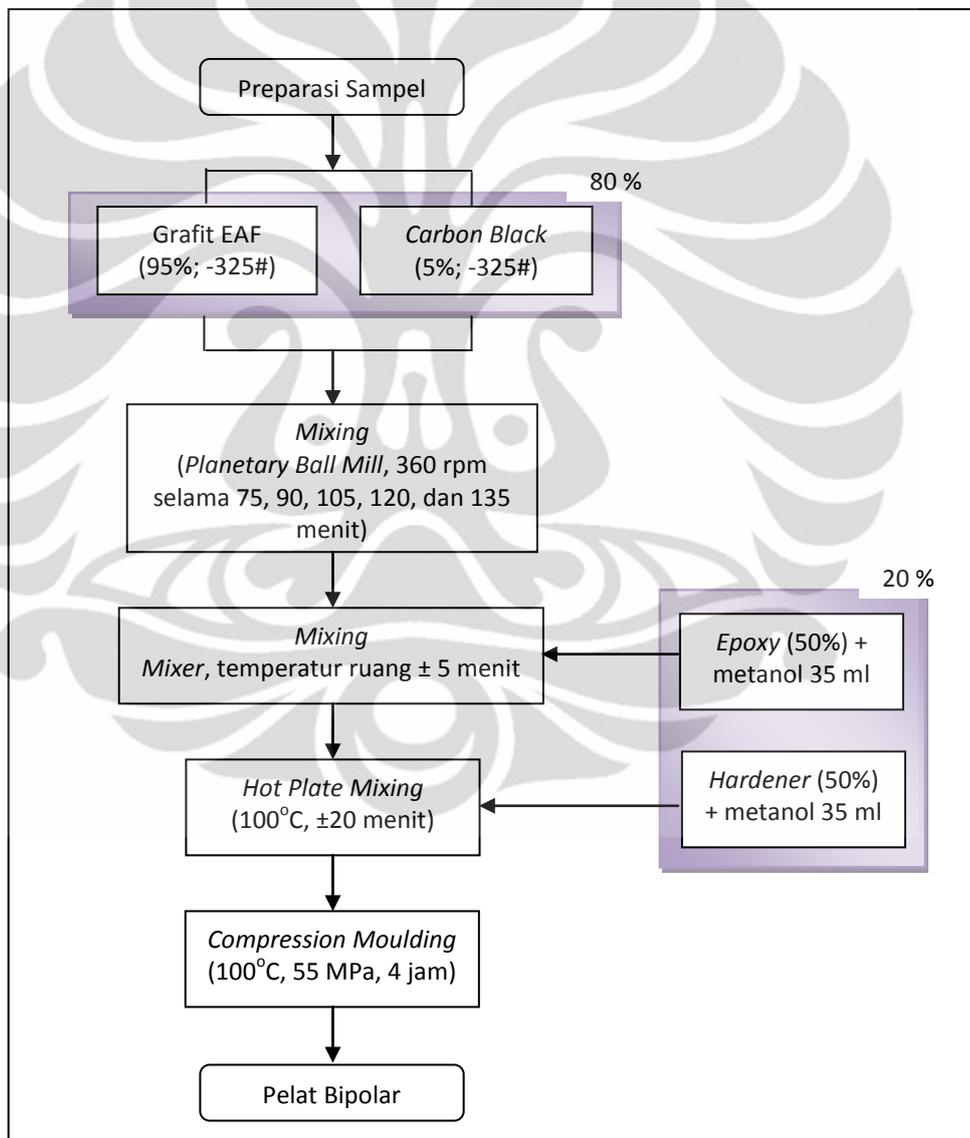
Gambar 2.15 Mesin *hydraulic press*

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1.1 Diagram Alir Fabrikasi Pembuatan Pelat Bipolar

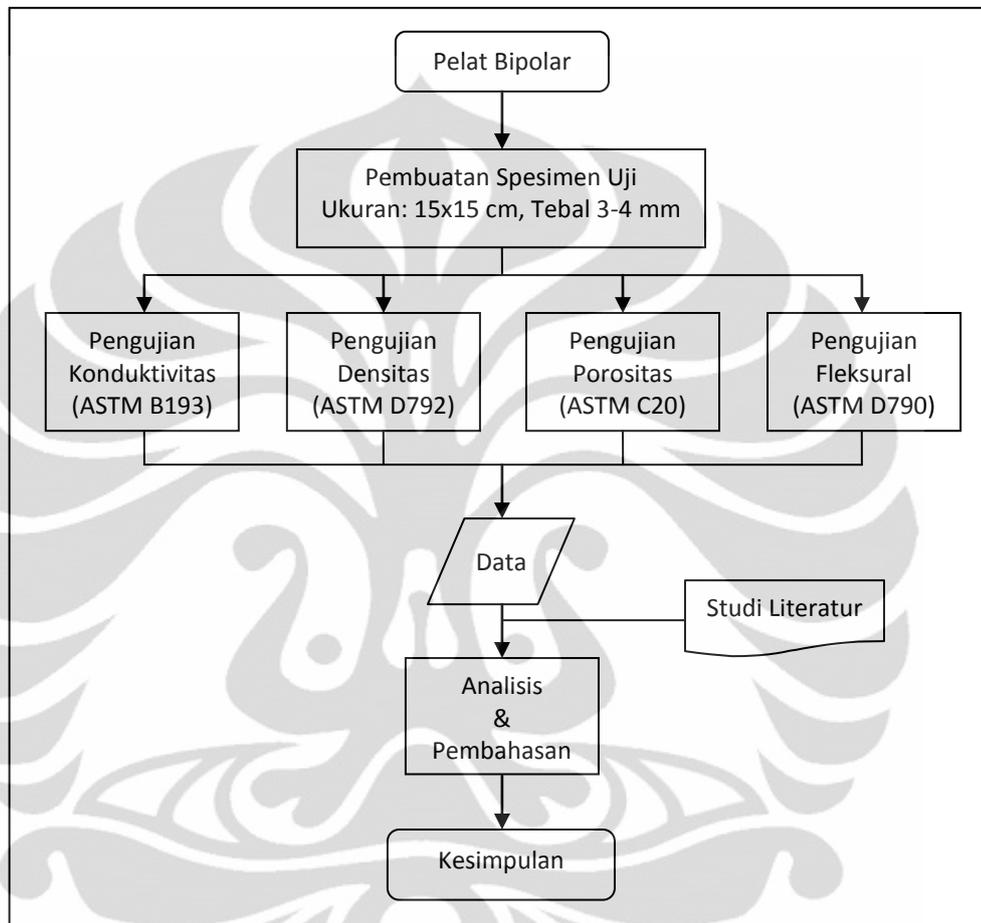
Gambar 3.1 berikut ini menunjukkan diagram alir sebagai gambaran pembuatan pelat bipolar karbon komposit yang dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian (fabrikasi pelat bipolar)

3.1.2 Diagram Alir Karakterisasi Sampel

Gambar 3.2 berikut ini menunjukkan diagram alir dari pengujian-pengujian pada pelat bipolar karbon komposit yang dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian (karakterisasi pelat bipolar)

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Peralatan yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar serta pengujian karakterisasi pada pelat tersebut adalah sebagai berikut:

1. *Beaker Glass* 1000 ml dan 100 ml
2. Cetakan Pelat *stainless steel* ukuran 15 cm x 15 cm
3. Gelas Ukur
4. Gergaji
5. *Hot Plate*

6. Kertas Amplas 80#, 500#, dan 1000#
7. Masker
8. *Mixer*
9. Oven
10. Pipet Volume
11. Penggaris
12. Sarung Tangan
13. Spatula
14. Termometer
15. Timbangan Digital
16. Tissue
17. *Hydraulic Pressure Machine*
18. *Planetary Ball Mill*
19. Alat Uji Densitas (ASTM D 792)
20. Alat Uji Konduktivitas *Veeco FPP 5000- four point probe detector*
21. Alat Uji Porositas (BET – ASTM C 20)
22. Alat Uji *Flexural, UTM T22K JJ-Loyd Instrument (Bending 3 titik – ASTM D 790)*

3.2.2 Bahan

Material yang dipakai untuk membuat pelat bipolar pada penelitian ini adalah material komposit dengan material berupa epoksi sebagai matriks serta grafit dan *carbon black* sebagai penguat (*reinforcement*). Pada penelitian, resin dan *hardener* yang digunakan masih memiliki kekentalan yang tinggi, sehingga diperlukan pelarut organik untuk mengencerkan bahan-bahan tersebut agar nantinya dapat bercampur secara merata dengan bahan-bahan pengisi konduktif ketika proses pencampuran. Pelarut yang digunakan adalah metanol. Berat total dari keseluruhan bahan-bahan yang digunakan adalah 144 gram.

3.2.2.1 Resin Epoksi

Resin yang dipakai pada penelitian ini adalah resin epoksi (*Bhispenol A-epichlorohydrin*) dan *hardener* (*Polyaminoamide*) dengan merek dagang Eposchön. Resin epoksi dipakai untuk mengikat bahan-bahan pengisi konduktif (grafit EAF dan *carbon black*) sedangkan epoksi *hardener* dipakai karena polimer epoksi memerlukan sebuah *coupling agent* yang berfungsi sebagai stimulan terjadinya proses polimerisasi dengan baik pada suhu ruang. Spesifikasi untuk resin epoksi dan *hardener* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2, sedangkan spesifikasi secara lengkap dapat dilihat pada lampiran 5 dan lampiran 6.

Tabel 3.1 Spesifikasi epoksi resin

Sifat	Nilai
Viskositas pada 25°C	16000-20000
<i>Epoxy equivalent (E/equiv)</i>	184-200
<i>Hydrolyzable chlorine content (%)</i>	< 0.05
<i>Colour according to the Gardner scale</i>	< 1

Tabel 3.2 Spesifikasi *hardener*

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

Perbandingan rasio penggunaan resin dan *hardener* pada penelitian ini adalah sebesar 1:1. Resin dan *hardener* yang digunakan merupakan 20% dari total berat keseluruhan bahan yang digunakan. Perhitungan jumlah tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.4.

3.2.2.2 Grafit EAF

Grafit yang dipakai berupa grafit elektroda busur listrik (*electric arc furnace*) yang merupakan sisa proses peleburan logam. Grafit yang didapat berupa bongkahan sehingga harus dihaluskan kemudian diayak terlebih dulu hingga mendapatkan ukuran partikel sebesar -325 mesh (kurang dari 44 μm). Penghalusan ukuran grafit dilakukan dengan memecah bongkahan, menumbuk dan menggerus dengan *planetary ball mill*, kemudian mengayaknya untuk mendapatkan ukuran butir yang seragam. Berat dari grafit sendiri sebesar 95% dari 80% total berat keseluruhan bahan pengisi konduktif yang digunakan. Perhitungan jumlah tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.4.

3.2.2.3 Carbon Black

Carbon black yang dipakai pada penelitian ini merupakan karbon arang yang dibuat sendiri yang dihasilkan dari proses pirolisis serat alami (serabut kelapa) pada temperatur $\pm 900^\circ\text{C}$ selama ± 10 jam. *Carbon black* ini merupakan material semi konduktif berstruktur amorf yang berfungsi sebagai penguat. *Carbon black* dengan luas permukaan yang tinggi (ukuran partikel yang kecil), akan mampu menyaring arus listrik dan membentuk jaringan karbon yang konduktif dengan grafit. Namun, struktur *carbon black* yang berpori akan mengurangi sifat mekanis dari komposit^[29]. *Carbon black* yang telah dibuat harus dihaluskan terlebih dulu sampai membentuk serbuk dengan ukuran partikel -325 mesh (kurang dari 44 μm). *Carbon black* yang dipakai sebanyak 5% dari keseluruhan 80% total berat keseluruhan bahan pengisi konduktif yang digunakan. Perhitungan jumlah tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.4.

