



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK SIFAT MEKANIK DAN ELEKTRIK
PELAT BIPOLAR SEL BAHAN BAKAR BERKARBON
GRAFIT DALAM Matrik POLIMER ABS**

TESIS

**HENDRO SAT SETIJO TOMO
0806420644**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
JAKARTA
JULI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK SIFAT MEKANIK DAN ELEKTRIK
PELAT BIPOLAR SEL BAHAN BAKAR BERKARBON
GRAFIT DALAM Matrik POLIMER ABS**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
gelar Magister Ilmu Material**

**HENDRO SAT SETIJO TOMO
0806420644**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
JAKARTA
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Hendro Sat Setijo Tomo

NPM : 0806420644

Tanda Tangan :

Tanggal : Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Hendro Sat Setijo Tomo
NPM : 0806420644
Program Studi : Ilmu Material
Judul Tesis : Karakteristik Sifat Mekanik dan Elektrik
Pelat Bipolar Sel Bahan Bakar Berkarbon
Grafit Dalam Matrik Polimer ABS

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Ilmu Material pada Program Studi Ilmu Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Ketua Sidang : Dr. Bambang Soegijono (.....)
Pembimbing I : Dr. Azwar Manaf (.....)
Penguji I : Dr. Suhardjo Poertadji (.....)
Penguji II : Dr. Ariadne L. Juwono (.....)
Penguji III : Dr. Bambang Soegijono (.....)

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : Juli 2010

KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan segala puji syukur kehadirat ALLAH subbahana wata'ala atas segala petunjuk dan hidayahnya yang melimpah kepada hambaNya, serta atas petunjuk dan pertolongannya jualah senatiasa tetap mengiringi dan menuntun penulis dalam usaha menyelesaikan penulisan tesis yang berjudul “**KARAKTERISTIK SIFAT MEKANIK DAN ELEKTRIK PELAT BIPOLAR SEL BAHAN BAKAR BERKARBON GRAFIT DALAM MATRIK POLIMER ABS**”. Dapat terselesaikan dengan baik.

Atas petunjuk hidayah dan inayahNyalah penulis meyembah, memuji serta mengagungkan nama ALLAH SWT, sebagai tempat mempertebal dinding-dinding spiritual dalam lubuk hati yang terdalam sehingga penulis dapat mencurahkan segala upaya demi terselesainya sebuah karya ini.

Segala kritik dan saran membangun dari semua pihak sangat penulis harapkan guna perbaikan dan penyempurnaan lebih lanjut.

Penulis sangat menyadari sepenuhnya, bahwasannya tanpa bantuan dari berbagai pihak maka tesis ini tidak akan dapat diselesaikan dengan baik. Untuk ini pada kesempatan yang amat baik ini penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang terdalam dan tiada tara kepada :

1. Kedua Orang Tuaku atas dorongan materiil dan spiritual yang sangat berarti, sehingga penulis dapat menyelesaikan studi dengan baik.
2. Istriku yang tercinta Rini Setiawati yang selalu memberikan dorongan selama menjalani kulian dan ketiga buah hatiku (Achmad Fajar Faisal, Muhammad Fauzan Wibisno dan Muhamad Farhan Abimanyu) yang dengan keceriaan dan kelucuannya memberikan insiparasi yang terbaik.
3. Bapak Dr. Azwar Manaf, sebagai Pembimbing, atas segala bimbingan, arahan, motivasi , inspirasi dan perhatian serta kesabaran sepenuhnya dalam penyusunan penelitian dari awal hingga akhir sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik.

4. Bapak Dr. Bambang Soegijono, selaku Ketua Program Studi Ilmu material yang telah memberikan fasilitas untuk menyelesaikan tesis ini.
5. Bapak Dr. Suhardjo Poertadji selaku penguji dan dosen komposit yang selalu memberi perhatian dan pengkayaan untuk peningkatan mutu tesis ini.
6. Ibu Dr. Ariadne L. selaku penguji yang selalu memberi masukan demi sempurnanya penyelesaian tesis ini.
7. Bapak Wawas Swathatafrijiah, MSc. Selaku Kepala Sentra Teknologi Polimer yang telah banyak memberikan masukan dan dorongan moril untuk penyelesaian tesis ini.
8. Keluarga besar Sentra Teknologi Polimer (Bapak Syah Johan Ali Natsiri, Phd , Bapak Jayatin MSc., Bapak Dody Andi Winarto MEng, Ibu Erny Soekoco MSc, Sdr Tulus Abimanyu , Sdr Sdr Arif AlBachroni , Sdr Durahman, Sdr Dasep Rosmana, Mbak Fitri dan Eno) yang luar biasa telah banyak membantu dalam penelitian tesis ini.
9. Keluarga Besar BPPT (Ibu Dr-ing.Eniya Listiani Dewi,MSc. Bapak Oka Mahendra, SSi dan Sdr Agus, SSi) atas kerjasama dan bantuannya selama Riset ini
10. Bapak Erfan Handoko Msi sebagai operator alat-alat atas keikhasannya membantu .
11. Mbak Siti , pak Suroto dan staf TU program Material Science yang sangat membantu dalam segala hal administrasi .
12. Bapak Dr. Budhy Kurniawan sebagai Pengajar mata kuliah Komputasi dan Penelitian
13. Seluruh Staf Sentra Teknologi Polimer, yang tidak dapat disebut satu persatu , atas dukungannya dalam menyelesaikan penelitian tesis ini hingga selesai.
14. Rekan-rekan Pascasarjana Material Science (Sdr Heru Santoso, Ian, Halima, Rachma, Ade, Nendar, Dewa, Tri, Feri dll) seangkatan yang penuh canda, tawa dan selalu memberikan dorongan selama perkuliahan .

15. Semua Terman-Teman dan Saudara-Saudaraku yang tidak dapat disebutkan satu persatu namanya, saya mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya.

Mudah-mudahan yang penulis harapkan, segala bantuan serta bimbingan ini dapat menjadikan amal ibadah kepada sesama dan semoga mendapatkan curahan berkah dan barokah dari ALLAH SWT.

”Kupersembahkan Hasil Karya yang Monumental ini kepada Agama, Nusa & Bangsa, Orang Tua serta para Perekayasa Sentra Teknologi Polimer”.

Dan pada akhirnya penulis hanya berharap agar karya ini dapat bermanfaat bagi pembaca yang budiman.



Jakarta, Juli 2010

Penulis

HALAMAN
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Hendro Sat Setijo tomo
NPM : 0806420644
Program Studi : Ilmu Material
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis karya : Tesis

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 :

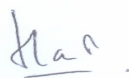
Karakteristik Sifat Mekanik dan Elektrik Pelat Bipolar Sel Bahan Bakar Berkarbon Grafit Dalam Matrik Polimer ABS

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta
Pada tanggal : Juli 2010

Yang menyatakan



(Hendro Sat Setijo Tomo)

ABSTRAK

Nama : Hendro Sat Setijo Tomo
Program Studi : Pasca Sarjana MIPA
Judul : Karakteristik Sifat Mekanik dan Elektrik Pelat Bipolar Sel
Bahan Bakar Berkarbon Grafit Dalam Matrik Polimer ABS

Komposit yang dikenal dengan PMC (*Polymer Matrix Composite*) telah lama dikembangkan. Komposit jenis ini dapat memenuhi kriteria untuk sel bahan bakar baik dari sifat mekanikal ataupun elektrikal. Material polimer termoplastik seperti halnya ABS (*Acrylonitril Butadiene Styrene*) sifatnya yang cukup ringan dan ulet bila diperkuat dengan karbon grafit yang keras dan ulet serta kompensasi berat melalui pengkayaan grafit dengan *carbon black* dapat menghasilkan sistem komposit berupa *graphite bipolar plate* untuk aplikasi sebagai sel bahan bakar. *Bipolar plate* merupakan komponen yang sangat penting dalam sistem *Proton Exchange Membran Fuel Cell* berperan untuk menghindari bercampurnya oksigen dan bahan bakar hidrogen.

Pada penelitian ini telah berhasil dibuat pelat bipolar sebagai bagian suatu sistem sel bahan bakar berbasis PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*). Material campuran grafit/*carbon black* dan ABS dicampur dengan pelarut pelarut MEK (*Metyl Etyl Keton*) dalam suatu reaktor batch dan dibantu peralatan *Ultrasonic stirrer* pada temperatur operasional sekitar 60°C. Komposit pelat dengan komposisi 75:25%, 60:40% dan 50:50% (fraksi volume) diperoleh melalui *hot pressing compression* pada tekanan 100, 150, 200 bar dengan temperatur 175, 200 dan 225°C. Pada penelitian ini juga dipelajari pengaruh temperatur heating dan kompaksi terhadap karakterisasi dari komposit *graphite bipolar plate* yang meliputi pengujian kuat tarik, kuat tekan, *flexural strength*, kekerasan, densitas, porositas, konduktivitas listrik dan struktur internal *bipolar plate*. Dari hasil penelitian ini diperoleh bahwa dengan pemanasan temperatur mendekati (225 °C) sifat mekanik kuat lentur meningkat rata – rata 22 %. Konduktivitas listrik tertinggi diperoleh dari komposit dengan komposisi 75 : 25. Komposit *bipolar plate* dengan komposisi 40 : 60 , yang diperoleh melalui pemanasan pada temperatur 225°C dan penekanan 200 bar merupakan komposit yang paling memenuhi spesifikasi bipolar plate yang digunakan secara luas.

Kata kunci: PMC, Grafit, bipolar plate, carbon black, hidrogen fuel cell

ABSTRACT

Name : Hendro Sat Setijo Tomo
Study Program : Pasca Sarjana, Material Science
Title : Characteristic of Mechanical and Electrical Properties of
ABS Polymer Containing Graphit Carbon Fuel Cell Bipolar
Plate

The so called Polymer Matrix Composite, PMC is a well developed composite materials. The PMC is considered able to fulfil requirement mechanically and electrically for fuel cell bipolar plate applications. Although, thermoplastic polymer like ABS (Acrylonitril Butadiene Styrene) is light and soft materials, however, when reinforced by hard and tough graphites, enriched further by carbon black this should resulted in a composite system which suitable for graphite bipolar plates fuel cell applications. Bipolar paltes is one of most importnat component in Proton Exchange Membran Fuel Cell system acting to prevent oxygen and hydrogen gasses mixing. This research is aiming at observing the influence of heating temperature and pressure especially on mechanical and physical properties of bipolar plates. The electrical conductivity of the plates is another objectives of current research work.

The research works have succeeded to prepare a bipolar plate for PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Graphite and carbon black powder as well as ABS matrix were mixed together with MEK (Methyl Ethyl Ketone) solvent in an ultrasonic stirrer at temperature $\sim 60^{\circ}\text{C}$. The volume rasio of carbon : matrix were fixed as 75:25% , 60:40% and 50:50% . the mixture materials were the dried in a oven at 60°C and successively pressed using a hot press compression apparatus at a pressure of 100, 150 and 200 bar and operating temperature heating of 175, 200 and 225°C respectively. The mechanical properties like tensile strength, flexural strength, compressive strength,hardness as well as the physical propertis like density, porosity, electric conductivity and internal structure were sistematicaly evaluated. Experimental results showed that heating at 225°C increased flexural strength at about 22 %. The highest electical conductivity was obtained in a bipolar plate with 75 : 25 volume ratio composition. However, the bipolar plate with 60 : 40 volume ratio which compressed under a pressure of 200 bar at 225°C was found to be the best result so far, having the closest properties with that utilized as bipolar plates in fuel cell applications.

Keywords: PMC, Graphite, Carbon Black, bipolar plate, PEMFC

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Permasalahan	4
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Kontribusi Penelitian	5
2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Sel Bahan Bakar	6
2.1.1 Deskripsi Sel Bahan Bakar	6
2.1.2 Grafit Bipolar Plate	9
2.1.3 Persyaratan Graphite Bipolar Plate	14
2.1.4 Spesifikasi Teknik	15
2.1.5 Bahan – bahan Graphite Bipolar Plate	15
2.2 Polimer Matriks Komposit	17
2.2.1 Thermoplastic	19
2.2.2 Polimer Matriks Komposit Graphitr Bipolar Plate	19
3. METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Diagram Alir Penelitian	21
3.2 Prosedur Penelitian	22
3.2.1 Proses Penimbangan Serbuk	22
3.2.2 Proses Pendispersian ABS dan Pencampuran Komposit	23
3.2.3 Persiapan <i>Driyng</i> dan <i>Grinding</i>	23
3.2.4 Persiapan Cetakan	24
3.2.5 Proses <i>Compression Molding</i>	24
3.3 Proses Pembuatan Komposit Bipolar Plate	25
3.3.1 Bahan-bahan KBP yang digunakan	25
3.3.2 Parameter Proses Penelitian	25
3.4 Karakterisasi Komposit Komposit Bipolar Plate	27
3.4.1 Pengujian Densitas dan Porositas	27
3.4.2 Pengujian Kekerasan Rockwell	28

3.4.3 Pengujian Kuat Tekan	30
3.4.4 Pengujian Kuat Lentur	31
3.4.5 Pengujian Konduktifitas Listrik	32
3.4.6 Pengamatan SEM	33
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
5. KESIMPULAN DAN SARAN	59
5.1. Kesimpulan	59
5.2. Saran	60
DAFTAR REFERENSI	61
LAMPIRAN	64



DAFTAR GAMBAR

1. Gambar 2.1 Membran PEM Fuel Cell	7
2. Gambar 2.2 Profil Membran Graphite Bipolar Plate PEM Fuel Cell.....	10
3. Gambar 2.3 Model dari Graphite Bipolar Plate untuk Fuel Cell.....	10
4. Gambar 2.4 Mechanical Properties PMC	19
5. Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	21
6. Gambar 3.2 Jembatan Timbang AWG 22.....	27
7. Gambar 3.3 Alat uji timbangan untuk Uji Densitas dan Porositas	28
8. Gambar 3.4 Alat uji <i>Ball Indentation</i> untuk uji kekerasan	29
9. Gambar 3.5 Alat uji kuat tekan UTM (<i>Universal Testing Machine</i>).....	30
10. Gambar 3.6 Alat uji kuat tarik UTM (<i>Universal Testing Machine</i>).....	31
11. Gambar 3.7 Alat uji kuat lentur UTM (<i>Universal Testing Machine</i>).....	32
12. Gambar 3.8 Alat uji Konduktivitas Listrik	33
13. Gambar 3.9 Alat uji SEM	33
14. Gambar 4.1 Nilai densitas komposit eksp. pada P:200 bar, T: 225°C	36
15. Gambar 4.2 Pengaruh kompaksi pada variasi Sintering terhadap kekerasan Pada Vf (75 : 25)	40
16. Gambar 4.3 Pengaruh kompaksi pada variasi Sintering terhadap kekerasan Pada Vf (60 : 40)	40
17. Gambar 4.4 Pengaruh kompaksi pada variasi Sintering terhadap kekerasan Pada Vf (50 : 50)	41
18. Gambar 4.5 Pengaruh kompaksi pada variasi Sintering terhadap kuat tekan Pada Vf (75 : 25)	43
19. Gambar 4.6 Pengaruh kompaksi pada variasi Sintering terhadap kuat tekan Pada Vf (60 : 40)	43
20. Gambar 4.7 Pengaruh kompaksi pada variasi Sintering terhadap kuat tekan Pada Vf (50 : 50)	44
21. Gambar 4.8 Kuat lentur teoritis dibandingkan eksp. pada P: 200, T : 225°C	46
22. Gambar 4.9 Pengaruh kompaksi pada variasi Sintering terhadap konduktiv Elektrik pada Vf (75 : 25)	49
23. Gambar 4.10 Pengaruh kompaksi pada variasi Sintering terhadap konduktiv Elektrik pada Vf (60 : 40)	50
24. Gambar 4.11 Pengaruh kompaksi pada variasi Sintering terhadap konduktiv Elektrik pada Vf (50 : 50)	50
25. Gambar 4.12 Distribusi karbon grafit terhadap ABS pada P:150,T:175°C	52
26. Gambar 4.13 Distribusi karbon grafit terhadap ABS pada P:200,T:175°C	52
27. Gambar 4.14 Distribusi karbon grafit terhadap ABS pada P:200,T:225°C	53
28. Gambar 4.15 Distribusi karbon grafit terhadap ABS pada P:100,T:175°C	54
29. Gambar 4.16 Distribusi karbon grafit terhadap ABS pada P:150,T:225°C	54
30. Gambar 4.17 Distribusi karbon grafit terhadap ABS pada P:100,T:175°C	55
31. Gambar 4.18 Komposit Pelat Bipolar pada P : 100 Bar, T : 175 °C	57
32. Gambar 4.19 Komposit Pelat Bipolar pada P : 150 Bar, T : 175 °C	57
33. Gambar 4.20 Komposit Pelat Bipolar pada P : 200 Bar, T : 225 °C	58

DAFTAR TABEL

1. Tabel 2.1. Efek ukuran distribusi partikel terhadap Sifat Grafit Bipolar	15
2. Tabel 2.2. Efek bentuk partikel grafit terhadap Sifat Graphite Bipolar...	16
3. Tabel 2.3. Standarisasi Graphite Bipolar Plate Membran Fuell Cell	17
4. Tabel 2.4. Properties Resin ABS	18
5. Tabel 2.5. Properties Grafit	19
6. Tabel 2.6. Properties Carbon Black	20
7. Tabel 3.1. Bahan-bahan Komposit Bipolar Plate	28
8. Tabel 4.1. Hasil Pengujian Densitas dan Porositas	38
9. Tabel 4.2. Hasil Pengujian Kekerasan (Rockwell α) dan Kuat Tekan ..	42
10. Tabel 4.3. Hasil Pengujian Kuat Tarik dan Kuat Lentur	48
11. Tabel 4.4. Hasil Pengujian Konduktivitas Elektrik dan Resistivity	52
12. Tabel 4.5. Perbandingan Pelat Bipolar komersial dengan Penelitian	56

DAFTAR LAMPIRAN

1. Lampiran 1. Penentuan Fraksi Volume Matrik (ABS)	64
2. Lampiran 2. Data hasil pengujian Desitas dan Porositas	66
3. Lampiran 3. Data hasil pengujian Kekerasan Ball Indentation.....	74
4. Lampiran 4. Data hasil pengujian Kuat Tekan	82
5. Lampiran 5. Data hasil pengujian Kuat Lentur	89
6. Lampiran 6. Data hasil pengujian Kuat Tarik	97



BAB I

PENDAHULUAN

I.1. LATAR BELAKANG

Sel bahan bakar adalah sebuah peralatan yang mampu mengkonversi hydrogen dan oksigen secara elektrokimia menjadi energi listrik dan air, tanpa adanya emisi gas buang yang polutif. Oleh sebab itu sel bahan bakar dikenal dengan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan sehingga diharapkan bisa mengatasi semakin parahnya dampak yang ditimbulkan dengan penggunaan bahan bakar minyak bumi (pemanasan global dan gejolak social ekonomi). Dewasa ini sel bahan bakar mendapat perhatian yang cukup serius di kalangan industri otomotif sebagai pengganti bahan bakar bensin maupun solar.

Terdapat banyak macam sel bahan bakar, diantaranya adalah *Proton Exchange Membran Fuel Cell* (PEMFC) dan *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC). Kedua jenis sel ini menggunakan polimer sebagai membrane elektrolit dan biasanya beroperasi pada suhu yang relatif rendah ($<100^{\circ}\text{C}$) dengan kerapatan daya yang cukup tinggi. Karena sifat-sifat inilah maka PEMFC dan DMFC banyak digunakan sebagai sumberdaya bagi alat-alat elektronik *portable* dan alat-alat transportasi⁽¹⁾.

Diantara kedua jenis sel bahan bakar yang banyak dikembangkan saat ini, sel bahan bakar dengan membran polimer (*polimer electrolyte membrane fuel cell/PEMFC*) merupakan jenis sel bahan bakar yang paling banyak dikembangkan. Hal ini dikarenakan jenis sel bahan bakar membrane polimer memiliki beberapa keunggulan yakni : temperatur operasi yang rendah ($80-100^{\circ}\text{C}$) sehingga sangat cocok untuk diterapkan pada kendaraan maupun perumahan, efisiensi yang cukup tinggi yakni sekitar 40 – 50 % serta penggunaan elektrolit padat berbentuk membran polimer yang cukup fleksibel sehingga tidak mudah retak dan bocor.

Pelat bipolar terbuat dari material konduktif serta tidak tembus gas, untuk itu umumnya menggunakan material grafit dan logam (aluminium, baja, titanium dan nikel) melalui proses permesinan yang cukup rumit dan mahal. Dengan

konstruksi dari material tersebut, pelat bipolar menghabiskan 80% berat dan 60% biaya total dari sebuah sel bahan bakar⁽²⁾. Hal ini tentu tidak diharapkan dalam komersialisasi PEMFC untuk aplikasi transportasi dan portable lainnya. Pelat bipolar seharusnya seringan mungkin dengan biaya yang relatif murah. Oleh sebab itu komposit matrik polimer dengan dipersi partikel-partikel konduktif dari carbon fiber dan grafit dapat dipandang sebagai pemecahan masalah. Dengan rasio permukaan terhadap volume yang sangat besar dibandingkan dengan material ruahnya, partikel-partikel dari serat karbon dan grafit didalam matrik polimer diharapkan mampu memberikan performa yang lebih bagus sebagai hasil kombinasi sinergis konduktivitas listrik dan sifat mekanis yang tinggi, seiring dengan penurunan berat secara keseluruhan menjadi lebih ringan.

Pelat komposit berbasis grafit dibuat dari kombinasi grafit atau filler serbuk karbon dan resin polimer dengan metode konvensional dibuat dengan memanfaatkan peralatan *injection molding* atau *compression molding*. Keuntungan menggunakan sistem ini adalah biaya yang lebih murah, memiliki fleksibilitas yang tinggi dan lebih mudah untuk dilakukan fabrikasi serta lebih ringan jika dibandingkan dengan plate logam dengan grafit. Saluran untuk aliran gas dapat dicetak secara langsung pada pelat, hal ini sudah bisa mengurangi biaya untuk *machining* jika menggunakan pelat logam. Material *thermoplastic* ataupun *thermoset* bisa digunakan untuk fabrikasi pelat⁽³⁾.

Membran polimer merupakan komponen yang sangat penting dalam PEMFC dan DMFC mengingat peran komponen dalam memisahkan reaktan dan menjadi sarana transportasi ion hydrogen (proton)⁽⁴⁾ yang dihasilkan oleh reaksi anoda menuju katoda yang menghasilkan energi listrik dapat terjadi. Dengan demikian dibutuhkan bahan membran yang memenuhi sifat-sifat yang dibutuhkan untuk sel bahan bakar.

Dengan perkembangan teknologi saat ini diperlukan suatu pengembangan metode baru yang bisa menawarkan solusi teknik yang mengedepankan kemampuan sistem. Saat ini telah dikembangkan suatu metode komposit yang dikenal dengan PMC (Polymer matrix Composite) yang dapat menghasilkan produk yang memenuhi kriteria untuk bahan *fuel cell* baik dari *mechanical* maupun *electrical properties*.

Mekanisme proses Powder metallurgy (P/M) dikendalikan oleh beberapa parameter proses antara lain penekanan dan sintering. Parameter proses yang sesuai akan menghasilkan produk *Graphite Bipolar Plate* yang sesuai dengan fungsinya sebagai membran sel bahan bakar. Dan ini merupakan metode yang paling hemat untuk memproduksi komposit matrik Poliemr. P/M memiliki kemudahan dalam fabrikasi sehingga biaya menjadi lebih murah. Terutama bila kita bandingkan dengan metode lainnya : *Injetion Moulding, liquid-state process (compocasting) dan pressurized liquid-metal infiltration*.

Karbon grafit yang keras dan kuat serta resin Acrilonitril Butadiene Stirene yang cukup ringan dan ulet merupakan gabungan dari sifat-sifat yang diharapkan bisa memenuhi produk komposit yang berupa *Graphite Bipolar Plate*. Kedua material tersebut jika digabungkan akan menjadi komposit yang baru yaitu komposit matrik polimer.

Pemilihan proses P/M pada pelaksanaannya tidak terlalu rumit dikarenakan prosesnya yang sederhana bila dibandingkan dengan proses *fabrikasi* yang lain. Hal ini dikarenakan tidak memerlukan peralatan yang rumit serta berlangsung secara simultan dan efektif. Mekanisme reaksi pada proses P/M terjadi berdasarkan besaran kompaksi yang diberikan, semakin besar takanan yang diberikan maka produk yang dihasilkan semakin padat sehingga sifat-sifat yang dihasilkan semakin bagus.