3.2.2.4 Metanol

Metanol 0,1 M yang digunakan pada penelitian ini sebagai pengencer resin epoksi dan *hardener* sebelum dicampurkan dengan bahan-bahan pengisi konduktif lainnya. Dalam penelitian ini menggunakan metanol teknis dengan merek dagang *Brastaco*. Metanol dipilih sebagai pelarut karena sifatnya yang mudah menguap sehingga tidak akan menyisakan senyawa pengotor yang dapat mengganggu reaksi pada proses pencampuran. Pengenceran juga dapat membantu

homogenisasi pembasahan matriks terhadap bahan penguat. Metanol ini akan diuapkan pada saat proses *hot mixing* yang dilakukan sebelum proses *compression moulding*. Untuk mengetahui sifat dari methanol yang dipakai dapat dilihat pada Tabel 3.3 di bawah ini.

Tabel 3.3 Spesifikasi metanol

Formula	CH₃OH
Massa	32,05 gr/mol
Penampakan	Cairan tidak berwarna
Densitas	0,7918 gr/cm ³
Titik Leleh	7970°C / 7142,90°F / 176°K
Titik Didih	64,70°C / 148,40°F / 337,8°K
Kelarutan dalam air	Larut

Penggunaan metanol ini juga dapat mempengaruhi karakteristik pada pelat yang dihasilkan. Semakin banyak metanol yang dipakai, tingkat kelarutan epoksi dan *hardener* semakin tinggi dan distribusinya didalam bahan pengisi konduktif lebih homogen, begitu juga sebaliknya. Selain itu, saat pencetakan pelat, jika bakalan yang akan dicetak terlalu basah akan menyebabkan bakalan keluar dari cetakan saat proses *pressing* dan pelat yang dihasilkan memiliki ketebalan rendah serta memungkinkan terdapat retak. Sedangkan jika bakalan terlalu kering, pelat bipolar yang dihasilkan akan dapat memiliki permukaan yang buruk dan bersifat rapuh. Permasalahan ini dapat diatasi dengan metode *hot mixing* yang tepat, terutama dalam menentukan tingkat kebasahan dari bakalan yang akan dicetak. Penambahan metanol tersebut sebanyak 35 ml untuk masing-masing resin epoksi dan juga *hardener*.

3.3 Proses Pembuatan Sampel

3.3.1 Penghalusan

Pembuatan sampel ini dimulai dengan menghancurkan grafit yang berupa limbah untuk menghasilkan ukuran butir yang lebih halus dan homogen dengan grafit sintesis pabrikan. Ukuran butir grafit yang ingin dicapai adalah -325 mesh sesuai dengan ukuran butir maksimum pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan^[36]. Proses penghalusan ini dilakukan dengan menggunakan mortar dan juga *planetary ball mill*.

3.3.2 Penimbangan

Bahan-bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini ditimbang untuk mendapatkan takaran sesuai formulasi pada Tabel 3.4. Hasil penimbangan dimasukkan ke dalam *beaker glass* untuk proses selanjutnya.

Tabel 3.4 Komposisi pelat bipolar dan variasi waktu *mixing*

Kode Sampel	Pelat Bipolar Komposit (100%wt = 144 gr)				
	Reinforcement (80%wt = 115.2 gr)			Matriks Polimer (20%wt = 28.8 gr)	
	Grafit EAF (95%wt)	Carbon Black (5%wt)	Variasi Waktu Milling	Epoksi (50%wt)	Hardener (50%wt)
	gr	gr	menit	gr	gr
A	109.44	5.76	75	14.4	14.4
B	109.44	5.76	90	14.4	14.4
C	109.44	5.76	105	14.4	14.4
D	109.44	5.76	120	14.4	14.4
E	109.44	5.76	135	14.4	14.4

3.3.3 Pencampuran

Setelah dilakukan penimbangan dalam jumlah yang tepat dengan timbangan digital, proses berikutnya adalah proses *mixing* dengan tahapan sebagai berikut:

1. Terlebih dulu dilakukan *mixing* antara grafit EAF dan *carbon black* dengan menggunakan *planetary ball mill* dengan variabel waktu 75, 90, 105, 120, dan 135 menit dengan kecepatan putar 360 rpm untuk setiap sampel
2. Masukkan hasil *mixing* antara grafit EAF dan *carbon black* ke dalam *beaker glass* 1 L
3. Encerkan *epoxy* dengan metanol sebanyak 35 ml
4. Masukkan *epoxy* tersebut ke dalam *beaker glass* 1 L yang telah berisi grafit EAF dan *carbon black*, kemudian *mixing* selama ± 5 menit
5. Encerkan *hardener* dengan metanol 35 ml
6. Masukkan *hardener* ke dalam adonan, kemudian *mixing* selama ± 5 menit
7. *Mixing* kemudian dilanjutkan diatas *hot plate* ($T = 100^{\circ}\text{C}$) selama ± 20 menit.

Tahap *mixing* ini dilakukan agar campuran tersebut lebih homogen sehingga tercapai distribusi sifat yang merata pada pelat bipolar. Adonan yang dihasilkan pada proses ini diharapkan sudah halus dan mudah menggumpal jika ditekan dengan jari. Waktu pengadukan juga tidak boleh terlalu lama karena dapat meningkatkan kemungkinan retak pada pelat bipolar yang telah dicetak.

3.3.4 Pencetakan Pelat

Hasil *mixing* kemudian dimasukkan ke dalam cetakan yang berukuran 15 x 15 x 0.42 cm secara merata. Setelah itu, tutup cetakan dan susun ke dalam mesin *hot press*. Set mesin *press* dengan tekanan 55 MPa dengan temperatur sebesar 100°C sesuai dengan tekanan dan temperatur maksimum yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya^[34-35]. Pencetakan ini dilakukan selama 4 jam.

Pelat bipolar yang telah jadi, dikeluarkan dari cetakannya setelah didiamkan terlebih dulu selama 24 jam karena berdasarkan eksperimen terdahulu, pelat bipolar akan mengalami perubahan dimensi serta pelengkungan bila langsung dikeluarkan dari cetakan.

3.3.5 Pembuatan Spesimen Uji

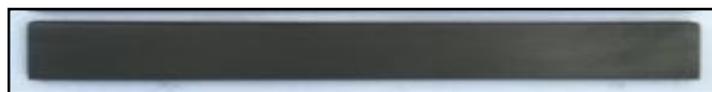
Pelat yang sudah dihasilkan, digunakan untuk pembuatan sampel uji, dimana dalam proses ini pelat akan dibagi menjadi 4 bagian, yaitu:

1. Untuk pengujian konduktivitas, spesimen dibuat dengan ukuran 2 x 2 cm sebanyak 6 buah untuk tiap variabel waktu *mixing*. Tiap spesimen diampelas terlebih dulu dengan menggunakan kertas amplas grit 80#, 500# dan 1000#, hingga mencapai ukuran yang sesuai dengan ketebalan \pm 0,3 cm. Pengamplasan juga berguna agar arus yang ditembakkan pada permukaan spesimen dapat ditangkap dan menghasilkan nilai konduktivitas yang akurat.
2. Untuk pengujian densitas dan porositas dibuat spesimen dengan ukuran 2 x 2 cm dengan ketebalan 0,3 cm sebanyak 6 buah untuk masing-masing variabel waktu *mixing*. Spesimen uji konduktivitas, densitas, dan porositas yang telah dipreparsi dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Spesimen uji konduktivitas, densitas, dan porositas

3. Untuk pengujian kekuatan fleksural, spesimen yang dibutuhkan berjumlah 4 buah untuk masing-masing variabel waktu *mixing* dengan ukuran 12 x 1,3 x 0,3 cm. Setiap spesimen diampelas hingga permukaannya rata. Ini dilakukan untuk menghilangkan retak mikro ataupun sumber konsentrasi tegangan (seperti bekas-bekas pemotongan sampel) yang dapat menjadi inisiasi retakan sehingga nilai kekuatan fleksural yang didapatkan lebih akurat. Spesimen uji fleksural yang telah dipreparsi dapat dilihat pada Gambar 3.4.



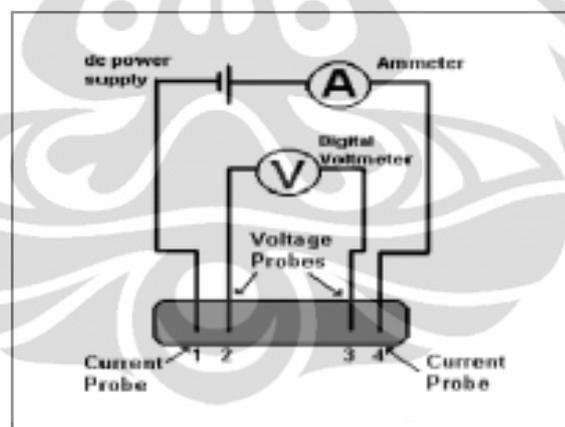
Gambar 3.4 Spesimen uji fleksural

3.4 Proses Karakterisasi Pelat Bipolar

Untuk mengetahui kesesuaian sifat dan karakteristik dari pelat bipolar yang dihasilkan, terlebih dahulu harus dilakukan beberapa pengujian. Berikut adalah pengujian-pengujian yang dilakukan pada penelitian ini.

3.4.1 Pengujian Konduktivitas Listrik

Konduktivitas listrik pelat bipolar dilakukan dengan menggunakan alat *four point probe*. Alat ini menggunakan 4 titik yang terdiri dari titik 1 dan 4 sebagai titik pengukur arus yang dibaca di ammeter, sedangkan titik 2 dan 3 sebagai pengukur tegangan yang akan dibaca di voltmeter. Arus akan mengalir melalui kawat no.1 dan 4. Apabila sampel memiliki tahanan terhadap aliran dari arus listrik, maka akan terjadi penurunan tegangan karena arus mengalir sepanjang sampel. Penurunan tegangan ini terjadi pada kawat 2 dan 3 yang kemudian diukur dengan *voltmeter* digital. Skema dari alat ini dapat dilihat pada Gambar 3.5 dibawah ini.