Komposit yang diperoleh dengan proses P/M mempunyai *mechanical properties* yang memadai serta stabil pada temperatur tinggi sehingga tepat sekali untuk diaplikasikan pada produk elemen membran sel bahan bakar yang membutuhkan sifat-sifat yang memadai pula yang nantinya akan digunakan untuk bahan membran PEM fuel cell jenis bahan *Graphite Bipolar Plate*. Penelitian tentang sel bahan bakar jenis PEMFC (*Proton Exchange Membran Fuel Cell*) ini telah dipelopori oleh Dan Connor's Gen Cell Corporation dimana dengan menggunakan bahan metalik (*stainless steel dan aluminum*) namun jenis bahan ini umur kerja komponen relatif pendek akibat pengaruh korosi pada membrannya⁽⁵⁾. Kemudian Lesdzek Gladczuk dan timnya membuat bahan membran dari bahan tantalum, Tantalum keras serta tahan korosi, sehingga sesuai untuk penggunaan sebagai piring bipolar untuk proton bertukaran selaput Polimer Exchange

Membran (PEM) sel bahan bakar, bahan tersebut masih terlalu berat untuk diaplikasikan pada membran *fuel cell* dan harganya relatif tinggi, serta bahan ini kurang reaktif terhadap Hidrogen sehingga masih perlu pembenahan⁽⁶⁾. Pada tahun berikutnya maka riset mengenai bahan PEM Fuel Cell dilakukan oleh tim departemen sains dan rekayasa material Institut Teknologi Georgia⁽⁷⁾, menggunakan sumber energi portabel dari bahan dari zat kimia triazole yang secara signifikan mampu meningkatkan konduktivitas dan mengurangi bantuan embun dalam membran polimer namun secara teknis penelitian ini masih terbatas pada temperatur operasionalnya yang rendah sehingga sejumlah karbon mono oksida dalam bahan bakar hidrogen terjadi dapat terkontaminasi dengan katalis platinya dan untuk mencegah kontaminasi ini maka bahan bakar hidrogen harus diproses melalui pemurnian gas yang sangat mahal. Untuk itu Dr.Meilin Liu dan timnya masih memerlukan penggantian material polimer lain agar didapat PEM dengan temperatur operasi yang lebih tinggi. Sehingga efisiensi kerja *fuel cell* dapat tercapai.

I.2. RUMUSAN MASALAH

Penelitian pelat bipolar berbasis grafit dengan kombinasi grafit dengan material polimer sudah banyak dilakukan namun pembuatan pelat bipolar dengan penambahan *carbon black* masih belum banyak dilakukan. Penambahan *carbon black* ini diharapkan bisa meningkatkan sifat mekanik dan elektriknya. Pada penelitian ini akan dilakukan pengaruh penambahan fraksi serbuk karbon, tekanan kompaksi dan temperatur sintering.

Secara umum perumusan masalahnya dapat diuraikan sebagai berikut :

- Bagaimana pembuatan pelat bipolar dengan material grafit, polimer ABS dan *carbon black*.
- Bagaimana pengaruh tekanan kompaksi dan temperatur sintering terhadap sifat mekanik dan elektrik.

1.3 RUANG LINGKUP PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan ini meliputi:

1. Pembentukan pelat bipolar dengan material grafit, polimer ABS dan *carbon black* dengan formulasi ditentukan.
2. Karakterisasi pelat bipolar melalui pengujian sifat mekanik dan sifat konduktif elektrik.

1.4. TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan antara lain adalah untuk :

1. Pembuatan material *Composite Bipolar Plate* membrane fuel cell Komposit dari campuran matriks *polimer Acrylonitril Butadiene Styrene reinforced Carbon Graphite* melalui proses pencampuran Ultrasonic untuk mendapatkan material komposit sesuai dengan persyaratan plate Bipolar yang ada di pasaran.
2. Karakterisasi produk material *Composite Bipolar Plate* dari proses kompaksi terhadap variable temperature sintering dan tekanan kompaksi untuk mendapatkan proses pembuatan material komposit Bipolar yang memiliki sifat-sifat yang unggul baik mekanik ataupun konduktivitasnya.
3. Parameter yang sesuai dengan *Composite Bipolar Plate* dipasaran sebagai komponen sel bahan bakar .

1.5. KONTRIBUSI PENELITIAN

Pada penelitian ini diharapkan bisa berkontribusi dalam hal :

- Pengembangan ilmu pengetahuan bahan khususnya bahan Polimer Matriks Komposit komposit melalui proses pencampuran (*solution blending*) dengan bantuan peralatan Ultrasonic.
- Mendapatkan alternative material bipolar plate dalam sistem sel bahan bakar yang memiliki sifat-sifat mekanik ataupun elektrik yang memadai sesuai dengan standar yang ada di pasaran.
- Substitusi bahan *Composite Bipolar Plate* sebagai salah satu komponen elemen sel bahan bakar.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sel Bahan Bakar

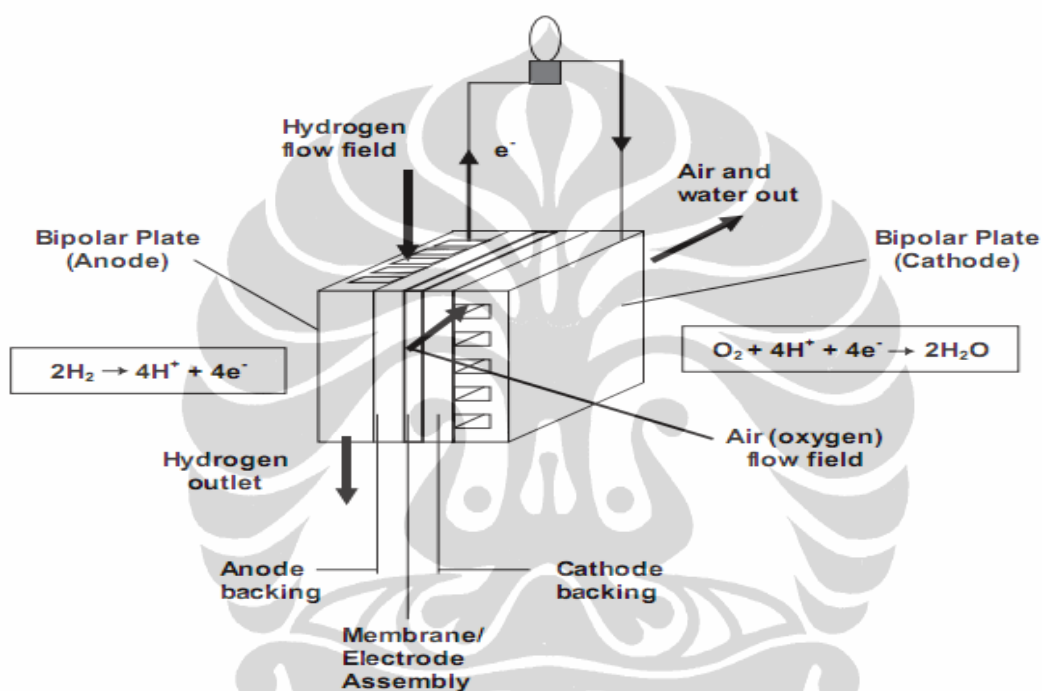
2.1.1. Deskripsi Sel Bahan Bakar

Sel bahan bakar adalah suatu elektro kimia yang dikonversi menghasilkan listrik dari bahan bakar (H_2) pada sisi anoda dan oksida pada sisi katoda (O_2) untuk menciptakan energi dengan air dan panas sebagai satu-satunya hasil sampingan. Reaksi ini bisa terjadi karena kehadiran elektrolit. Dimana bahan-bahan yang bereaksi mengalir kedalam sel dan bereaksi menghasilkan aliran keluar sementara itu elektrolit tetap didalam sel. Sel bahan bakar dapat beroperasi secara terus menerus sepanjang aliran bahan bakar dan oksida yang diperlukan terpenuhi. Suatu sel bahan bakar memanfaatkan hydrogen sebagai pembakar dan oksigen (biasanya dari udara) sebagai oksidan. Gas hidrogen dalam sel bahan bakar bekerja dengan sistem reverse elektrolisis. Elektrolisis adalah elektrifikasi air yang memisahkan air menjadi hidrogen dan oksigen ⁽⁴⁾ . Bahan bakar hidrogen dihasilkan untuk mengontrol reaksi antara hidrogen dan oksigen menghasilkan listrik, air dan panas. Bahan bakar lainnya biasanya berasal dari hidrokarbon dan alkohol. Oksida lainnya termasuk chloride dan chloride oksida.

Rangkaian bahan bakar sel pada dasarnya terdiri atas dua elektroda (piring *katoda* dan *anoda*, elektroda negatif dan positif) dan elektrolit (medium yang bisa mengangkut ion-ion untuk mengisi partikel sub-atom) memisahkan kedua elektroda dari satu sama lain. Bahan bakar-sel biasanya digolongkan dalam *electrolyte* bebas, PEM bahan bakar-sel. Merupakan rangkaian untuk proton-bertukaran selaput, yang merupakan film polimer tipis yang menguraikan ion hidrogen untuk melewatinya namun menghalangi elektron. Dengan begitu, maka atom hidrogen mempunyai peran untuk menguraikan elektron sehingga lepas dari piring anode pada bahan bakar-sel (piring positif) pada katalis platina, proton (bahan inti) merangkaikan PEM dan elektron mengelilingi kontak ke piring katoda untuk mengarahkan pada rangkaian sirkuit listrik, sehingga membuat arus bergerak, (yang mengerjakan kerja listrik), seperti menggerakkan bola lampu ringan atau mesin listrik maupun peralatan elektronika lainnya Dan pada sisi lain PEM (di piring katoda, elektroda negatif), menguraikan

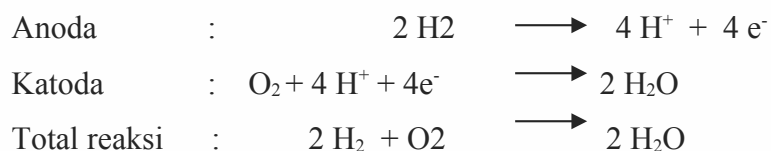
hidrogen dengan oksigen untuk membentuk air sebagai hasil sisa dari rangkaian sirkuit hidrogen.

Sel bahan bakar bekerja dengan katalis, dimana pemisahan komponen elektron dan proton terjadi, gaya elektron melewati suatu sirkuit, dimana disini terjadi konversi reaktan menjadi tenaga listrik. Satu sel bahan bakar sebagai mana tergambar dibawah ini :



Gambar 2.1 Membran PEM Fuel Cell⁽⁵⁾

Reaksi yang terjadi pada sel bahan bakar adalah sebagai berikut :



Pelat bipolar berbasis grafit sudah digunakan dalam PEMFC untuk keperluan militer, ruang angkasa serta keperluan khusus lainnya. Plate grafit memiliki sifat konduktifitas yang bagus, ketahanan korosi yang sangat bagus dan memiliki density yang lebih rendah dibandingkan plate logam. Permasalahan dalam penggunaan plate grafit adalah memiliki struktur yang porous serta sifatnya yang brittle dan perlunya biaya saat

pembuatan aliran gas ke dalam plate. Plate bipolar logam biasanya memiliki bulk eletrikal dan thermal konduktiviti yang tinggi, sifat mekanik yang bagus dan gas permeability yang hampir bisa ditiadakan. Suatu teknik yang baru seperti pengerolan secara kontinu atau stamping dalam bentuk batch dikembangkan untuk memproduksi bipolar plate logam. Kekurangan penggunaan logam untuk bipolar plate adalah kurang memiliki ketahanan terhadap sifat korosi serta perlunya perlakuan pelapisan dalam bentuk lapisan yang tipis untuk perlindungan, cukup sulit untuk dilakukan⁽⁵⁾. Satu hal yang menyebabkan *bipolar plate* berbasis logam kurang disukai untuk diterapkan pada otomotif adalah beratnya.

Selain membran polimer yang berfungsi sebagai elektrolit dimana reaksi konversi berlangsung, komponen lain yang tidak kalah penting dalam sistem sel bahan bakar ini adalah pelat bipolar. Secara mekanis pelat bipolar ini berfungsi menjaga integritas susunan sel bahan bakar. Selain itu, pelat bipolar ini berfungsi sebagai pengatur distribusi gas hidrogen oksigen serta sebagai tempat berkumpulnya arus listrik yang dihasilkan serta sebagai tempat pembuangan hasil reaksi serta panas yang terbentuk melalui media pendingin. Fungsi pelat bipolar lainnya adalah digunakan untuk menggabungkan sel bahan bakar satu dengan lainnya secara seri dan sebagai barrier secara fisik untuk menghindari bercampurnya oksigen, bahan bakar dan air pendingin.

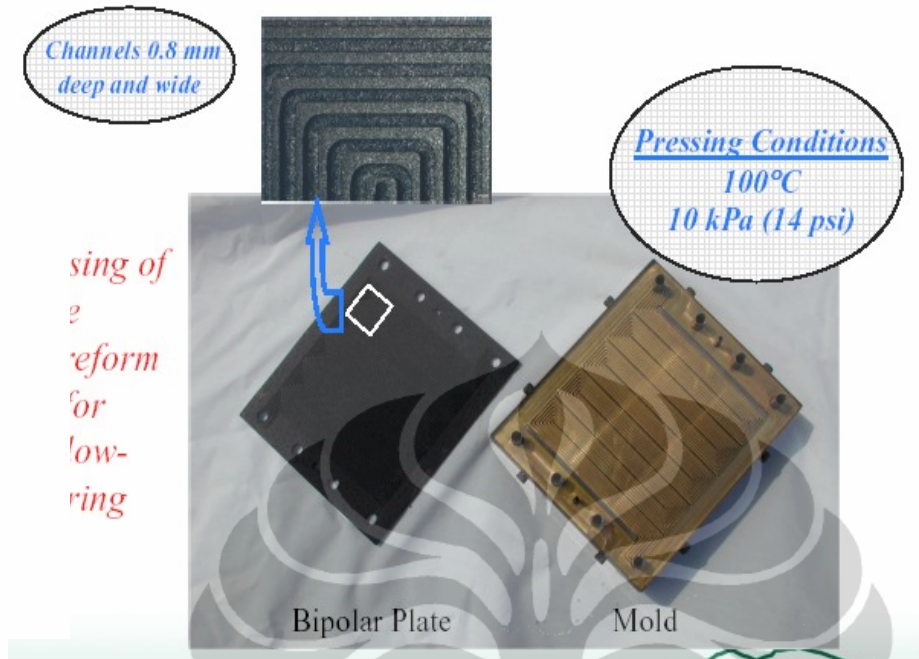
Pelat karbon/karbon komposit yang dikembangkan Oak Ridge National Laboratory menggunakan cetakan slurry serat karbon dengan resin phenplik diikuti dengan sistem CVI (chemically vapor-infiltrated carbon) menghasilkan suatu plate bipolar dengan konduktivitas dan kekuatan flexural yang tinggi tetapi tidak efektif untuk biayanya⁽⁶⁾.

Secara umum sel bahan bakar ini di klasifikasikan sebagai pembangkit tenaga (*power generator*) sebab sel bahan bakar ini dapat beroperasi secara terus-menerus atau selama ada pasokan bahan bakar (*fuel*) dan oksidan. Karakteristik umum suatu sel bahan bakar adalah sebagai berikut⁽⁷⁾:

- a. Sangat efisien (>85%).
- b. Modular (dapat ditempatkan dimana diperlukan).
- c. Ramah lingkungan (tidak berisik, emisinya rendah).
- d. Panas yang terbuang dapat di *recovery*.
- e. Bahan bakarnya *flexible*.
- f. Cocok untuk keperluan *unattended operation*.

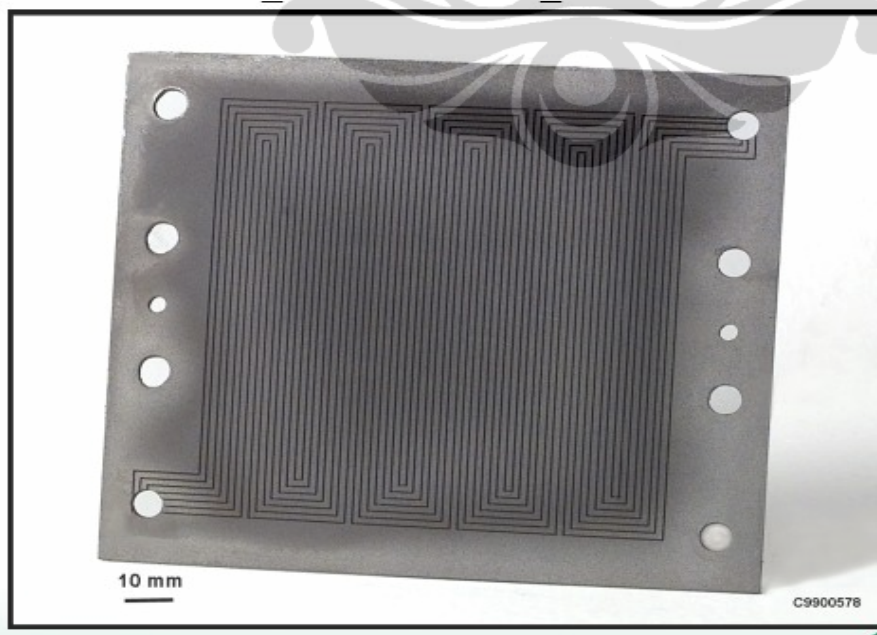
2.1.2 Graphite Bipolar Plate

Graphite Bipolar Plate atau Piring Bipolar merupakan elemen dari membran *Fuel Cell* yang berfungsi sebagai penukar proton pada selaput bahan bakar sel, di mana polimer dipakai sebagai map dan grafit digunakan untuk mengisi energi listrik untuk memberikan tekanan pada pergerakan arus listrik didalam *Fuel Cell*. Efek dari ukuran partikel grafit dan bentuknya akan berpegaruh pada kinerja piring bipolar, seperti konduktivitas listrik, kekuatan⁽⁸⁾, dan *mechanical properties* yang lain. Ukuran serta bentuk dari partikel grafit akan mempengaruhi sifat elektrik maupun mekanik dari *Graphite Bipolar Plate* sehingga dengan pengurangan dari ukuran partikel grafit maka konduktivitas listrik dan konduktivitas thermometric akan berkurang, tetapi kekuatan lentur (*flexural*) akan meningkat setelah dilakukan perlakuan pada serbuk grafit. (Grafit berbentuk nodul merupakan bentuk yang ideal pada pengaruh dari sifat membran tersebut). kekuatan lentur piring bipolar meningkat, dan juga konduktivitas listrik akan bertambah tetapi konduktivitas thermal berkurang akibat dari tekanan ion-ion listrik pada *Fuel Cell*. Bahan bakar pada membran penukaran proton cell sebagai sumber energi yang dapat dirubah menjadi energi listrik. Meskipun ada keuntungan dari mekanisme kerja ion ini namun membran *fuel cell* dapat mengalami hambatan gerakan ion-ion akibat dari lambatnya sebagian besar dari proses fabrikasi Piring bipolar, membran *Graphite Bipolar Plate* adalah piring grafit yang menggunakan saluran aliran ion-ion listrik yang menggunakan tekanan sebanyak 60% dari mekanisme kerja ion⁽⁹⁾. Oleh sebab itu untuk meningkatkan kinerja dari *fuel cell*, penurunan dari gerakan ion-ion partikel dari *Graphite Bipolar Plate* perlu dikembangkan dengan pembuatan membran yang dapat menghantarkan ion-ion listrik seperti Polimer Matriks Komposit, dengan gabungan atau campuran bahan logam, maka biaya proses manufaktur dari Graphite Bipolar Plate akan berkurang sekitar $\pm 15\% - 29\%$, hal ini merupakan penghematan dari proses fabrikasi membran *fuel cell*⁽¹⁰⁾. Pembuatan kontur piring bipolar membran *fuel cell* dengan tinggi permukaan membran yang sesuai dengan laju alir dari konduktivitas listrik, ditunjang dengan *properties* yang memadai sehingga kapasitas dari ion penukar listrik cukup stabil terhadap pengaruh berat, tekanan dan unsur kimia pada lingkungan membran *fuel cell*, akibat dari hambatan gas, dan berat dari komponen⁽¹¹⁾. Gambar 2.2 dibawah adalah contoh hasil Membran Grafit Bipolar Plate untuk sistem sel bahan bakar PEMFC pada kondisi penekanan 10 kPa dan temperatur 100°C.



Gambar 2.2 Profil Membran Graphite Bipolar Plate PEM Fuel Cell⁽¹²⁾.

Gambar 2.3 dibawah menunjukkan tipe dari model Graphite Bipolar Plate untuk tempat penyaluran bahan bakar hidrogen ataupun oksigen pada sistem sel bahan bakar PEMFC.



Gambar 2.3 Model dari Graphite Bipolar Plate untuk Fuel Cell⁽¹²⁾.

Sebagai kandidat untuk memenuhi syarat ini bagi membran Graphite Bipolar Plate maka karbon kombinasi sudah dikembangkan secara luas⁽¹³⁾. Kebanyakan kondisi dari Karbon gabungan atau material yang digunakan berkumpul ke dalam single sel, kombinasi dari Karbon Grafit menunjukkan *performance* hampir sama dengan yang dimiliki oleh piring bipolar dari bahan *metalik*. Sehingga efek dari model tersebut akan berpengaruh pada ukuran partikel grafit dan bentuknya dan kinerja piring bipolar menjadi tidak stabil⁽¹⁰⁾.

Grafit dan isinya pada aplikasi piring bipolar sudah diperoleh kemajuan yang berarti. Pada kondisi dimana pengaruh dari partikel grafit dapat memperbaiki ukuran dan *granularity* distribusi pada *Graphite Bipolar Plate* Untuk perkembangannya maka kombinasi bipolar piring (*Graphite Bipolar Plate*) dapat dipergunakan untuk memenuhi keperluan fungsi dari kerja membran *fuel cell* tersebut⁽¹⁴⁾.

Untuk menunjang mekanisme kerja dari Graphite Bipolar Plate maka Binder dari *Graphite Bipolar Plate* dibuat dari bahan Polimer jenis Resin yang tidak hanya memainkan tugas map pada *bipolar plate* namun mekanisme proses pembuatan *Graphite Bipolar Plate* juga memegang peranan penting dari keberhasilan *properties* dari membran⁽¹⁵⁾. *Properties* dari *Graphite Bipolar Plate* merupakan faktor utama yang mempengaruhi kinerja dari membran *Fuel Cell*, seperti konduktivitas listrik, kekuatan dan *Mechanical Properties* yang lain. Polimer dengan ikatan atom molekularnya memiliki *konfigurasi* yang baik karena memiliki elektron tunggal sehingga pasangan tunggal elektron mudah dipolarisasikan atau dirangkaikan. Bagian dari konfigurasi polimer dapat menyalurkan energi listrik dengan mudah sehingga dapat terbentuk rangkaian listrik maka polimer dengan kutub atom kelompok din molekular konfigurasinya secara teoritis dapat dipakai sebagai map/membran⁽¹²⁾.

Zhang Jie⁽⁸⁾, memberikan hasil pada penelitiannya bahwa hasil dari tes atas efek sebanyak tiga bagian dari ukuran partikel berbeda pada grafit yang berbentuk seperti serpih pada *Graphite Bipolar Plate* (ditunjukkan pada tabel 2.1 dan tabel 2.2) menunjukkan konduktivitas listrik atau konduktivitas termometrik berbanding lurus dengan kompaksi yang menunjukkan nilai dari konduktivitas listrik atau termometrik. Hasil menunjukkan bahwa konduktivitas listrik dan termometrik sampel cenderung dipengaruhi oleh pengurangan ukuran partikel dan melebarnya partikel sehingga granulariti distribusi serbuk mempengaruhi sifatnya. *Electrical properties* melibatkan

kontak serbuk dengan listrik pada material yang menghasilkan pembentukan saluran listrik⁽¹¹⁾. Grafit yang seperti serpih yang alami adalah bagian dari material konduktor listrik, namun sebagai membran masih memerlukan pelapisan dengan lapisan map yang tidak menimbulkan rintangan yang mencegah partikel grafit dari kontak satu sama lain untuk membentuk jaringan-jaringan listrik, dengan menaikkan ukuran partikel dan pelebaran distribusi granulariti, tindakan rintangan seperti itu dapat mengurangi konduktivitas listrik dan termometrik. Ukuran partikel dan distribusi granulariti sebesar 200~250 mesh sampai maksimal 325 mesh. grafit yang seperti serpih dapat mengalami penambahan isi partikel dengan baik dan dapat mengurangi ukuran pori/lobang di antara partikel di dalam bahan matriks, serta dapat meningkatkan densitas dan meningkatkan kekuatan lentur/ *flexural strength*. Efek bentuk grafit partikel pada *performance* bipolar plate partikel Grafit pada bahan kombinasi dapat menghasilkan bahan kombinasi dengan *properties* yang relatif tinggi. Untuk menghasilkan *Properties* yang memadai maka harus ditunjang dengan kompaksi yang maksimum namun untuk meningkatkan *electrical properties* maka tidak hanya kompaksi maksimum saja yang diperlukan namun bentuk dari grafit seperti serpih dapat diganti oleh bentuk *spherical* grafit sehingga kinerja piring bipolar dapat meningkat (seperti ditunjukkan pada tabel 2.2). Hasil tersebut menunjukkan bahwa grafit berbentuk bola yang seperti serpih, dapat menaikkan sifat listrik dan sifat termometrik dari *Graphite Bipolar Plate* sehingga dapat mengurangi ukuran partikel dan melebarkan distribusi dari granulariti namun karena densitas partikel sangat kecil maka dapat memperkuat fungsi kekuatan lentur/*flexural*. (Sample berukuran 250~325 mesh partikel grafit menghasilkan *properties* yang maksimum sebagaimana ditunjukkan pada tabel 2.1 dibawah ini).