Gambar 3.5 Skema uji konduktivitas^[18]

Sumber: *Journal of Power Sources* 134 (2004) 7–17

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

Pengujian konduktivitas ini dilakukan di Pusat Penelitian Fisika LIPI, Puspiptek, Serpong. Pada saat pengujian, spesimen ditaruh di dalam mesin uji,

Universitas Indonesia

kemudian dijepit dengan cakram agar arus yang ditembakkan menjadi fokus pada spesimen. Prosedur pengujian konduktivitas adalah sebagai berikut:

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

Data yang didapat dari hasil pengujian ini berupa nilai resistivitas sampel (ρ) dan untuk mendapatkan nilai konduktivitas (C) sampel digunakan persamaan berikut:

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

dimana,

C = konduktivitas (S/cm)

ρ = resistivitas (Ω cm)

3.4.2 Pengujian Densitas (Rapat Massa)

Untuk melakukan pengujian densitas ini dipakai acuan, yaitu ASTM D 792. Prinsip pengujiannya, yaitu dengan membandingkan massa material di udara dengan massa material di dalam air. Massa material di dalam udara akan berbeda dengan massa material di dalam air karena adanya gaya ke atas (gaya Archimedes). Pengujian densitas dilakukan dengan langkah berikut ini:

1. Timbang massa sampel di udara untuk mendapatkan massa kering sampel (A)
2. Timbang massa sampel di dalam air (B) dengan menyelupkan sampel dalam *beaker glass* berisi air. Pencelupan harus dilakukan hingga seluruh permukaan sampel berada di tengah-tengah *beaker glass* dan tidak boleh menyentuh dasar serta pinggir dari *beaker glass* tersebut
3. Hitung temperatur air yang digunakan

Menghitung kerapatan massa (densitas) sampel digunakan persamaan berikut:

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

dimana,

A = massa sampel di udara (gr)

B = massa sampel di dalam air (gr)

ρ air = rapat massa air pada suhu tertentu 28.5°C (0.996089 gr/cm³)

ρ sampel = densitas sampel (gr/cm³)

3.4.3 Pengujian Porositas

Uji porositas sampel mengacu pada ASTM C20 untuk dapat mengetahui seberapa besar (dalam %) porositas pada pelat bipolar yang dihasilkan. Porositas merupakan pori yang terbentuk akibat adanya udara yang terperangkap dalam pelat. Pori tersebut akan mempengaruhi performa dari pelat bipolar yang dihasilkan. Pada prinsipnya, pengujian dilakukan dengan melihat perbedaan berat sampel, baik dalam keadaan kering (setelah dipanaskan), maupun dalam keadaan jenuh (setelah direndam).

Langkah pengujian porositas adalah sebagai berikut ini:

1. Sampel dikeringkan dengan cara dipanaskan dalam oven pada temperatur 100°C selama 1 jam dengan tujuan untuk menghilangkan uap air, minyak, maupun cairan yang melekat pada sampel
2. Kemudian sampel yang telah kering ditimbang pada temperatur ruang dan dicatat berat sampel sebagai berat kering (D)
3. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam *beaker glass* dan direndam di dalam air bersuhu 100°C di atas *hot plate* selama 2 jam. Sampel tidak boleh menyentuh bagian dasar serta dinding dari *beaker glass*. Hal ini dimaksudkan agar air dapat masuk dan mengisi seluruh pori-pori yang terdapat pada pelat
4. Setelah itu dinginkan sampel di dalam air selama 12 jam
5. Setelah 12 jam, sampel lalu ditimbang di dalam air, dan dicatat berat sampel sebagai berat-gantung (*suspended weight*) (S).

6. Pengujian dilanjutkan dengan menghilangkan air yang ada pada permukaan sampel dengan menggunakan kain katun atau linen. Sekali lagi timbang sampel pada temperatur ruang dan catat berat sampel sebagai berat jenuh (*saturated weight*) (*Sw*).

Setelah didapatkan berat sampel dengan berbagai perlakuan, penghitungan nilai porositas dari sampel dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

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

dimana,

S_w = *saturated weight* (gr) setelah sampel dikeringkan

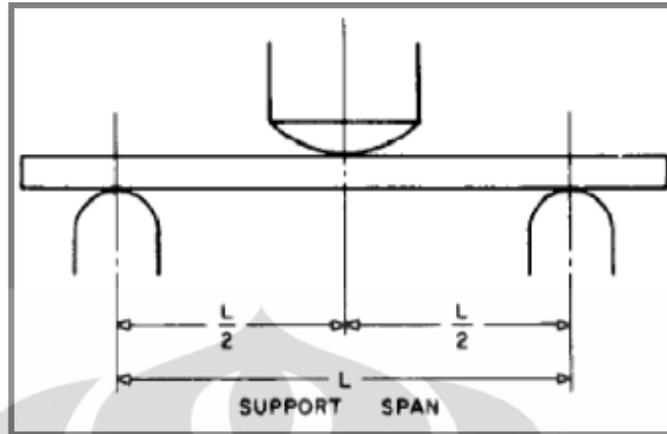
D = *dry weight* (gr)

S = *suspended weight* (gr) setelah sampel direndam 12 jam

3.4.3 Pengujian Tekuk (*flexural*)

Pengujian ini mengacu pada ASTM D 790, yaitu “*standard test methods for flexural properties of unreinforced plastics and electrical insulating materials*”. Dalam menentukan kekuatan pelat bipolar, pengujian fleksural lebih tepat digunakan daripada pengujian tarik karena akan menentukan performa dari pelat bipolar ketika digunakan pada berbagai aplikasi. Pelat bipolar akan lebih banyak menerima beban tekan dari gas yang masuk maupun keluar dari sitem sel tunam dibanding beban regang pada saat pengaplikasiannya nanti.

Prinsip pada pengujian ini yaitu melakukan pembebanan pada 3 titik, dimana beban akan diberikan pada bagian tengah sampel uji seperti dapat dilihat dalam skema pengujian pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Skema uji fleksural.^[37]

Sumber: ASTM 790 – 03

Pengujian dilakukan dengan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) T22K dengan panjang penahan 65 mm, diameter *punch* 3,2 mm dan kecepatan pembebanan yang diberikan 1,5 mm/menit. Proses pengujian fleksural dengan menggunakan mesin UTM dapat dilihat pada Gambar 3.7. Pada prinsipnya, pengujian ini dilakukan dengan meletakkan sampel di antara dua penahan, kemudian dilakukan penekanan ketika mesin bergerak ke atas. Sampel uji akan mengalami pembebanan pada bagian dengan kecepatan pembebanan yang konstan hingga sampel patah.



Gambar 3.7 Proses pengujian fleksural

Dari pengujian akan diperoleh beban maksimal (P) yang mengindikasikan kemampuan maksimal sampel untuk dapat menahan beban hingga patah dan untuk mendapatkan nilai kekuatan fleksural dari sampel selanjutnya diolah dengan menggunakan persamaan, sebagai berikut:

$$\sigma_r = \frac{3 PL}{2 BD^2} \quad (3.4)$$

dimana,

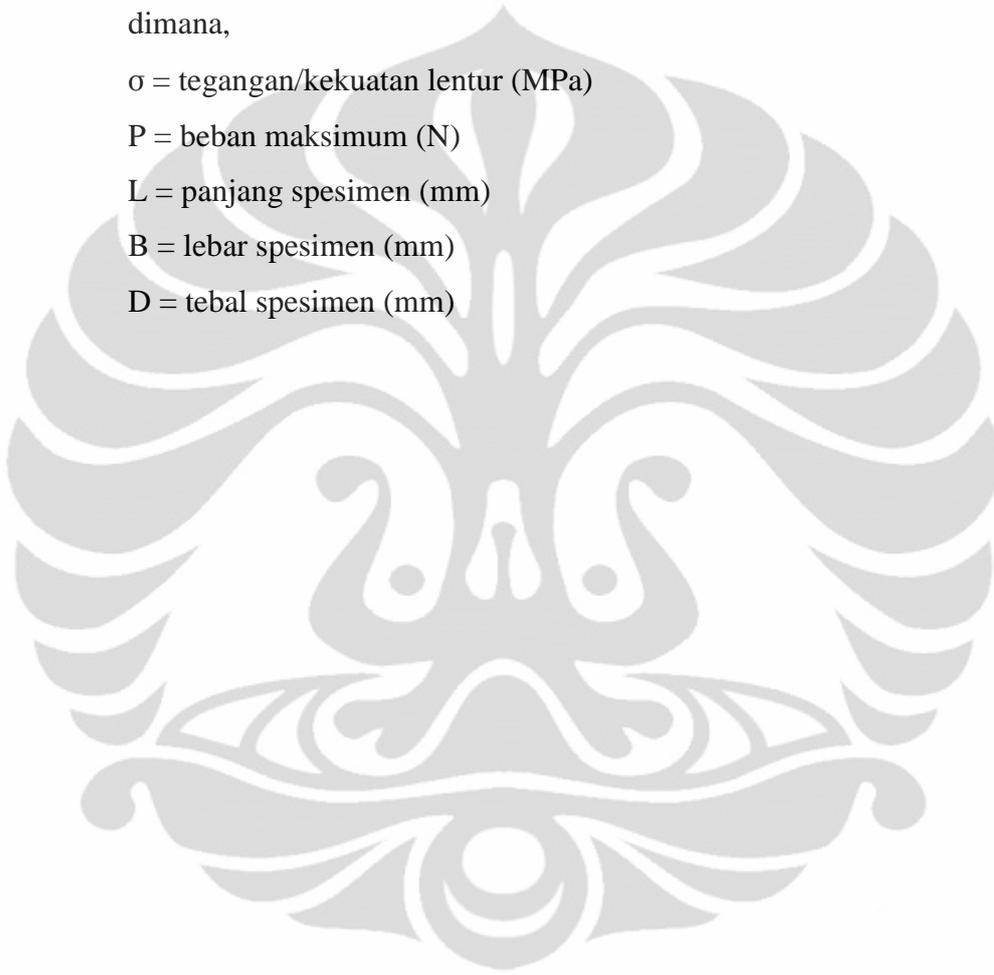
σ = tegangan/kekuatan lentur (MPa)

P = beban maksimum (N)

L = panjang spesimen (mm)

B = lebar spesimen (mm)

D = tebal spesimen (mm)

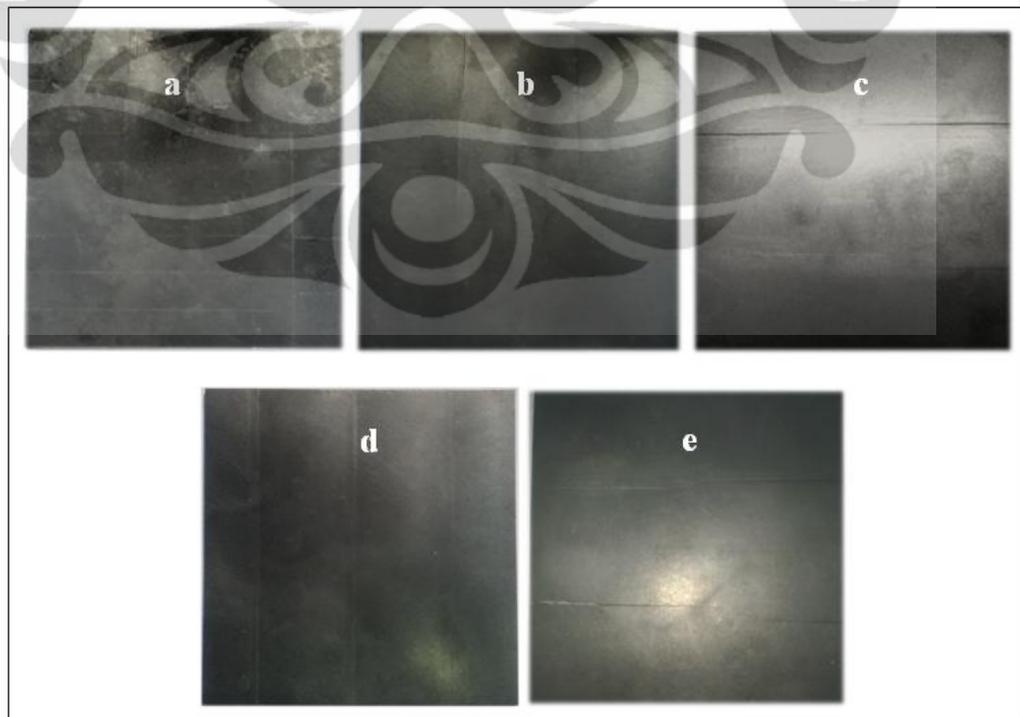


BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengamatan Visual Hasil Pencetakan Pelat Bipolar

Pada penelitian ini, pembuatan pelat bipolar dilakukan dengan variasi waktu *mixing* antara 95% grafit dengan 5% *carbon black* dari 80% berat total pelat bipolar. Waktu *mixing* yang dipakai adalah sebesar 75, 90, 105, 120, dan 135 menit. Selain itu, terdapat pula variabel proses lain yang dipakai sama pada setiap pelat yang dihasilkan, yaitu: temperatur, tekanan, serta waktu penekanan pada proses *compression moulding* sebesar 100°C, 55 MPa, selama 4 jam. Setelah proses penekanan, setiap pelat bipolar yang dihasilkan berukuran 15x15 cm sesuai dengan ukuran cetakan yang dipakai dengan ketebalan pelat yang berada dalam kisaran 0,2 - 0,5 cm. Jika kita lihat pada Gambar 4.1, dimensi panjang dan lebar dari pelat yang terbentuk sesuai dengan dimensi cetakan yang dipakai. Hal ini menandakan bahwa bakalan yang dicetak telah mengisi rongga cetakan dengan baik.