Tabel 2.1 Efek ukuran distribusi partikel grafit terhadap Sifat Graphite Bipolar Plate⁽¹⁵⁾.

Ukuran Partikel (mesh)	Susunan Partikel	Mayoritas Konduktifitas Listrik (S/cm)	Konduktifitas Panas (W/m °C)	Kekuatan Lentur (MPa)
200-250 mesh	//	78,8	21,00	27,5
	I ₋	683,3	121,40	
250- 325 mesh	//	76,0	20,30	35,0
	I ₋	566,5	113,00	
>325 mesh	//	45,8	13,00	39,8
	I ₋	420,3	105,47	

Tabel 2.2 Efek bentuk partikel grafit terhadap Sifat Graphite Bipolar Plate⁽¹⁵⁾.

Sampel	Ukuran Partikel (mesh)	Susunan Partikel	Mayoritas Konduktifitas Listrik (S/cm)	Konduktifitas Panas (W/m °C)	Kekuatan Lentur (MPa)
Sperica Graphite	250- 325 mesh	//	84,0	18,9	39,5
		I ₋	387,3	71,9	
	>325 mesh	//	60,0	12,5	44,0
		I ₋	326,9	61,4	
Fake-like Graphite	250- 325 mesh	//	76,0	20,3	35,0
		I ₋	566,5	113,0	
	>325 mesh	//	45,8	13,0	39,8
		I ₋	420,3	105,5	

2.1.3 Persyaratan Graphite Bipolar Plate

Graphite Bipolar Plate untuk penggunaan pada *electrochemical cel* secara manufaktur harus dapat dijangkau oleh pasar sehingga dapat diterapkan pada dunia industri untuk itu diperlukan proses yang efisien dan biaya prosesnya murah (murah diproduksi secara produksi masal) Penggunaan logam ringan seperti magnesium atau aluminium yang ringan secara bersamaan dapat memperbaiki konduktivitas listrik maupun konduktifitas termal jika dibandingkan dengan bagian-bagian karbon konvensional namun secara teknis logam tersebut masih kurang memenuhi syarat. Untuk itu maka hal-hal yang berkaitan dengan aplikasi dari membran fuel cell harus mendapatkan standar dari prototipe komponen tersebut

maka dari itu *Superior Graphite Corporation* dan *Stimsonite Corporation* menetapkan standarisasi membran *Graphite Bipolar plate* yang dapat dibentuk dan sudah diterapkan dengan menggunakan paten untuk PEM Plates⁽¹⁶⁾, maka dibentuklah *commercialize* produksi grafit yang dibentuk dari alat pemisah bipolar. Bahan dan biaya produksi untuk kuantitas-kuantitas komersial piring disetarakan di bawah \$10/kW. *Graphite Bipolar Plate* sudah diuji dalam dua tahun yang lalu sehingga dapat digunakan sebagai sel bahan bakar yang menghasilkan energi yang sangat tinggi. Produksi secara majemuk dan *kontinyu* mengkondisikan homogenitas dari bahan berkualitas tinggi *Graphite Bipolar Plate* sebagai bahan bakar dianjurkan dapat diterapkan untuk aplikasi-aplikasi pada suhu yang tinggi dan mempunyai konduktivitas listrik yang istimewa⁽⁵⁾.

2.1.4. Spesifikasi Teknik

Graphite Bipolar Plate yang dibentuk dari kondisi tumpukan-tumpukan plate secara isothermal. Pelaksanaan tumpukan-tumpukan sel bahan bakar juga melibatkan non isothermal untuk merubah kondisi dari aktif menjadi sejuk, ukuran anode disejukkan dengan air katoda piring bipolar yang dibentuk *IGT by PEM Plates. Manufacturing* biaya dikira-kira $\pm \$6/\text{kW}$, agar dapat memenuhi efisien dari prosesnya maka jumlah biaya piring alat pemisah yang dibentuk sebaiknya di bawah $\$10/\text{kW}$ ⁽¹⁶⁾. *Standard properties* dari spesifikasi *Graphite Bipolar Plate* seperti ditunjukkan pada tabel 2.3.

Tabel 2.3. Standarisasi Graphite Bipolar Plate membran Fuel Cell.⁽⁵⁾

Properties	Standard
Density	1. 90 g/cm
Porosity	0 %
Flexure Strength	40 MPa atau 6090 psi
Compressive Strength	50MPa atau 7250 psi
Hardness	40 – 100 HRB
Electrical Conductivity	> 50 $\mu\text{S} / \text{cm}$
Permeabilitas	< $2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{cm}^2\text{-sec}$
Material Cost	\$ 4/kW
Manufactured Cost	<\$ 10/kW

2.1.5. Bahan – Bahan Graphite Bipolar Plate

2.1.5.a Resin Acrylonitril Butadiene Styrene

Resin ABS dengan formula $(\text{C}_8\text{H}_8)_x \cdot (\text{C}_4\text{H}_6)_y \cdot (\text{C}_3\text{H}_3\text{N})_z$ adalah turunan acrylonitril, butadiene dan styrene. Acrylonitril adalah sintetik monomer dari propilen dan amonia,

butadiene adalah hasil dari steam cracking fraksi C4 sedangkan styrene adalah dibuat dari dehidrogenasi ethyl benzene dari reaksi etylen dan benzene. Keuntungan dari ABS adalah merupakan gabungan kekuatan dan kekakuan dari acrilonitril dan polimer styren dengan ketangguhan dari karet polibutadiena. Sifat lainnya yang cukup menonjol adalah tahan terhadap panas serta ketahanan terhadap benturan ⁽¹⁷⁾. Sifat ini cukup cocok untuk diterapkan sebagai material Bipolar Plate tipe PMEFC.

Sifat dari resin ABS adalah memiliki kestabilan terhadap asam sulfat dan nitrit, aldehid, keton, ester dan hidrocarbon terchlorinasi. Tidak larut dalam alkohol, hidrokarbon aliphatik dan minyak mineral. Sifat-sifat mekanik dari material resin ABS ditunjukkan pada tabel 2.4. dibawah ini .

Tabel 2.4. Properties Resin ABS⁽¹⁷⁾

Sifat Fisik	Satuan	Nilai
Specific Gravity	-	1,04
Tensile Strength	psi	6500
Flexural Strength	psi	10000
Water Absorbtion	%	0,3 – 0,4

2.1.5.b Grafit

Grafit yang ditambahkan dalam proses pembuatan polimer matriks komposit ini berfungsi sebagai *reinforced* (penguat). Grafit (disebutkan oleh Abraham Gottlob Werner pada 1789 dari Greek "untuk menarik/menulis", untuk penggunaannya pada pensil) adalah salah satu *alotropy* karbon. Tidak seperti intan, grafit adalah konduktor listrik, dan bisa dipakai, untuk bahan di elektroda lampu busur listrik. Karena electron dapat mengalir melalui struktur mikro dari graphite, Grafit mempunyai perbedaan *temperature melting* yang tinggi dan dapat menjadi bentuk karbon padat yang paling stabil sehingga kekerasan dari graphite sangat tinggi, grafit mempunyai nilai kekerasan yang paling tinggi di atas *anthracite*, walaupun biasanya tidak dipakai sebagai bahan bakar karena sukar menyala⁽²⁰⁾. Sifat mekanik dan elektrik pada meterial grafit ditunjukkan pada tabel 2.5 dibawah ini.

Tabel 2.5. Properties Grafit⁽¹⁷⁾.

Sifat Fisik	Satuan SI	Nilai
Densitas	g/cm ³	2,2
Bentuk Allotropik	-	Kristalin

Titik Lebur	°C	3700±100
Titik Didih	°C	4830
Sifat Thermal		
Konduktivitas Panas	kal/gram °C	0,057
Tahanan Listrik	ohm	1,375 x 10 ⁶

2.1.5.c Karbon Hitam

Karbon hitam adalah bahan yang dihasilkan dari pembakaran produk minyak tanah yang tidak sempurna (tidak terbakar habis), Karbon hitam merupakan bentuk karbon nirbangun yang mempunyai bidang permukaan yang sangat tinggi terhadap volume rasio, dan sebagai bagian dari unsur karbon yang dapat dikembangkan untuk aplikasi nanomaterials geometri dari karbon hitam mirip dengan jelaga tetapi dengan bidang permukaan yang jauh lebih tinggi ke volume rasio. *Carbon black* sering dipakai sebagai zat warna dan sebagai bahan campuran dari produk karet dan plastik. Dikenal dengan nama karsinogenik dan berbahaya ke saluran pernapasan jika dihirup, karena berisi dari rangkaian *Polycyclic aromatic hydrocarbons*. Penggunaan volume carbon black yang paling tinggi sebagai pengisi memperkuat pada produk, dengan penambahan 50% dari rasio beratnya carbon black dapat memperbaiki electrical propertiesnya namun menurunkan mechanical propertiesnya⁽²⁰⁾.

Tabel 2.6 dibawah ini menunjukkan sifat karbon hitam secara umum.

Tabel 2.6. *Properties Carbon Black* ⁽¹²⁾.

Nomor Atom	6
Massa Atom	12.011 g.mol ⁻¹
Electronegativity according to Pauling	2.5
Density	2.2 g/cm ⁻³ at 20°C
Titik Cair	3652 °C
Titik lebur	4827 °C

Radius Vanderwaals	0.091 nm
Radius Ionic	0.26 nm (-4) ; 0.015 nm (+4)
Isotop	3
Shell Electronic	[He] 2s ² 2p ²
Energy of first ionisation	1086.1 kJ.mol ⁻¹
Energy of second ionisation	2351.9 kJ.mol ⁻¹
Energy of third ionisation	4618.8 kJ.mol ⁻¹
Discovered by	The ancients

2.2. POLIMER MATRIKS KOMPOSIT.

Komposit Matrik Polimer merupakan gabungan dari sekurang-kurangnya dua jenis material, dimana salah satunya adalah Polimer sebagai material induk (matriks) dan material yang kedua sebagai penguat (*reinforced*). Polimer yang dipakai sebagai matriks biasanya adalah thermoseting polimer. fungsi utama penguat adalah untuk menunjang sebagian besar beban yang diberikan, sedangkan fungsi matrik adalah untuk mengikat penguat menjadi satu dan untuk meneruskan dan mendistribusikan beban eksternal kepada penguat individual. Pada komposit matriks polimer jenis resin atau sistem damar untuk proses produksi kompositnya menggunakan dua macam dasar: thermosetting dan thermoplastic. Thermosetting jenis resin pada perkembangan akhir-akhir ini sering digunakan untuk berbagai aplikasi, sedangkan untuk jenis thermoplastics dalam aplikasinya hanya terbatas pada penggunaan tertentu karena temperaturnya yang rendah⁽²²⁾.

2.2.1. Thermoplastics.

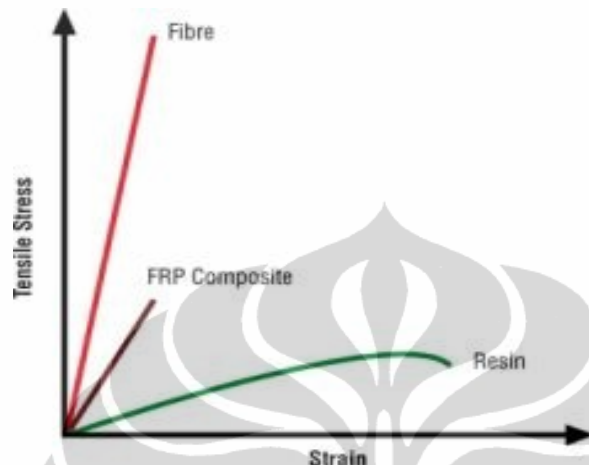
Thermoplastics sekarang ini melambangkan sebagian industri PMC yang relatif kecil. Mereka biasanya disediakan sebagai serbuk padat yang tak reaktif (tidak terjadi reaksi pada aplikasinya) dan hanya dengan tekanan dan panas yang relatif kecil sudah dapat diaplikasikan. Tidak seperti thermosets, thermoplastics biasanya bisa dipanaskan kembali dan memperbaiki diri ke dalam bentuk lain, jika diinginkan maka bahan jenis ini masih bisa diproses lagi (berbeda dengan jenis thermosets yang hanya sekali proses dan tidak dapat *direcycles* kembali).