Gambar 4.1 Pelat yang dihasilkan pada variasi waktu *mixing*: a) 75 menit, b) 90 menit, c) 105 menit, d) 120 menit, dan e) 135 menit.

Untuk ketebalan pelat sendiri, terdapat perbedaan ketebalan antar sisi yang berlawanan. Perbedaan ketebalan itu terutama terdapat pada pelat dengan waktu *mixing* 120 menit yaitu sebesar 0,2 - 0,5 cm. Hal tersebut terjadi karena perataan bakalan pada cetakan yang kurang baik sehingga pada saat pembebanan dilakukan, distribusi tekanan menjadi tidak merata. Namun selama proses pencampuran berjalan dengan baik, perbedaan ketebalan ini tidak berpengaruh secara signifikan pada karakteristik pelat bipolar tersebut jika masing-masing pelat dibandingkan. Pengaruh yang dapat ditimbulkan adalah ketidakseragaman karakteristik pada masing-masing pelat sehingga pengambilan spesimen uji akan menentukan baik tidaknya data pengujian yang didapatkan.

Hampir seluruh permukaan pelat bipolar memiliki tekstur permukaan yang baik kecuali untuk sampel dengan waktu *mixing* 75 menit. Pada sampel tersebut tampak adanya pori dibagian permukaan sampel. Pori-pori tersebut ditimbulkan akibat adanya pembuatan bakalan yang kurang baik. Pada saat pencampuran hasil *mixing* grafit dan *carbon black* dengan epoksi resin dan *hardener*, bakalan yang dihasilkan terlalu kering akibat pencampuran yang terlalu lama sehingga metanol yang terdapat pada bakalan hampir seluruhnya menguap. Bakalan yang kering ini jika ditempatkan ke dalam cetakan memungkinkan terdapatnya banyak pori. Pori yang terdapat pada sampel menunjukkan kekerasan sampel rendah dan nantinya juga akan mempengaruhi hasil pengujian karakterisasi pelat terutama dapat dilihat pada data hasil pengujian porositas.

Pada Gambar 4.1 juga dapat dilihat bahwa terbentuk alur-alur pada setiap permukaan sampel. Alur-alur ini disebabkan oleh permukaan cetakan yang digunakan. Dalam preparasi spesimen uji, alur-alur tersebut harus dihilangkan dan dihaluskan hingga permukaan rata. Keseluruhan proses pembuatan pelat yang baik dan teliti akan menghasilkan pelat bipolar yang mempunyai permukaan rata, tidak rapuh, serta cacat minimum.

4.2 Karakterisasi Pelat Bipolar

Secara umum, melakukan *mixing* antara grafit dan *carbon black* akan meningkatkan homogenitas yang kemudian dapat memperbaiki karakteristik pada pelat bipolar terutama meningkatkan kekuatan fleksural dan konduktivitas.

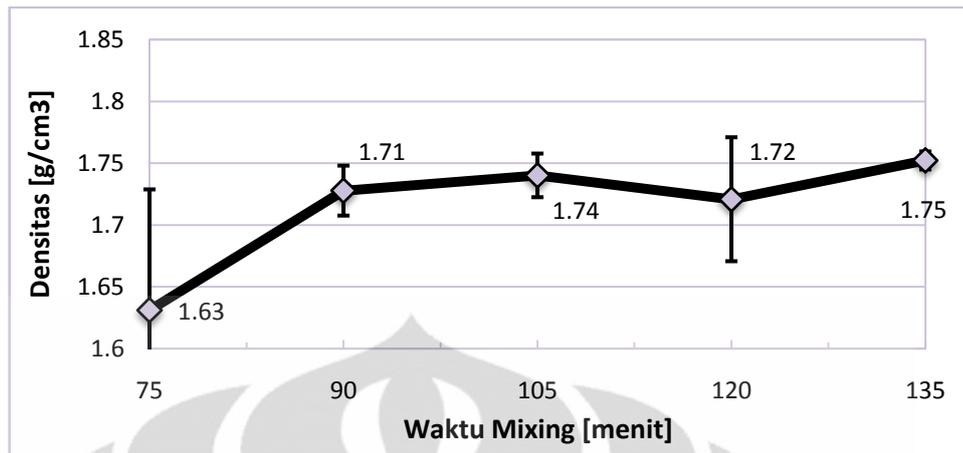
4.2.1 Pengujian Densitas

Pelat bipolar pada PEMFC akan berpengaruh terhadap 80% volume, 70% berat, dan 60% biaya produksi^[7]. Oleh karena itu, pengujian densitas ini perlu dilakukan untuk mengetahui massa jenis dari pelat bipolar yang dihasilkan. Dengan massa jenis yang lebih rendah, efisiensi sel akan meningkat, ukuran, berat, serta biaya yang diperlukan untuk memproduksi PEMFC dapat berkurang secara signifikan sehingga memungkinkan mengaplikasikan yang lebih luas, khususnya PEMFC dapat dibuat *portable*. Tabel 4.1 menunjukkan hasil pengujian densitas yang telah dilakukan terhadap setiap pelat bipolar yang dihasilkan.

Tabel 4.1 Hasil pengujian densitas.

Waktu <i>Mixing</i> Grafit dan <i>Carbon Black</i> (menit)	Densitas (gr/cm ³)
75	1,63
90	1,71
105	1,74
120	1,72
135	1,75

Semakin lama waktu *mixing* antara grafit dan *carbon black* pada proses pembuatan pelat bipolar, terjadi peningkatan terhadap densitas pelat. Hal ini menunjukkan bahwa dengan waktu *mixing* yang lebih lama, komposit yang dihasilkan juga akan semakin padat (*dense*). Dari data pengujian ini dapat kita lihat bahwa nilai densitas dari sampel telah memenuhi persyaratan DOE, USA untuk pelat bipolar, yaitu kurang dari 5 gr/cm³. Gambar 4.2, menunjukkan bahwa semakin lama waktu *mixing* yang digunakan membuat peningkatan pada densitas pelat bipolar.



Gambar 4.2 Pengaruh waktu *mixing* terhadap densitas.

Faktor penting yang mempengaruhi perbedaan nilai densitas adalah tekanan dan temperatur pada saat melakukan kompres yang terjadi akibat adanya mekanisme pemadatan oleh tekanan yang disertai temperatur selama pencetakan pelat^[14]. Pada saat pencetakan, temperatur yang diberikan akan menguapkan metanol. Selain itu terjadi juga pembentukan struktur jaring silang (*cross-linked structure*) polimer yang rapat disertai terperangkapnya pori hasil penguapan metanol. Pengaplikasian tekanan akan semakin merapatkan jarak ikatan dan mendesak keberadaan pori sehingga ketebalan pelat menurun dan densitas pelat bipolar yang terbentuk meningkat^[14]. Pencetakan pelat pada penelitian ini telah menggunakan tekanan maksimum (55 MPa) serta temperatur maksimum (100°C) yang telah diaplikasikan pada penelitian sebelumnya.

Dari data yang didapat, peningkatan nilai densitas pelat yang terbentuk tidak terlalu signifikan perbedaannya. Waktu *mixing* membantu persebaran grafit dan *carbon black* lebih merata, sehingga tercapai keseragaman densitas pada keseluruhan pelat. Pada dasarnya, densitas pelat bipolar tersebut dipengaruhi oleh densitas masing-masing bahan yang digunakan pada pembuatan pelat bipolar komposit. Masing-masing bahan memiliki densitas yang berbeda, seperti grafit EAF (1,66-1,72 gr/cm³), *carbon black*, dan *cured* epoksi resin (1,2-1,3 gr/cm³)^[14,18]. Temperatur yang diaplikasikan pada saat pencetakan pelat bipolar juga lebih rendah dibandingkan Tg dari resin epoksi (< 135°C)^[14]. Tg adalah temperatur transisi gelas yang mengindikasikan suatu respon rantai molekul polimer terhadap panas sebagai salah satu bentuk energi kinetik^[14]. Polimer akan

bersifat getas menyerupai perilaku gelas jika proses yang dilakukan berada dibawah temperatur T_g karena rantai-rantai molekulnya membeku^[14]. Pada kondisi ini, molekul-molekul polimer tidak memiliki energi termal yang cukup untuk melakukan pergerakan (untuk saling bergeser-menggelincir dan berputar (*sliding-rotating*)), sehingga pergerakan termal dari molekul polimer sangat lambat dan tidak terjadi perubahan yang signifikan pada volume atau densitas^[38].

Dari data nilai densitas yang telah didapat, dapat disimpulkan bahwa densitas pelat bipolar komposit dengan variasi waktu *mixing* 75-135 menit berada dalam rentang 1,63-1,75 gr/cm³. Nilai densitas tertinggi didapatkan pada pelat dengan waktu *mixing* 135 menit dan yang terendah adalah pada pelat dengan waktu *mixing* 75 menit. Namun, keseluruhan densitas pelat tersebut telah sesuai dengan persyaratan teknis *Department of Energy* (DOE), USA untuk densitas pelat bipolar, yaitu kurang dari 5 gr/cm³^[22].

4.2.2 Pengujian Porositas

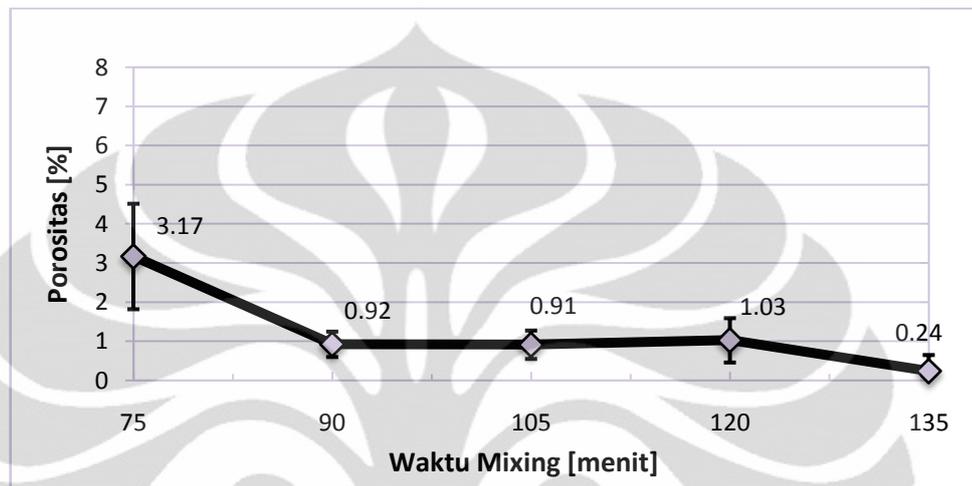
Nilai porositas yang rendah dibutuhkan oleh pelat bipolar agar tidak terdapat gas lain yang masuk kedalam sel tunam (sifat impermeabilitas) yang nantinya dapat mengganggu performa dan kinerja dari sel tunam menjadi kurang efisien. Hasil dari pengujian porositas pada pelat bipolar yang dihasilkan dengan variabel waktu *mixing* antara grafit dan *carbon black* dapat dilihat pada tabel 4.2 dibawah ini.