2.2.2. Polimer Matriks Komposit Graphite Bipolar Plate.

Komposit matrik Polimer yang menggunakan bahan matriks polimer jenis resin phenolic dan reinforced carbon graphite dengan proses powder metalurgi ini merupakan *prototype Graphite Bipolar Plate* sebagai membrane pada *fuel cell*. Dengan membuat material komposit dari matriks polimer maka akan memiliki batas temperatur operasi yang lebih tinggi dari logam dasarnya serta memiliki kestabilan dimensi yang baik⁽⁹⁾. Mekanisme proses pembuatan komponen produk Polimer matriks komposit dapat dilakukan dengan berbagai cara sesuai dengan spesifikasi material dan aplikasi produk yang dihasilkan. Untuk perumusan resin/damar dapat dilakukan dengan mencampur epoxy ataupun phenolic atau menggunakan selain resin/damar dengan bahan lain untuk mencapai parameter kinerja yang diinginkan. Penggunaan bahan digunakan berdasarkan kecepatan proses, properties yang disesuaikan dengan spesifikasinya, reaktifitas partikel dan juga zat warna pada produk dan lain-lain.

Bahan yang dipakai pada komposit matriks polimer adalah jenis *thermosetting* seperti *epoxie*, *polyester* maupun resin yang dapat membatasi penggunaan untuk memproduksi struktur pada komposit, karena kemampuan jenis material tersebut dengan mudah terbentuk ke dalam bentuk kompleks. Bahan seperti kaca, aramid dan boron mempunyai tetemperatur leleh yang tinggi dan dapat diregangkan dengan penekanan sehingga kekuatan dapat dengan mudah terbentuk⁽¹³⁾ kalau cacat permukaan yang acak yang dititikberatkan akan menyebabkan masing-masing bahan untuk saling memecahkan dan gagal jauh di bawah 'puncak masalah' teoretisnya. Untuk mengatasi masalah ini, bahan dihasilkan di serat bentuk, walaupun jumlah cacat acak akan terjadi, mereka akan dibatasi ke segelintir serat dengan sisanya yang menunjukkan kekuatan teoretis bahan. Oleh karena itu berkas serat akan memantulkan lebih akurat kinerja terbaik bahan. Serat dapat diregangkan sepanjang panjang serat jika sistem resin digabungkan dengan memperkuat serat seperti kaca, karbon dan aramid, maka propereties dari produk composite tersebut dapat dinaikkan. Matriks resin dapat mentransfer beban yang dipergunakan pada gabungan di antara masing-masing serat dan juga melindungi serat dari kerusakan disebabkan oleh beban dinamis, kekuatan tinggi dan *stiffnesses*, pada bentuk yang kompleks yang membentuk, perlawanan terhadap lingkungan tinggi dan dengan densitas yang rendah maka membuat sifat mekanis dari komposit tersebut dapat dinaikkan seiring dengan perlakuannya. Karena gabungan dari matriks polimer resin dengan memperkuat serat maka kombinasi tersebut akan menghasilkan *properties* dari bahan matriks serta penguatnya dapat digunakan untuk aplikasi komponen

produk. Maka dari itu untuk aplikasinya bahan-bahan *composite polymer* digunakan terbatas pada aplikasi rentang temperatur operasional tertentu dan gaya-gaya tertentu yang tidak terlalu tinggi.



Gambar 2.4. Mechanical Properties PMC⁽²⁰⁾.

Kekuatan Komposit Matriks Polimer ditentukan oleh:

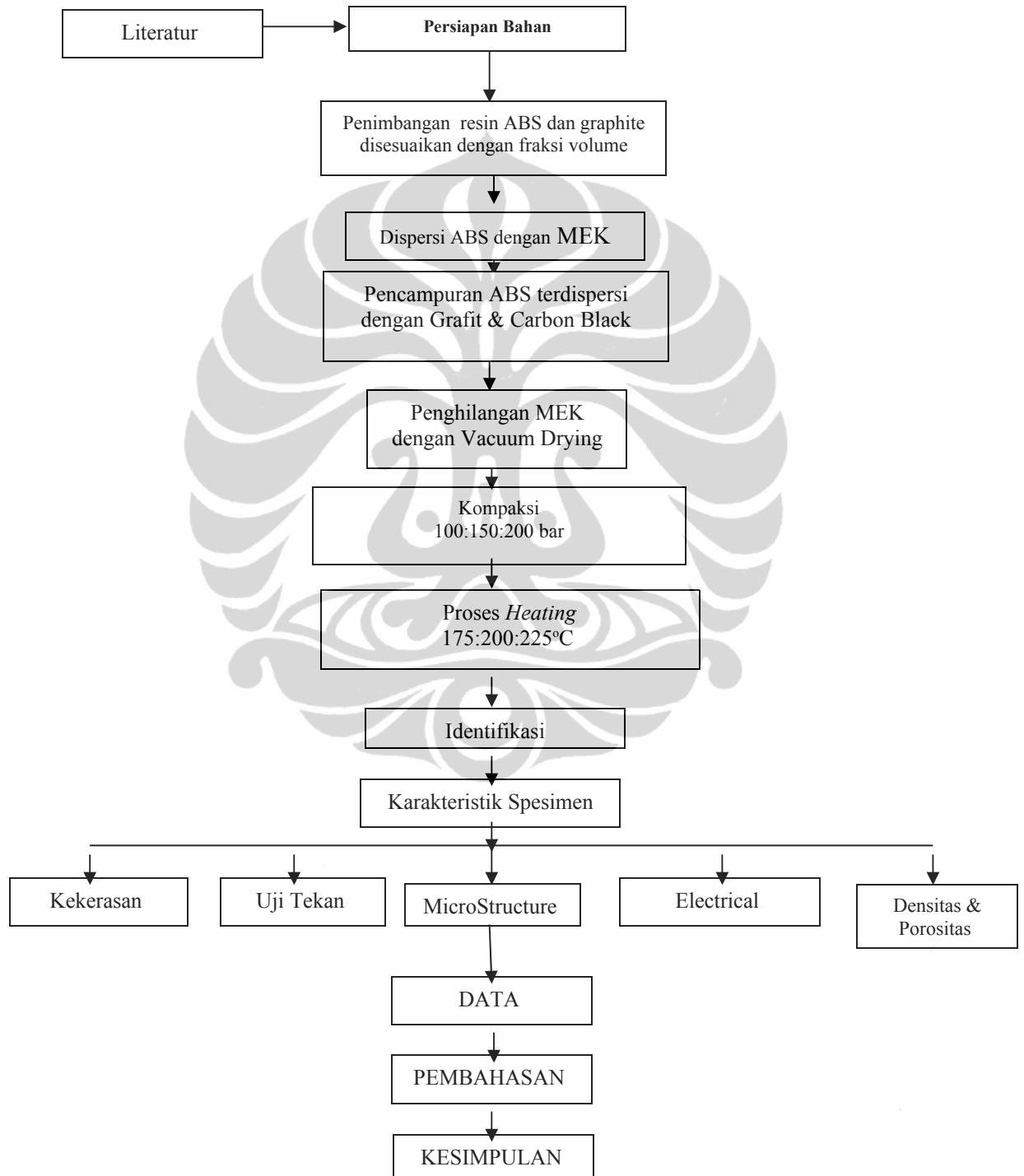
- i) properties serat
- ii) properties resin
- iii) rasio serat pada resin composites (Fibre Volume Fraction)
- iv) geometri dan orientasi serat pada composite

Rasio serat pada resin terdapat pada sebagian besar dari metode proses pembuatannya sehingga dapat menggabungkan resin dengan serat, seperti yang dijelaskan pada gambar diatas. Tetapi sebagian besar juga dipengaruhi juga oleh macam-macam jenis resin yang digunakan dan bentuk partikel yang digunakan karena properties dari serat lebih tinggi daripada yang *properties* resin, dan yang juga berpengaruh adalah *fraksi volume* yang digunakan sehingga dalam prakteknya ada batas-batas penggunaan dari serat yang sepenuhnya dilapisi oleh resin untuk menjadi efektif, dan juga bentuk dari partikelnya, adapun bentuk partikel yang ideal adalah bentuk *nodul*/bulat pada proses pembuatannya menggabungkan serat dengan peranan penting dari resin dengan mengubah-ubah jumlah dari partikel serbuk yang biasanya dicampur dengan menggunakan proses *mixer* yang seragam, sedangkan batas untuk penggunaan *volume fraksi* $\pm 30-40\%$. Dengan proses tersebut maka dapat dibuat produk komposit yang ideal baik dari segi *properties* maupun penggunaannya.⁽⁸⁾

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. DIAGRAM ALIR PENELITIAN :



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Dari gambar 3.1 di atas terkait dengan diagram alir penelitian dapat dijelaskan bahwa kegiatan ini diawali dengan studi literatur untuk mendapatkan informasi mengenai teknologi sel bahan bakar utamanya informasi mengenai pelat bipolar. Setelah itu dilanjutkan dengan mempersiapkan bahan – bahan yang dibutuhkan untuk membuat material pelat bipolar. Dasar dari pembuatan pelat bipolar ini dengan perhitungan fraksi volume yang dikonversikan ke massa untuk pelaksanaannya. Hal ini untuk menghindari dari kesalahan pengukuran disebabkan sifat dari masing-masing bahan adalah *bulk*. Sistem pencampuran untuk masing-masing bahan, diawali dengan pendispersian ABS ke dalam larutan Metyl Etyl Keton, setelah sempurna ABS terdispersi kedalam larutan dilanjutkan blending dengan karbon grafit dan karbon hitam. *Vacuum drying* dilakukan untuk menghilangkan MEK yang terikat di dalam campuran. Pembuatan specimen dilakukan dengan peralatan *compression molding* yang bisa diatur baik besaran kompaksi maupun temperatur *heating*. Identifikasi dan karakterisasi dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik dan elektrikalnya. Setelah data didapatkan dilakukan pembahasan hasil-hasil karakterisasi untuk mendapatkan hasil berupa kesimpulan dari penelitian pelat bipolar.

3.2. PROSEDUR PENELITIAN

3.2.1. Proses Penimbangan Serbuk

Penimbangan serbuk disesuaikan dengan ukuran dari masing-masing fraksi volume yang ditentukan, adapun fraksi volume yang diambil adalah sebagai berikut :

1. 25 : 75 % (Resin ABS : Carbon Grafit)
25% : ResinABS ; 52,5%:Grafit ; 22,5% : Karbon Hitam
2. 40 : 60 % (Resin ABS : Carbon Grafit)
40% : Resin ABS ; 42% : Grafit ; 18% : Karbon Hitam
3. 50 : 50 % (Resin ABS : Carbon Grafit)
50% : Resin ABS ; 35% : Grafit ; 15% : Karbon Hitam

Dasar dari pemilihan fraksi volume diatas adalah pada komposisi 25 : 75 % masih memungkinkan untuk dilakukan pemrosesan pembuatan material komposit meskipun dengan komposisi fraksi volume dari matrik yang cukup minimum. Sedangkan pada perbandingan 50:50 % merupakan batas pemrosesan pembuatan material komposit karena dengan pengompaksian 200 Bar dan temperature sintering 225°C sudah terjadi *flash* pada cetakan *compression molding*.

3.2.2. Proses Pendispersian ABS dan Pencampuran Komposit

Sebelum dilakukan pencampuran antara material matrik (ABS) dan material penguat (carbon grafit) maka proses pendispersian ABS kedalam larutan MEK dilakukan dengan tujuan agar material ABS diharapkan bisa berperan sebagai matrik secara optimal. Perlakuan pendispersian ini dilakukan pada suatu bejana yang dilengkapi dengan peralatan Ultrasonic. Setelah ABS secara sempurna larut dalam MEK , perlakuan selanjutnya adalah *blending* dengan material grafit dan karbon hitam. Blending ini dilakukan sama dengan saat pendispersian ABS yakni dengan bantuan peralatan ultrasonic.

3.2.3. Persiapan *Drying* dan *Grinding*

Setelah proses *blending* selesai dilanjutkan dengan *drying* untuk menghilangkan cairan MEK yang masih terikat pada campuran. Proses *drying* ini diikuti dengan penvacuuman guna mencegah terjadinya perubahan sifat material selam proses *drying*. Setelah proses *drying* selesai dilanjutkan dengan proses *grinding* untuk mendapatkan ukuran material yang lebih kecil sehingga memudahkan dalam perlakuan pencetakan.

3.2.4. Persiapan Cetakan

Tahapan berikutnya adalah dilakukannya persiapan cetakan untuk serbuk yang akan dilakukan proses kompaksi, adapun beberapa perlakuan yang dilakukan pada persiapan cetakan adalah :

1. Pembersihan cetakan dengan gas dan kompresor pada cetakan sampel, hal ini dilakukan agar serbuk yang akan dikompaksi tidak terkontaminasi dengan unsur serbuk dari sampel lain yang tersisa
2. Pelapisan rongga cetakan dengan bahan pelumas jenis *silicon oil* agar proses kompaksi (penekanan) dapat dilakukan dengan mudah dan tidak terjadi hambatan serta pada saat pengambilan sample tidak ada yang lengket pada cetakan.

3.2.4. Proses *Compression Molding*

Proses *Compression Molding* dilakukan secara bertahap disesuaikan dengan besarnya tekanan dan temperatur sintering yang diberikan . Pada kompaksi ini dilakukan pada 100:150 dan 200 bar , untuk temperatur sintering pada 175°C, 200°C dan 225°C, yang mana dilakukan secara *simultan* dan disesuaikan dengan proses naik turunnya alat *Compression molding*.

3.3. PROSES PEMBUATAN KOMPOSIT BIPOLAR PLATE

3.3.1. Bahan-Bahan KBP Yang Digunakan

Dalam penelitian sel bahan bakar ini telah ditetapkan bahan yang digunakan adalah :

- Polimer Acetilen Butadiena Styrene ABS dalam bentuk butiran yang berfungsi sebagai matrik dan merupakan produksi PT Styrimdo Anyer Merak.
- Serbuk Grafit berukuran 180 *mesh* yang berfungsi sebagai penguat (*reinforcement*) dan merupakan produksi PT.ABC Tbk.

- Karbon Hitam (*Carbon Black*) yang memiliki ukuran 180 *mesh* dalam penelitian ini berfungsi untuk meningkatkan sifat konduktivitas elektrik serta mekaniknya, dimana karbon hitam ini merupakan produksi PT.ABC Tbk.

Bahan-bahan KBP yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.1.

3.3.2 Parameter Proses

Beberapa parameter proses yang diterapkan dalam penelitian ini adalah meliputi :

1. Proses pembentukan material uji dalam penelitian ini adalah dengan proses pencampuran (*solution blending*) melalui pelarutan matrik ABS dengan dispersan Metil Etil Keton (MEK) dengan bantuan peralatan Ultrasonic
2. Proses pengkompaksian pada penelitian ini dilakukan pada tekanan yakni 100, 150 dan 200 bar. Diatas tekanan 200 bar berefek specimen uji tidak bisa terbentuk.
3. Proses Temperatur Sintering dilakukan pada temperatur dimana material ABS masih memungkinkan untuk dibentuk menjadi spesimen tanpa dikhawatirkan terjadi degradasi, yaitu pada temperatur range 175, 200 dan 225 °C.
4. Fraksi Volume sebagai perbandingan antara matrik ABS dengan bahan penguat mencakup grafit dan karbon hitam, dilakukan pada komposisi : 25:75%, 40:60 % dan 50:50 %. Pada komposisi 25 : 75 % masih dimungkinkan untuk dibentuk spesimen, sedangkan untuk komposisi di atas perbandingan fraksi volume 50 : 50 % berefek material ABS banyak yang *flash*.

Waktu yang dibutuhkan untuk operasional peralatan *Compression Molding* sebagai alat untuk pembuatan specimen adalah sekitar 1 jam dengan pendinginan kontinyu

3.3.3. Persiapan Bahan Penelitian

Pada preparasi sampel dilakukan sebagai berikut :

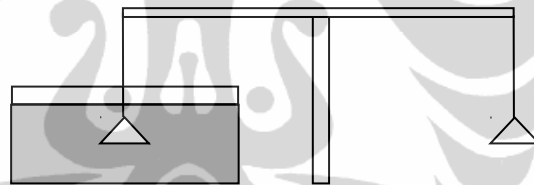
- a. Persiapan masing – masing bahan dilakukan penimbangan sesuai dengan fraksi volume yakni pada perbandingan 25 : 75 %, 40 : 60 % dan 50 : 50 %..
- b. Penimbangan dengan basis dari perhitungan fraksi volume yang dikonversikan ke berat sehingga lebih menjamin keakuratan dalam penelitian ini jika dibandingkan dengan pengukuran menggunakan basis fraksi volume disebabkan sifat dari serbuk grafit maupun karbon hitam yang bulk.
- c. Untuk memudahkan blending antara resin ABS, grafit dan karbon hitam, pertama kali resin ABS dilakukan pendispersian dengan menggunakan cairan MEK dengan menggunakan beaker glass sebagai wadahnya.
- d. Pendispersian dilakukan didalam peralatan Ultrasonic yang dioperasikan pada temperature 50^o C selama 2 jam.
- e. Setelah resin ABS terdispersi secara sempurna dalam cairan MEK, blending dengan grafit dan karbon hitam dimasukkan secara bersamaan kedalam beaker glass . Untuk selanjutnya blending ke tiga material tersebut dilakukan didalam Batch peralatan Ultrasonic dan dioperasikan pada temperature 50^o C selama 2 jam.
- f. Hasil dari blending ini berupa material Komposit yang selanjutnya dilakukan proses peng-ovenan dengan menggunakan vacuum drying untuk menghilangkan cairan MEK yang masih terikut dalam campuran komposit dan menjamin sifat dari material komposit tidak mengalami banyak perubahan.
- g. Sebelum dilakukan proses pengkompaksian dan sintering, permukaan kedua cetakan dilapisi dengan silicon oil untuk membantu pengambilan hasil pencetakan.
- h. Proses Kompaksi divariasikan pada tekanan 100, 150 dan 200 bar diukur berdasarkan gaya yang dibutuhkan untuk menyatukan serbuk bahan yang dilakukan secara bertahap dan disesuaikan dengan waktu penahanan kompaksi .

- i. Proses *heating* pada temperatur 175:200:225 °C dilakukan secara *simultan* (bersamaan) dengan tahapan kompaksi.
- j. Pemrograman pada peralatan *Compression Molding* disetting berdasarkan tekanan dan temperatur yang dibutuhkan.

3.4. KARAKTERISASI KOMPOSIT BIPOLAR PLATE

3.4.1. Pengujian Densitas dan Porositas

Pada dasarnya uji densitas dan porositas dilakukan dengan menggunakan prinsip Archimedes. Densitas merupakan pengukuran massa suatu benda per unit volume dan satuan yang biasa digunakan adalah gram/cm³ atau lb/inch³. Untuk bentuk geometri material seperti silinder, kubus atau balok dapat dihitung dengan cara membagi berat kering dengan volume.



Gambar 3.2 Jembatan Timbang AWG 22 ⁽²³⁾

$$D_B = \frac{m_D}{V} \quad 3.1$$

dimana

D_B = Densitas (gram/cm³)

m_D = Massa kering (gram)

V = Volume (cm³)

Untuk bentuk geometri yang kompleks pengukuran densitas dan porositas dihitung dengan prinsip Archimedes⁽²³⁾. Prinsip Archimedes yaitu membandingkan perbedaan berat di udara dengan berat di dalam air. Dengan menggunakan prinsip ini dapat diukur secara langsung densitas

dan porositas. Hasil yang didapat dalam pengujian ini adalah : massa kering (m_D), massa basah di udara (m_w), dan massa basah di air (m_s).

$$V = (m_w - m_s) / \rho_{H_2O} \quad 3.2$$

$$DB = m_D / V = m_D / (m_w - m_s) \quad 3.3$$

Untuk nilai porositas :

$$P = (m_w - m_D) / (m_w - m_s) \times 100\% \quad 3.4$$

Dengan

D_B = densitas (gram/cm^3)

P = porositas (%)

V = Volume (cm^3)

m_D = massa kering (gram)

m_w = massa basah di udara (gram) $\rho_{H_2O} = 1 \text{ gram}/\text{cm}^3$

m_s = massa basah di air (gram)



Gambar 3.3. Alat uji timbangan untuk uji densitas dan porositas
(foto koleksi sendiri)

3.4.2. Pengujian Kekerasan Rockwell α

Kekerasan Rockwell α didapat dengan alat pengujian kekerasan Ball Indentation yang dikonversikan ke Rockwell α . Bahan diuji dengan

indentor bola baja. Indentor dikenakan pada bahan uji di bawah beban identasi untuk kondisi awal pembebanan. Beban utama diberikan untuk menghasilkan penetrasi. Waktu keseimbangan sekitar 30 detik, dan dibaca pada skala yang sudah ditetapkan (nilai valid untu pembacaan 0,1 – 0,35 mm), beban utama dihilangkan. Pertambahan beban permanen diakibatkan oleh aplikasi dan pemindahan beban utama tambahan yang dipergunakan untuk memperhitungkan jumlah kekerasan Ball Indentation⁽²⁰⁾.



Gambar 3.4. Alat uji Ball Indentation untuk uji Kekerasan
(foto koleksi sendiri)

3.4.3. Pengujian kuat Tekan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan bahan terhadap tekanan yang terjadi selama proses deformasi. Prosedur standar pengujian mengacu pada ASTM D 695 dengan menggunakan alat uji

UTM mesin Simadzu type AGS – 10 KN dengan kecepatan 1,3 mm/mnt, skala beban 10.000 N dilakukan mencapai patahan/retak pada sampel waktu identasi 2 – 5 menit.

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengetahui ketahanan deformasi *Composit Bipolar Plate* terhadap beban tekan sebelum mengalami pecah. Penekanan sampel dilakukan dan dihentikan hingga kapasitas beban turun karena kapasitas mesin yang terbatas dengan maksimum beban 10.000 N.



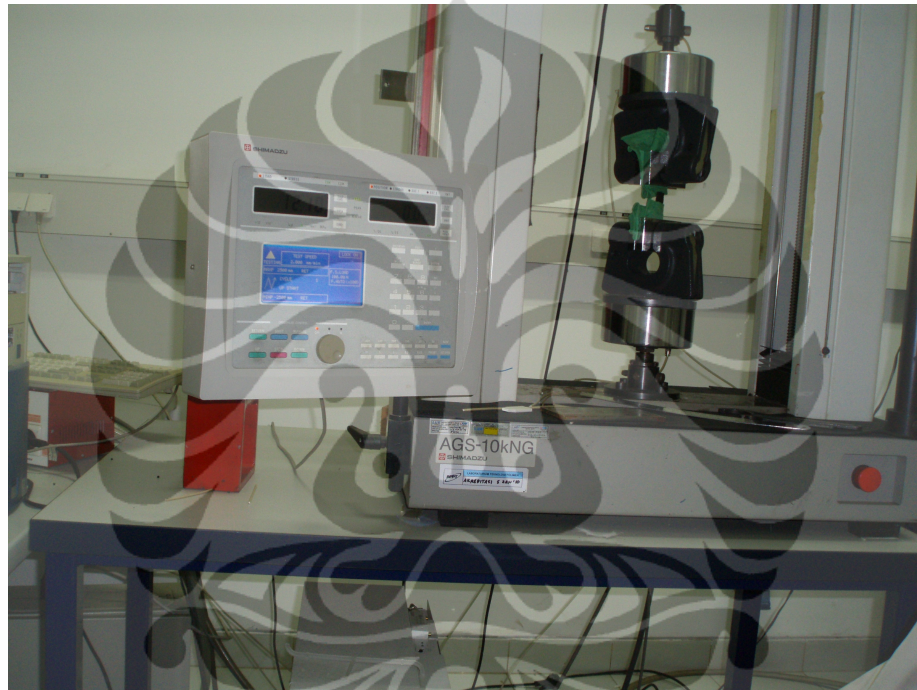
Gambar 3.5 Alat uji kuat tekan UTM (Universal Testing Machine)
(foto koleksi sendiri)

3.4.4. Pengujian kuat Tarik

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik material kuat tarik (*Tensile Strength*). Pengujian kuat tarik ini mengacu pada ASTM D 3039 . Ukuran spesimen memiliki ketebalan maksimal 2 mm dengan preparasi menggunakan alat *Compression Molding*. Sebelum

pengujian spesimen dikondisikan pada temperatur 23°C dan kelembaban 50 % selama 24 jam.