Tabel 4.2 Hasil pengujian porositas.

Waktu <i>Mixing</i> Grafit dan <i>Carbon Black</i> (menit)	Porositas (%)
75	3,17
90	0,92
105	0,91
120	1,03
135	0,24

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa semakin lama waktu *mixing* antara grafit dan *carbon black* akan menurunkan nilai porositas dari pelat bipolar yang dihasilkan. Hanya saja, pada sampel dengan waktu *mixing* 75 menit terjadi perbedaan nilai porositas yang sangat tinggi. Hal ini terjadi akibat dari kurang

sempurnanya proses pembentukan bakalan yang dilakukan. Bakalan yang terbentuk terlalu kering sehingga pada saat pencetakan dilakukan menghasilkan pelat yang rapuh dan berpori. Hasil pengujian porositas dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Pengaruh waktu *mixing* terhadap porositas.

Porositas dapat terbentuk akibat peristiwa pemadatan yang terlalu tinggi oleh tekanan yang tinggi yang menyebabkan epoksi tidak dapat mengisi rongga-rongga yang terbentuk akibat metanol yang menguap. Daerah-daerah yang seharusnya terisi oleh epoksi akan menjadi kosong dan rongga yang terbentuk tersebutlah yang menjadikan pelat berporos. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan grafit dan *carbon black* dengan ukuran partikel yang sama yaitu kurang dari 44 μm . Dengan ukuran partikel yang sama, kekosongan (*void*) yang seharusnya dapat terisi oleh partikel yang berukuran lebih kecil tidak terisi secara maksimal, sehingga tingkat porositas dari komposit dapat meningkat^[18]. *Carbon black* yang diharapkan sebagai *filler* yang mengisi *void* yang ada tidak seluruhnya dapat mengisi kekosongan antar partikel. Namun, dengan melaksanakan *mixing* antara grafit dan *carbon black*, diharapkan jarak antar partikel akan menurun karena terjadi persebaran yang merata antara grafit dan *carbon black*.

Pada penelitian^[34], yang mengembangkan pelat bipolar komposit berbahan grafit EAF, 5% CB, dan resin epoksi dengan metode *compression moulding* pada tekanan 45 MPa dengan temperatur penekanan sebesar 100°C selama 4 jam, dihasilkan pelat dengan porositas sebesar 0,36%.

Jika dibandingkan dengan penelitian ini yang menghasilkan porositas sebesar 0,24% pada tekanan 55 MPa dan temperatur penekanan 100°C, dapat disimpulkan bahwa tekanan yang tinggi, menghasilkan porositas yang lebih rendah juga.

Penurunan tingkat porositas pada pelat bipolar akan berpengaruh secara langsung terhadap sifat mekanis serta nilai konduktivitas listrik pelat bipolar tersebut^[18]. Hal ini berkaitan dengan berkurangnya jarak antar agregat bahan pengisi yang kemudian akan menurunkan nilai resistivitas pada daerah agregat yang secara langsung akan meningkatkan nilai konduktivitas^[14]. Konduktivitas meningkat karena meningkatnya daerah atau jalur konduktivitas elektron (*electron conductivity path*) yang tersedia^[18].

4.2.3 Pengujian Fleksural

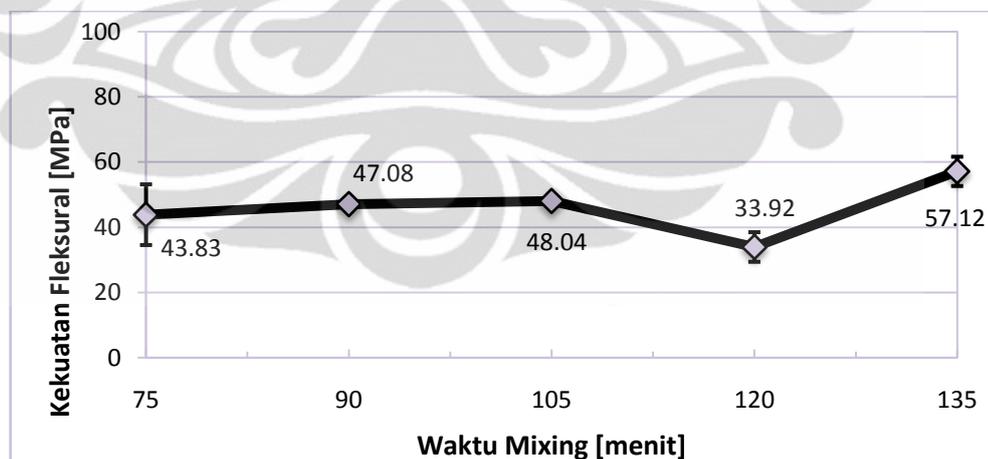
Sifat mekanis yang baik mutlak diperlukan bagi setiap pelat bipolar yang dihasilkan. Sesuai dengan target DOE, maka sebuah pelat bipolar harus memiliki kekuatan fleksural lebih besar dari 25 MPa^[22]. Kekuatan fleksural diperlukan agar pelat bipolar dapat menahan tekanan dari gas, baik yang masuk maupun yang keluar dari sistem sel tunam, serta dapat menahan komponen lain (memperkuat struktur *fuel cell stack*) setelah dilakukan proses perakitan. Pengujian fleksural dilakukan untuk mengetahui nilai ketahanan pelat bipolar terhadap beban tekan. Hasil pengujian fleksural pada pelat bipolar yang dihasilkan dengan menggunakan variabel variasi waktu *mixing* antara grafit dan *carbon black* dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil pengujian fleksural.

Waktu <i>Mixing</i> Grafit dan <i>Carbon Black</i> (menit)	Kekuatan Fleksural (MPa)
75	43,83
90	47,08
105	48,04
120	33,92
135	57,12

Gambar 4.4 menunjukkan pengaruh lamanya waktu *mixing* terhadap kekuatan fleksural pelat bipolar yang dihasilkan. Pada gambar ini dapat kita lihat bahwa penurunan nilai kekuatan fleksural terdapat pada sampel dengan waktu *mixing* 120 menit.

Secara keseluruhan, nilai kekuatan fleksural ini telah sesuai dengan persyaratan teknis DOE, USA untuk karakteristik pelat bipolar, yaitu lebih besar dari 25 MPa. Selain itu, kekuatan fleksural yang didapatkan lebih tinggi dari kekuatan fleksural yang didapat pada penelitian-penelitian sebelumnya. Jika kita perhatikan juga secara keseluruhan, semakin lama waktu *mixing* meningkatkan nilai kekuatan fleksural dari pelat bipolar yang dihasilkan.

**Gambar 4.4** Pengaruh waktu *mixing* terhadap kekuatan fleksural.

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kenaikan nilai kekuatan fleksural dari pelat bipolar komposit, antara lain pembasahan yang terjadi antara antarmuka karbon dengan resin epoksi. Ketika pembasahan terjadi dengan baik, diperlukan gaya yang lebih besar untuk dapat memutuskan ikatan

antara antarmuka karbon dengan resin epoksi^[38]. Selain itu, penurunan tingkat porositas yang terkandung dalam sistem komposit dapat menyebabkan tingkat porositas, baik dari jarak antar partikel bahan pengisi maupun porositas yang terkandung pada struktur bahan pengisi, menjadi semakin kecil^[18]. Tingkat porositas yang semakin kecil akan menyebabkan ikatan yang terjadi antara antarmuka bahan pengisi karbon dengan matriks resin epoksi semakin meningkat.

Pada penelitian^[35] yang mengembangkan pelat bipolar komposit berbahan grafit EAF, 5% CB, dan resin epoksi dengan metode *compression moulding* pada tekanan 55 MPa dengan temperatur penekanan sebesar 70°C selama 4 jam, dihasilkan pelat dengan kekuatan fleksural sebesar 48 MPa.

Jika dibandingkan dengan penelitian ini yang menghasilkan kekuatan fleksural hingga 57,12 MPa pada tekanan 55 MPa dan temperatur penekanan 100°C, dapat disimpulkan bahwa temperatur penekanan yang tinggi, menghasilkan kekuatan fleksural yang lebih tinggi juga. Peningkatan kekuatan fleksural tersebut juga dapat disebabkan karena dengan semakin tingginya temperatur *compression moulding* atau temperatur yang digunakan pada saat pembuatan pelat bipolar. Dengan adanya peningkatan temperatur *curing* maka semakin banyak dan cepat *crosslink* polimer terbentuk akibat adanya peningkatan aktivitas molekular polimer yang menyebabkan rantai-rantai epoksi mudah membentuk cabang dari rantai polimer lainnya, sehingga terbentuk ikatan yang kuat sehingga dapat meningkatkan kekuatan fleksural dari material komposit grafit-polimer.

Selain itu ketika proses pencampuran maksimal, pengelompokan *carbon black* dapat tidak terjadi dimana partikel-partikel *carbon black* akan menyebar secara merata sehingga meningkatkan homogenitas yang menyebabkan meningkatnya sifat mekanis pelat bipolar yang dihasilkan^[18]. Hal ini dapat dilihat dari data pengujian fleksural dimana sampel dengan waktu *mixing* 135 menit memiliki kekuatan fleksural paling tinggi yang menunjukkan homogenitas yang paling baik.

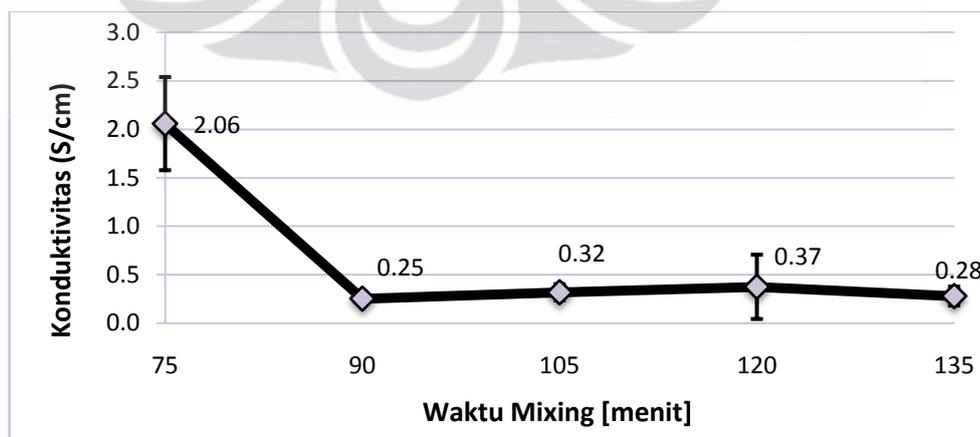
4.2.4 Pengujian Konduktivitas

Pelat bipolar memiliki peranan penting dalam sistem sel tunam dimana fungsi utama dari pelat bipolar adalah mengumpulkan dan mengalirkan arus dari kutub anoda ke kutub katoda. Oleh karena itu, material pelat bipolar harus memiliki sifat konduktivitas listrik yang baik untuk mengantarkan atau menghasilkan arus listrik tersebut. Dari hasil pengukuran resistivitas atau hambatan dengan menggunakan alat *four point probe*, maka akan didapatkan suatu nilai konduktivitas (S/cm) pelat bipolar yang dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.5.

Tabel 4.4 Hasil pengujian konduktivitas.

Waktu <i>Mixing</i> Grafit dan <i>Carbon Black</i> (menit)	Konduktivitas (S/cm)
75	2,06
90	0,25
105	0,32
120	0,37
135	0,28

Berdasarkan Gambar 4.5 dapat dilihat pengaruh waktu *mixing* terhadap nilai konduktivitas pelat bipolar. Perbedaan data yang signifikan terjadi pada pelat bipolar dengan waktu *mixing* 75 menit.



Gambar 4.5 Pengaruh waktu *mixing* terhadap konduktivitas.

Daya pembasahan dan porositas pelat bipolar dapat menjadi parameter nilai konduktivitas listrik. Ketika daya pembasahan semakin baik, maka sifat mekanis dan konduktivitas listrik dari komposit dapat semakin meningkat. Distribusi *carbon black* yang tidak merata dan adanya porositas yang tinggi dapat meningkatkan nilai resistansi listrik. Apabila distribusi *carbon black* dalam matriks dapat lebih merata, maka nilai konduktivitas listrik pelat bipolar dapat semakin tinggi. Selain itu, dengan berkurangnya ukuran partikel akan terjadi peningkatan pengumpulan (aglomerasi) dari partikel-partikel yang lebih kecil tersebut^[14], sehingga dimungkinkan akan terjadi ketidakseragaman karakteristik yang dihasilkan dari keseluruhan bagian pelat bipolar yang dihasilkan.

Pada penelitian^[35], yang mengembangkan pelat bipolar komposit berbahan grafit EAF, 5% CB, dan resin epoksi dengan metode *compression moulding* pada tekanan 55 MPa dengan temperatur penekanan sebesar 70°C selama 4 jam, dihasilkan pelat dengan konduktivitas sebesar 1,03 S/cm.

Jika dibandingkan dengan penelitian ini, dengan waktu *mixing* 120 menit dihasilkan konduktivitas sebesar 0,37

S/cm pada tekanan 55 MPa dan temperatur penekanan 100°C, sehingga dapat disimpulkan bahwa temperatur penekanan yang tinggi, menghasilkan konduktivitas yang lebih rendah.

Dari hasil pengujian tersebut pada sampel yang dibuat dari masing-masing pelat, maka nilai konduktivitas terbaik dimiliki oleh sampel yang dihasilkan dengan menggunakan waktu pencampuran selama 120 menit dengan nilai konduktivitas sebesar 0.37 S/cm. Namun secara keseluruhan, nilai konduktivitas yang dimiliki oleh masing-masing pelat yang dihasilkan masih di bawah target yang ditetapkan oleh US DOE.

4.3 Perbandingan Karakteristik Pelat Bipolar dengan Variasi Waktu *Mixing*

Dari hasil penelitian komposit pelat bipolar dengan matriks epoksi dengan grafit EAF dan *carbon black* sebagai penguat (*reinforcement*) serta dibuat dengan adanya variasi waktu *mixing* antara grafit dan *carbon black*, maka perbandingan antara sifat-sifat komposit pada setiap pelat dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut ini.

Tabel 4.5 Perbandingan karakteristik pelat bipolar pada variasi waktu *mixing*.

Waktu <i>Mixing</i> Grafit dan Carbon Black (menit)	Karakteristik Pelat Bipolar			
	Densitas	Porositas	Kekuatan Fleksural	Konduktivitas
	(gr/cm ³)	(%)	(Mpa)	(S/cm)
75	1,63	3,17	43,83	2,06
90	1,71	0,92	47,08	0,25
105	1,74	0,91	48,04	0,32
120	1,72	1,03	33,92	0,37
135	1,75	0,24	57,12	0,28

Keterangan pada Tabel 4.5 menunjukkan bahwa karakteristik pelat bipolar komposit terbaik yang dihasilkan pada penelitian ini, yaitu dengan menggunakan waktu *mixing* selama 105 menit. Pelat bipolar ini memiliki spesifikasi berat yang rendah (nilai densitas kurang dari 5 gr/cm³), porositas yang cukup kecil (kurang dari 1%), nilai fleksural yang cukup besar dan telah melampaui target DOE (lebih besar dari 25 MPa), serta nilai konduktivitas listrik ketiga tertinggi setelah pelat bipolar dengan waktu *mixing* 75 menit.

Hasil karakterisasi tersebut memperlihatkan pengaruh waktu *mixing* terhadap sifat pelat bipolar komposit yang dihasilkan. Semakin lama waktu yang digunakan untuk *mixing* grafit dan *carbon black*, maka akan berpengaruh terhadap nilai konduktivitas listrik, peningkatan kekuatan fleksural, serta penurunan tingkat porositas dari pelat bipolar yang dihasilkan. Selain itu, waktu *mixing* juga meningkatkan homogenitas dari setiap pelat bipolar yang dihasilkan.

BAB 5

KESIMPULAN

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

1. Berdasarkan penampakan visual, variasi waktu *mixing* 75-135 menit tidak mempengaruhi proses pembuatan pelat bipolar yang dihasilkan.
2. Pelat bipolar yang dihasilkan dengan menggunakan waktu *mixing* selama 105 menit memiliki performa terbaik dengan nilai densitas sebesar 1,74 gr/cm³, kekuatan fleksural sebesar 48,04 MPa, nilai konduktivitas listrik sebesar 0,32 S/cm, serta porositas sebesar 0,91 %.
3. Target DOE untuk ketiga karakteristik telah terpenuhi pada penelitian ini, yaitu densitas kurang dari 5 gr/cm³ (1,63 gr/cm³- 1,75 gr/cm³), kekuatan fleksural lebih besar dari 25 MPa (33,92 MPa-57,12 MPa), dan porositas yang rendah (0,24 %-3,17 %).
4. *Mixing* antara grafit dan *carbon black* selama 75-135 menit berpengaruh untuk menghasilkan pelat bipolar dengan homogenitas tinggi, karakteristik yang baik, bobot yang ringan, kekuatan fleksural yang tinggi, serta tingkat porositas yang lebih kecil. Namun nilai konduktivitas yang dihasilkan belum sesuai dengan target DOE.

DAFTAR REFERENSI

- [1] “World Marketed Energy Use by Fuel Type, 1980-2030.” *International Energy Annual*. 2006 (June-December 2008). Energy Information Administration (EIA). 3 April. 2011
<<http://rovicky.wordpress.com/2007/05/05/dunia-memilih/>>
- [2] Diakses pada tanggal 3 April 2011 pukul 21.00 dari:
<http://rovicky.wordpress.com/2007/05/05/dunia-memilih/>
- [3] Diakses pada tanggal 3 April 2011 pukul 21.10 dari:
www.pesdm.wonogirikab.go.id.htm
- [4] US. Department of Energy, *Fuel Cell Handbook 7th Edition*, Morgantown, West Virginia: EG & G Technical Services Inc., 2004, p 1-10
- [5] Diakses pada tanggal 17 Juni 2011 pukul 21.00 dari:
<http://biodiesel.environmentalactiongroup.org/hydrogen.html>
- [6] Listiani, Eniya Dewi. *Mass Transfer Study On Polymer Electrolyte Fuel Cell*. Seminar Nasional Teknologi. 2007.
- [7] Yuhua Wang. *Thesis: Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*. Ontario, Canada: University of Waterloo, 2006.
- [8] Shivkalyan. A. Kanhegaokar. *Studies On Conducting Polymers Synthesis And Characterization of Conducting Polymer Blends*. Bharati Vidyapeeth Pune (Deemed University), Division Of Polymer Science & Engineering. 2004.
- [9] Stambouli, A. Boudghene. *Journal: Fuel cells, an Alternative to Standard Sources Of Energy*, Roma: E.Traversa University of Roma ‘Tor Vergata’, 2001.
- [10] H.S. Lee, et al. “Evaluation of Graphite Composite Bipolar Plate for PEM (Proton Exchange Membrane) Fuel Cell: Electrical, Mechanical, and Molding Properties”. *Journal of Materials Processing Technology*. South Korea, 2006.

- [11] Kakati, Biraj Kumar and Dhanapati Deka. *Journal: Effect of Resin Matrix Precursor on the Properties of Graphite Composite Bipolar Plate for PEM Fuel Cell*. Department of Energy, Tezpur University, Assam, Napaam, Dist: Sonitpur, Tezpur, India, 2007.
- [12] Diakses pada tanggal 27 Juni 2011 pukul 23.00 dari:
http://ec.europa.eu/research/rtdinfo/42/01/article_1317_en.html
- [13] Xianguo Li, and Imran Sabir. *Review of Bipolar Plates in PEM Fuel Cells: Flow-Field Designs*. Canada: University Avenue West, 2004.
- [14] Ling Du, *Thesis : Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (Pem) Fuel Cells*, 2008.
- [15] Jalani, Nikhil H. *Development of Nanocomposite Polymer Electrolyte Membranes for Higher Temperature PEM Fuel Cells*. Chemical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, 2006.
- [16] Diakses pada tanggal 17 Juni 2011 pukul 22.00 dari:
<http://archive.kaskus.us/thread/4740135>
- [17] Diakses pada tanggal 17 Juni 2011 pukul 21.30 dari:
<http://fuelcell-igert.rpi.edu/update.do?artcenterkey=24>
- [18] Hsu-Chiang Kuan, et al.. *Journal: Preparation, Electrical, Mechanical and Thermal Properties of Composite Bipolar Plate for A Fuel Cell*. Journal of Power Sources, 2004.
- [19] Mikkola, Mikko. *Journal: Experimental Studies on Polymer Electrolyte membrane Fuel Cell Stacks*, Helsinki University of Technology, 2001.
- [20] Xiao Zi Yuan, et al., ed. *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells – From Materials to Processing*. Vancouver: University of British Columbia, 2006, p 45-60.
- [21] Adrianowycz, Orest L. *Next Generation Bipolar Plate for Automotive PEM Fuel Cell*. DOE Hydrogen Program, GrafTech International Ltd., 2007.
- [22] Hermann, Allen, Tapas Chaudhuri, and Priscila Spagnol. *Journal: Bipolar plates for PEM Fuel Cells: A Review*. Elsevier International Journal of Hydrogen Energy, 2005.
- [23] Diakses pada tanggal 17 Juni 2011 pukul 21.35 dari:
<http://www.psrc.usm.edu/macrog/epoxy.html>

- [24] Akovali, Guneri, ed. *Handbook of Composite Fabrication*. Ankara, 2001.
- [25] Diakses pada tanggal 23 Juni 2011 pukul 21.55 dari:
<http://www.chem.wisc.edu/~newtrad/CurrRef/BDGTopic/BDGtext/BDGGraph.html>
- [26] Diakses pada tanggal 23 Juni 2011 pukul 23.55 dari:
<http://bajabesi.blogspot.com/>
- [27] Hsu-Chiang Kuan, et al.. *Journal: Preparation, Electrical, Mechanical and Thermal Properties of Composite Bipolar Plate for A Fuel Cell*. Journal of Power Sources, 2004.
- [28] Zhang Jie, Zou Yan-wen, and H. E. Jun. *Influence of Graphite Particle Size and Its Shape on Performance of Carbon Composite Bipolar Plate*, Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [29] Weber, Erik H. *Dissertation: Development and Modeling of Thermally Conductive Polymer/Carbon Composites*. Bachelor of Science, Michigan Technological University, 1999.
- [30] Diakses pada tanggal 17 Juni 2011 pukul 22.10 dari:
<http://www.moderndispersions.com/images/PLACE%20HOLDER%20FO%20DISPERSION.pdf>
- [31] Jan-Chan Huang. *Carbon Black Filled Conducting Polymers and Polymer Blends*. United States: Plastics Engineering Department, University of Massachusetts Lowell, 2002.
- [32] Diakses pada tanggal 17 Juni 2011 pukul 22.00 dari:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol> (diunduh pada tanggal 17 Juni 2011; jam 22.00).
- [33] Diakses pada tanggal 17 Juni 2011 pukul 21.05 dari:
<http://www.mtixtl.com> (diunduh pada tanggal 17 Juni 2011; jam 21.05).
- [34] Amalia, Dinda Putri. *Skripsi: Pengaruh Temperatur Compression Molding Terhadap Karakteristik Pelat Bipolar PEMFC Komposit Grafit EAF/Epoksi Dan 5% Carbon Black*. Depok: Departemen Teknik Metalurgi dan Material. 2011.

- [35] Indrawati, Heny. *Pengaruh Tekanan terhadap Karakteristik Pelat Bipolar PEMFC Karbon-Karbon Komposit dengan Penambahan 5%wt Carbon Black*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2010
- [36] Muttakin. *Skripsi: Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Pelat Bipolar PEMFC Dengan Matriks Grafit EAF 44 Mikron dan Variasi Ukuran Partikel 5% Carbon Black*. Depok: Departemen Teknik Metalurgi dan Material. 2011.
- [37] ASTM 790 – 03. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. ASTM International.
- [38] Pham, Ha. Q. and Maurice J. Marks. *Epoxy Resin Vol. 9. Encyclopedia of polymer Science and Technology*, John Wiley & Sons, Dow Chemical, 2002.
- [39] Diakses pada tanggal 26 Juni 2011 pukul 23.50 dari:
http://www.simetric.co.uk/si_water.htm

Lampiran 1. Hasil pengujian densitas

Spesimen	Massa di Udara (A) [gr]	Massa dalam Air (B) [gr]	A-B [gr]	ρ Air [gr/cm ³] T = 28°C	ρ Sampel [gr/cm ³]	ρ Sampel Rata-Rata [gr/cm ³]
Pelat Bipolar 1 (Waktu <i>Mixing</i> 75 Menit)						
1	1.71	0.59	1.12	0.996232	1.52	1.63
2	2.10	0.78	1.32	0.996232	1.58	
3	2.39	0.90	1.49	0.996232	1.60	
4	2.21	0.96	1.25	0.996232	1.76	
5	2.45	1.05	1.40	0.996232	1.74	
6	2.09	0.77	1.32	0.996232	1.58	
Pelat Bipolar 2 (Waktu <i>Mixing</i> 90 Menit)						
1	2.57	1.11	1.46	0.996232	1.80	1.71
2	2.44	1.02	1.42	0.996232	1.71	
3	2.49	1.07	1.42	0.996232	1.68	
4	2.54	1.06	1.48	0.996232	1.86	
5	2.37	1.01	1.36	0.996232	1.49	
6	2.71	1.13	1.58	0.996232	1.71	
Pelat Bipolar 3 (Waktu <i>Mixing</i> 105 Menit)						
1	2.66	1.15	1.51	0.996232	1.75	1.74
2	2.69	1.12	1.57	0.996232	1.71	
3	2.62	1.12	1.50	0.996232	1.74	
4	2.70	1.16	1.54	0.996232	1.75	
5	2.53	1.08	1.45	0.996232	1.74	
6	2.50	1.08	1.42	0.996232	1.75	
Pelat Bipolar 4 (Waktu <i>Mixing</i> 120 Menit)						
1	2.68	1.14	1.54	0.996232	1.73	1.72
2	2.49	1.07	1.42	0.996232	1.75	
3	2.57	1.09	1.48	0.996232	1.73	
4	2.83	1.22	1.61	0.996232	1.75	
5	2.26	0.87	1.39	0.996232	1.62	
6	2.73	1.17	1.56	0.996232	1.74	
Pelat Bipolar 5 (Waktu <i>Mixing</i> 135 Menit)						
1	2.49	1.08	1.41	0.996232	1.76	1.75
2	2.38	1.02	1.36	0.996232	1.74	
3	2.51	1.08	1.43	0.996232	1.75	
4	2.53	1.10	1.43	0.996232	1.76	
5	2.39	1.03	1.36	0.996232	1.75	
6	2.51	1.08	1.43	0.996232	1.75	

Contoh perhitungan data densitas sampel pelat bipolar 5 (Waktu *Mixing* 135 Menit) spesimen 1:

$$\rho_{\text{sampel}} = \frac{A}{A - B} \times \rho_{\text{air}} = \frac{2.49}{2.49 - 1.08} \times 0.996232 = 1.76 \text{ gr/cm}^3$$

Universitas Indonesia

Lampiran 2. Hasil pengujian porositas

Spesimen	Dry Weight (D) [gr]	Suspended Weight (S) [gr]	Saturated Weight (Sw) [gr]	Porositas [%]	Porositas Rata-Rata [%]
Pelat Bipolar 1 (Waktu <i>Mixing</i> 75 Menit)					
1	1.71	0.92	1.73	2.53	3.17
2	2.10	1.04	2.15	4.72	
3	2.21	0.88	2.24	2.26	
Pelat Bipolar 2 (Waktu <i>Mixing</i> 90 Menit)					
1	2.44	1.08	2.45	0.74	0.92
2	2.71	1.17	2.73	1.30	
3	2.37	1.02	2.38	0.74	
Pelat Bipolar 3 (Waktu <i>Mixing</i> 105 Menit)					
1	2.62	1.12	2.64	1.33	0.91
2	2.50	1.08	2.51	0.70	
3	2.53	1.11	2.54	0.70	
Pelat Bipolar 4 (Waktu <i>Mixing</i> 120 Menit)					
1	2.57	1.16	2.58	0.71	1.03
2	2.26	1.07	2.28	1.68	
3	2.57	1.12	2.58	0.69	
Pelat Bipolar 5 (Waktu <i>Mixing</i> 135 Menit)					
1	2.49	1.09	2.50	0.71	0.24
2	2.38	1.04	2.38	0.00	
3	2.51	1.10	2.51	0.00	

Contoh perhitungan data porositas sampel pelat bipolar 5 (Waktu *Mixing* 135 Menit) spesimen 1:

$$\% \text{ Porositas} = \frac{Sw - D}{D - S} \times 100\% = \frac{2.50 - 2.49}{2.49 - 1.09} \times 100\% = 0.71\%$$

Lampiran 3. Hasil fleksural

Spesimen	Tebal (D) [mm]	Lebar (B) [mm]	Panjang (L) [mm]	Beban (P) [N]	Kekuatan Fleksural [MPa]	Kekuatan Fleksural Rata-Rata [MPa]
Pelat Bipolar 1 (Waktu <i>Mixing</i> 75 Menit)						
1	3.00	13.00	120.00	35.20	54.15	43.83
2	3.00	13.50	120.00	24.00	35.56	
3	3.00	13.00	120.00	32.00	49.23	
4	3.00	13.20	120.00	24.00	36.36	
Pelat Bipolar 2 (Waktu <i>Mixing</i> 90 Menit)						
1	3.10	14.00	120.00	35.20	47.09	47.08
2	3.00	13.80	120.00	32.00	46.38	
3	3.00	13.80	120.00	32.00	46.38	
4	3.00	13.20	120.00	32.00	48.48	
Pelat Bipolar 3 (Waktu <i>Mixing</i> 105 Menit)						
1	3.00	14.00	120.00	33.60	48.00	48.04
2	3.00	14.00	120.00	32.00	45.71	
3	3.00	13.00	120.00	32.00	49.23	
4	3.00	13.00	120.00	32.00	49.23	
Pelat Bipolar 4 (Waktu <i>Mixing</i> 120 Menit)						
1	3.80	13.30	120.00	32.00	29.99	33.92
2	3.80	13.80	120.00	44.80	40.47	
3	4.00	13.80	120.00	40.00	32.61	
4	4.00	13.80	120.00	40.00	32.61	
Pelat Bipolar 5 (Waktu <i>Mixing</i> 135 Menit)						
1	3.00	13.50	120.00	35.20	52.15	57.12
2	3.00	14.40	120.00	44.80	62.22	
3	3.00	13.50	120.00	40.00	59.26	
4	3.30	13.50	120.00	44.80	54.85	

Contoh perhitungan data fleksural sampel pelat bipolar 5 (Waktu *Mixing* 135 Menit) spesimen 1:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2BD^2} = \frac{3 \times 35.20 \times 120}{2 \times 13.50 \times 3^2} = 52.15 \text{ MPa}$$

Lampiran 4. Hasil konduktivitas

Sampel	Pengujian Resistensi [Ω .cm]	Konduktivitas [S/cm]	Konduktivitas Rata-Rata [S/cm]
Pelat Bipolar 1 (Waktu <i>Mixing</i> 75 Menit)			
1	6.253333	0.16	2.06
2	10.54	0.09	
3	0.645	1.55*	
4	3.436667	0.29	
5	0.473667	2.11*	
6	0.399	2.51*	
Pelat Bipolar 2 (Waktu <i>Mixing</i> 90 Menit)			
1	6.006667	0.17	0.25
2	3.816667	0.26*	
3	6.153333	0.16	
4	3.606667	0.28*	
5	1.552333	0.64	
6	4.623333	0.22*	
Pelat Bipolar 3 (Waktu <i>Mixing</i> 105 Menit)			
1	0.082467	12.13	0.32
2	0.0841	11.89	
3	2.43	0.41*	
4	4.953333	0.20	
5	3.513333	0.28*	
6	3.94	0.25*	
Pelat Bipolar 4 (Waktu <i>Mixing</i> 120 Menit)			
1	0.780333	1.28	0.37
2	16.56667	0.06	
3	12.70333	0.08	
4	10.30333	0.1*	
5	3.563333	0.28*	
6	1.349	0.74*	
Pelat Bipolar 5 (Waktu <i>Mixing</i> 135 Menit)			
1	4.776667	0.21*	0.28
2	10.98	0.09	
3	5.74	0.17	
4	2.57	0.39*	

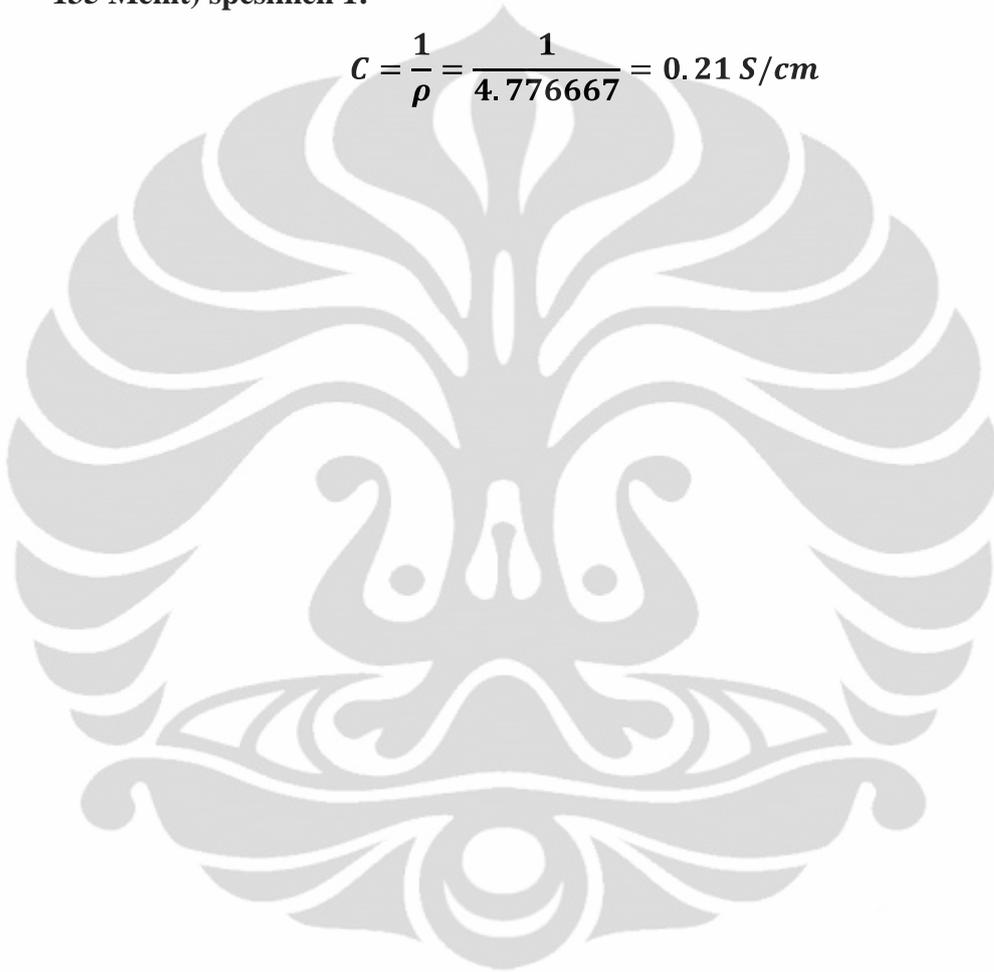
(lanjutan)

5	0.331333	3.02	
6	4.276667	0.23*	

Catatan: (*) Data yang dipakai pada perhitungan konduktivitas rata-rata

Contoh perhitungan data fleksural sampel pelat bipolar 5 (Waktu *Mixing* 135 Menit) spesimen 1:

$$C = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{4.776667} = 0.21 \text{ S/cm}$$



Lampiran 5. Spesifikasi resin epoksi


EP

Technical Information

Bakelite® EPR 174
Unmodified, liquid standard epoxy resin based on Bisphenol-A

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

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

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

Shelf Life
 In sealed containers at room temperature at least one year. Bakelite EPR 174 can crystallize under certain circumstances after longer storage. The crystallization can be removed by heating to 60 - 70 °C and stirring.

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



Lampiran 6. Spesifikasi epoksi *hardener*

TECHNICAL DATA SHEET	
EPOXY HARDENER V-140	
Epoxy Hardener V-140 is a reactive polyamide resin based on dimerized fatty acid and polyamines and designed for use with solid or liquid epoxy resin. Epoxy Hardener V-140 offers ambient cure, excellent adhesion and resistance properties which may be used in high solid coating, adhesive, sealant, primer, and enamel paint formulations, putties and small casting.	
SPECIFICATION :	
Appearance	: Brown clear liquid
Colour (gardner)	: <10
Viscosity (poise/25°C)	: 100-200
Amine Value (mg KOH/g)	: 335-550
TYPICAL PROPERTIES :	
Theoretical Amino Hydrogen Equi. Wt.	: 105
Solid %	: 100
Mix ratio with 190 EEW Epoxy Liquid	: 55 (phr)
TYPICAL PROPERTIES IN A CURED COATING :	
Tack Free Time , hours	: 5
Pot Life , minutes	: 120
Geltime , minutes	: 108
Through Cure Time, hours	: 23
TYPICAL CURED RESIN PROPERTIES :	
Hardness (shore D)	: 84
Tensile Strength (kgf/cm ²)	: 410
Flexural Strength (kgf/cm ²)	: 810
Compressive Strength (kgf/cm ²)	: 740
Shear Adhesive Strength (kgf/cm ²)	: 160
CHEMICAL RESISTANCE PROPERTIES :	
(weight change after 10 days immersion, %)	
Water destilated	: 0.4
10% Hydrochloric Acid	: 1.0
10% Sodium Hydroxide	: 0.5
5% Sodium Chloride	: 0.5
10% Sulfuric Acid	: 1.3
Methyl Ethyl Ketone	: 35
Xylene	: 0.6
Mineral Spirits	: 0.1

Lampiran 7. Spesifikasi grafit EAF PT. Krakatau Steel

WED, 29-JUL-09 12:20 DIV SSP II PTKS CLG 62 0254 371184

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

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

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

MANUFACTURE :

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

(lanjutan)

WED, 29-JUL-09 12:21 DIV SSP II PTKS CLG 62 0254 371184 P. 0

CILEGON

INVENTORY CONTROL SYSTEM Item No : 00908011

DATE : 04.12.2007

GROUP/CLASS : 443019132

Nato-name : ELECTRODE,

Material Code	Material Name & Specification	Unit	BOH	Min	Max
00908011	GRAPHITE,ELECTRODE-D406X1800MM-20-46KA	KG	9.000	50,000.000	150,000.000

GRAPHITE ELECTRODE
 GRADE: ULTRA HIGH POWER (UHP)
 DIA: 406 MM
 LENGTH: 1800 MM
 POROSITY: 15 - 26%
 BULK DENSITY: 1.66-1.72 GR/CM3
 RESISTANCE: 5.0-6.0 OHM/M
 THERMAL CONDUCTIVITY: 120-300 W/MK
 COMPRESIVE STRENGTH: 260-262 KG/CM2
 CURRENT CARRYING CAPACITY: 20-46 KA
 WEIGHT OF EACH SET POLE & NIPPLE: +/- 410KG
 ASH CONTENTS: 0.5% MAX
 AVERAGE LINEAR COEFICIENT OF THERMAL EXPANS:
 (0.5-2.5)X0.000001/K
 COMPLETE WITH ACCESSORIES :
 - 3 EA NIPPLE TRANSPORT FOR 20 TON GRAPHITE ELECTRODE
 - PRESET LONG NIPPLE
 - 1 EACH ELASTIC CRANE SUSPENSION GEAR FOR ELECTRODE 16 IN

MANUFACTURE :
 GENSUPP ELECTRODE-ARC-D406MMX1800MM-20-46KA

Lampiran 8. Tabel densitas air^[39]

	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0.999841	0.999847	0.999854	0.999860	0.999866	0.999872	0.999878	0.999884	0.999889	0.999895
1	0.999900	0.999905	0.999909	0.999914	0.999918	0.999923	0.999927	0.999930	0.999934	0.999938
2	0.999941	0.999944	0.999947	0.999950	0.999953	0.999955	0.999958	0.999960	0.999962	0.999964
3	0.999965	0.999967	0.999968	0.999969	0.999970	0.999971	0.999972	0.999972	0.999973	0.999973
4	0.999973	0.999973	0.999973	0.999972	0.999972	0.999972	0.999970	0.999969	0.999968	0.999966
5	0.999965	0.999963	0.999961	0.999959	0.999957	0.999955	0.999952	0.999950	0.999947	0.999944
6	0.999941	0.999938	0.999935	0.999931	0.999927	0.999924	0.999920	0.999916	0.999911	0.999907
7	0.999902	0.999898	0.999893	0.999888	0.999883	0.999877	0.999872	0.999866	0.999861	0.999855
8	0.999849	0.999843	0.999837	0.999830	0.999824	0.999817	0.999810	0.999803	0.999796	0.999789
9	0.999781	0.999774	0.999766	0.999758	0.999751	0.999742	0.999734	0.999726	0.999717	0.999709
10	0.999700	0.999691	0.999682	0.999673	0.999664	0.999654	0.999645	0.999635	0.999625	0.999615
11	0.999605	0.999595	0.999585	0.999574	0.999564	0.999553	0.999542	0.999531	0.999520	0.999509
12	0.999498	0.999486	0.999475	0.999463	0.999451	0.999439	0.999427	0.999415	0.999402	0.999390
13	0.999377	0.999364	0.999352	0.999339	0.999326	0.999312	0.999299	0.999285	0.999272	0.999258
14	0.999244	0.999230	0.999216	0.999202	0.999188	0.999173	0.999159	0.999144	0.999129	0.999114
15	0.999099	0.999084	0.999069	0.999054	0.999038	0.999023	0.999007	0.998991	0.998975	0.998959
16	0.998943	0.998926	0.998910	0.998893	0.998877	0.998860	0.998843	0.998826	0.998809	0.998792
17	0.998774	0.998757	0.998739	0.998722	0.998704	0.998686	0.998668	0.998650	0.998632	0.998613
18	0.998595	0.998576	0.998558	0.998539	0.998520	0.998501	0.998482	0.998463	0.998444	0.998424
19	0.998405	0.998385	0.998365	0.998345	0.998325	0.998305	0.998285	0.998265	0.998244	0.998224
20	0.998205	0.998183	0.998162	0.998141	0.998120	0.998099	0.998078	0.998056	0.998035	0.998013
21	0.997992	0.997970	0.997948	0.997926	0.997904	0.997882	0.997860	0.997837	0.997815	0.997792
22	0.997770	0.997747	0.997724	0.997701	0.997678	0.997655	0.997632	0.997608	0.997585	0.997561
23	0.997538	0.997514	0.997490	0.997466	0.997442	0.997418	0.997394	0.997369	0.997345	0.997320
24	0.997296	0.997271	0.997246	0.997221	0.997196	0.997171	0.997146	0.997120	0.997095	0.997069
25	0.997044	0.997018	0.996992	0.996967	0.996941	0.996914	0.996888	0.996862	0.996836	0.996809

(lanjutan)

26	0.996783	0.996756	0.996729	0.996703	0.996676	0.996649	0.996621	0.996594	0.996567	0.996540
27	0.996512	0.996485	0.996457	0.996429	0.996401	0.996373	0.996345	0.996317	0.996289	0.996261
28	0.996232	0.996204	0.996175	0.996147	0.996118	0.996089	0.996060	0.996031	0.996002	0.995973
29	0.995944	0.995914	0.995885	0.995855	0.995826	0.995796	0.995766	0.995736	0.995706	0.995676
30	0.995646	0.995616	0.995586	0.995555	0.995525	0.995494	0.995464	0.995433	0.995402	0.995371
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9



Lampiran 9. Peralatan yang dipakai selama penelitian

Nama Alat	Foto Alat
<p><i>Beaker Glass</i> ukuran 100 mL dan 1 L serta gelas ukur 50 mL</p>	
<p><i>Planetary Ball Mill</i></p>	
<p>Mesin Pengguncang</p>	
<p>Timbangan Digital Serta Alat Pengujian Densitas dan Porositas</p>	
<p><i>Mixer</i></p>	
<p><i>Hot Plate Magnetic Stirring</i></p>	

(lanjutan)

<p><i>Cetakan Stainless Steel</i></p>	
<p><i>Mesin Hydraulic Press</i></p>	
<p><i>Conductivity Four Point Probe Test Machine</i></p>	
<p><i>Universal Testing Machine</i></p>	