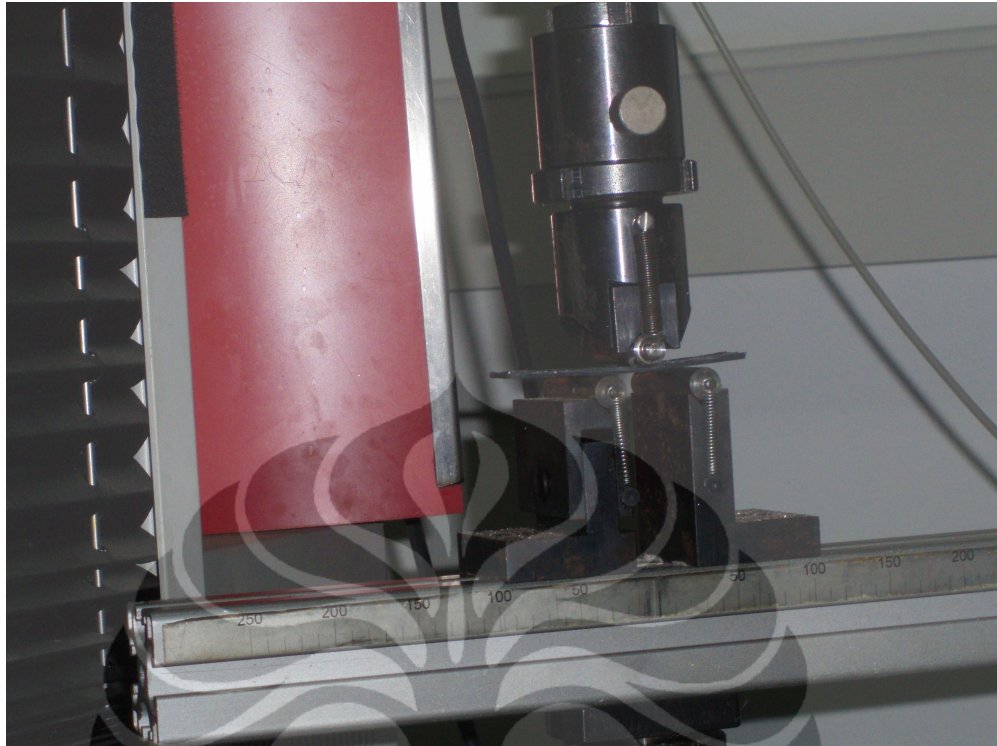
Pengujian tarik dilakukan pada kecepatan 2 mm/menit, nilai kuat tarik tercatat dalam sistem komputer . Peralatan uji yang digunakan adalah UTM 10 KN sama dengan uji kuat tekan.



Gambar 3.6 Alat uji kuat tarik UTM (*Universal Testing Machine*)
(foto koleksi sendiri)

3.4.5. Pengujian kuat Lentur (*Flexural Strength*)

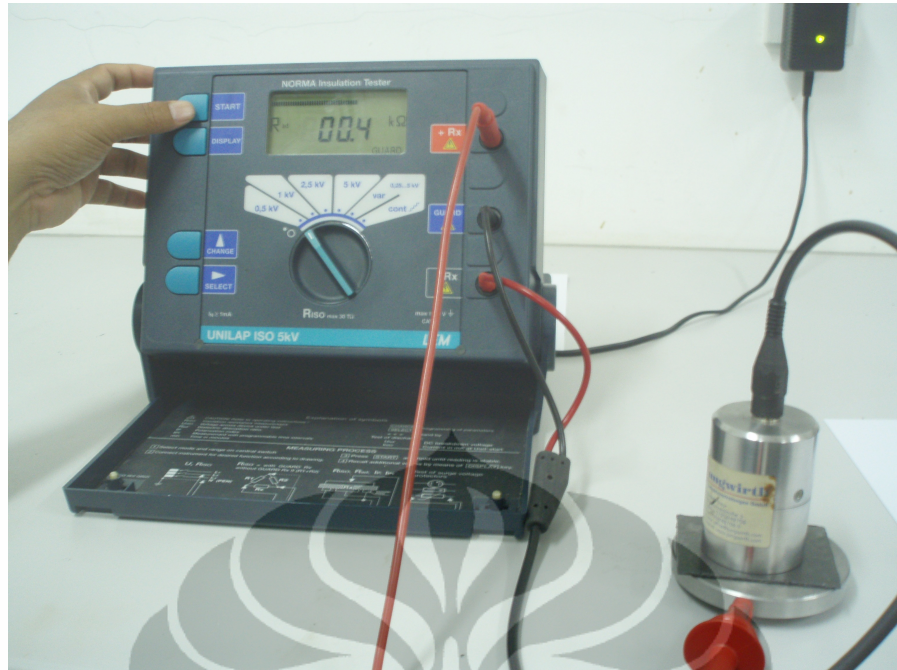
Pengujian kuat lentur merupakan salah satu pengujian mekanik yang sangat diperlukan terkait dengan material Composit Bipolar Plate. Pengujian dilakukan dengan mengacu pada standar ASTM D 790. Ukuran spesimen dengan ketebalan maksimum 2 mm dan nilai kuat lentur tercatat dalam sistem komputer yang dilengkapi grafik. Peralatan uji yang digunakan adalah UTM 10 KN sama dengan uji kuat tekan dan tarik.



Gambar 3.7 Alat uji kuat Lentur UTM (*Universal Testing Machine*)
(foto koleksi sendiri)

3.4.6. Pengujian Konduktifitas Listrik

Pengujian ini dilakukan dengan cara mengukur nilai hambatan dari sampel/material *Composite Bipolar Plate* sehingga dengan mengetahui hambatan dari masing-masing material maka dari pengukuran tersebut dapat diketahui nilai konduktifitas listriknya. Peralatan uji yang digunakan adalah Norma Isulation tester Merk UNILAP ISO5KV CEM



Gambar 3.8 Alat uji Konduktivitas Listrik

(foto koleksi sendiri)

3.4.7. Pengamatan SEM

Alat uji yang digunakan adalah merk Philips Type XL-30.



Gambar 3.9 Alat uji SEM

(foto koleksi sendiri)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 PENGARUH KOMPAKSI DAN *HEATING* TERHADAP DENSITAS DAN POROSITAS

Densitas Komposit Bipolar Plate meningkat seiring dengan meningkatnya kompaksi serta temperatur sintering . Kenaikan densitas ini diikuti dengan penurunan porositas. Hasil pengujian densitas dan porositas ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil Pengujian Densitas dan Porositas

P Kompaksi (Bar)	T <i>Heating</i> (°C)	Komposisi Fraksi volume (filler :matrik) (%)	Densitas (gr/cm ³)	Porositas (%)
100	175	75 : 25	1,547	4,640
	200		1,631	3,831
	225		1,729	2,812
150	175	75 : 25	1,635	3,755
	200		1,659	2,859
	225		1,728	1,828
200	175	75 : 25	1,678	1,968
	200		1,716	1,885
	225		1,742	1,179
100	175	60 : 40	1,551	0,999
	200		1,552	0,890
	225		1,553	0,802
150	175	60 : 40	1,568	0,637
	200		1,675	0,600
	225		1,586	0,558
200	175	60 : 40	1,571	0,790
	200		1,598	0,698
	225		1,600	0,503
100	175	50 : 50	1,473	0,463
	200		1,474	0,458
	225		1,476	0,447
150	175	50 : 50	1,476	0,389
	200		1,477	0,378
	225		1,487	0,366
200	175	50 : 50	1,479	0,420

	200		1,480	0,390
	225		1,494	0,204

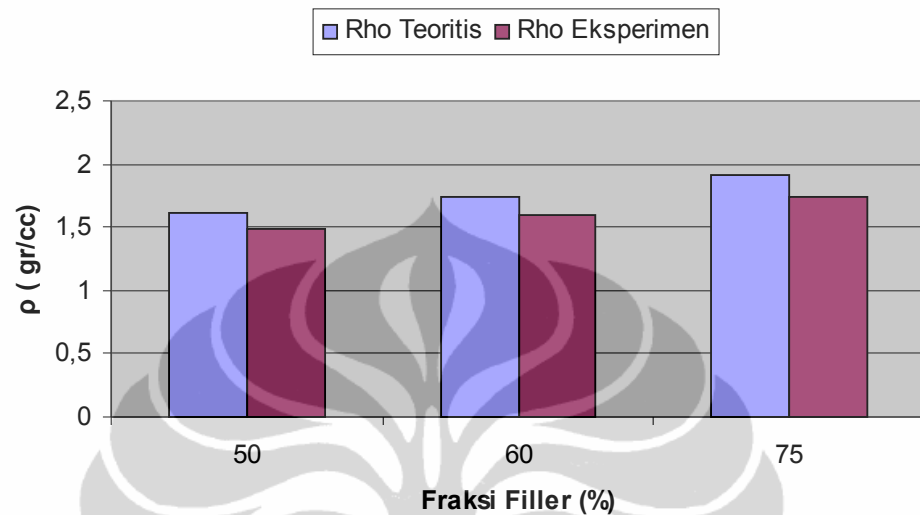
Tabel 4.1 diatas merangkum hasil evaluasi nilai densitas dan porositas 3 (tiga) jenis komposit pelat bipolar yang dipersiapkan melalui *hot compression* pada 3 (tiga) temperatur yang berbeda untuk masing-masing komposisi. Disamping temperatur dan komposisi , tekanan kompaksi juga divariasikan dari 100 s/d 200 bar (N/m^2). Hal ini bertujuan untuk mengetahui parameter kompaksi yang optimal agar dihasilkan komposit pelat bipolar yang bebas pori.

Menilik hasil evaluasi densitas dan porositas dari tabel 4.1 diatas tersebut dapat dipastikan bahwa komposit dengan komposisi 75 : 25 masih menghasilkan pori lebih dari 1 %, bahkan dapat mencapai fraksi nilai hampir 5 %, pada tekanan kompaksi yang relatif rendah yaitu 100 bar. Meskipun demikian nilai fraksi pori ini dapat ditekan mendekati nilai 1 % pada tekanan kompaksi yang tinggi (200 bar) dan temperatur 225°C dan menghasilkan nilai densitas yang tertinggi yaitu 1,742 gr/cc. Hasil nilai densitas ini hanya mencapai 91,3 % dari nilai teoritis yaitu $\rho_c = 1,908 \text{ gr/cm}^3$.

Komposit dengan fraksi pori $< 1 \%$ dapat diperoleh pada komposisi dengan fraksi matrik yang relatif tinggi yaitu pada komposisi 60 : 40 % dan 50 : 50 %. Fraksi pori terendah yang dapat diperoleh dari komposisi 60 : 40 % adalah 0,503 %, yang diperoleh melalui tekanan kompaksi 200 bar dan temperatur 225 %. Nilai densitas untuk komposisi ini mencapai 92,2 % dari nilai teoritisnya yakni 1,735 gr/cm^3 (lihat Lampiran). Hasil evaluasi tabel 4.1 juga memperlihatkan bahwa komposit dengan fraksi terendah 0,204 % dapat dicapai pada komposisi 50 : 50 % dengan parameter konsolidasi tekanan 200 bar pada temperatur 225°C. Dengan demikian hasil evaluasi densitas dan porositas sebagaimana terangkum dalam tabel 4.1 dapat disimpulkan bahwa tekanan kompaksi 200 bar dan temperatur kompaksi 225°C adalah parameter konsolidasi yang optimal menghasilkan fraksi pori yang minimal. Fraksi pori umumnya dapat diminimalkan dengan meningkatkan fraksi matriknya.

Gambar 4.1 dibawah memperlihatkan nilai densitas komposit yang dipersiapkan pada tekanan kompaksi 200 bar dan temperatur 225°C pada kenaikan

fraksi matrik. Nilai densitas eksperimen dibandingkan dengan nilai densitas teoritikal.



Gambar 4.1 Nilai Densitas komposit eksperimen pada tekanan 200 Bar dan Temperatur 225°C

Hasil pada gambar 4.1 tersebut sekali lagi memastikan bahwa meningkatnya fraksi matrik pada komposit dapat mempersempit perbedaan untuk nilai densitas teoritis dan eksperimen. Fraksi matrik yang relatif tinggi serta temperatur kompresi yang cukup tinggi, efektif menutup pori yang terjadi didalam material (*closed pori*) serta bebas dari pori terbuka yang mungkin muncul akibat retak dalam proses kompresi pada tekanan tinggi.

Komposit bebas pori merupakan produk yang ditargetkan untuk dicapai. Pori dalam material dipandang sebagai cacat volume material dan dapat berperan sebagai sumber penurunan sifat mekanik melalui penjelasan retak (*crack*). Berdasarkan teori ⁽²¹⁾, kehadiran retak didalam material bisa sangat melemahkan sifat-sifat mekanik material, misalnya saja kekuatan material berpori dapat menurun menjadi 1/10 dari kekuatan material yang sama tapi bebas retak.

Berdasarkan data eksperimen sebagaimana diuraikan diatas, hasil tahapan pembuatan pelat komposit berbasis resin termoplastik yang diperkuat dengan

grafit dan karbon hitam ini belum berhasil tercapai suatu komposit bebas pori. Fraksi pori terkecil yang telah dicapai meskipun kurang dari 1 % yaitu dicapai dari komposit dengan fraksi polimer tertinggi (komposisi 50 : 50) dapat dipandang sebagai belum optimal untuk diandalkan sebagai pelat bipolar sel. Sebagai pelat bipolar sel tentu saja diinginkan suatu komposit yang memiliki sifat mekanik terutama kekuatan/*strength* yang tinggi dari sifat konduktivitas listrik yang tinggi. Hal ini berarti komposit dengan komposisi fraksi polimer seminim mungkin dan bebas pori adalah komposit pelat bipolar sel yang sangat diharapkan. Namun dari ketiga komposisi komposit yang telah dipelajari dari komposit dengan komposisi yang dimaksud masih menghasilkan fraksi pori > 2 %. Dengan demikian degradasi kekuatan kehadiran pori > 2 % tersebut masih harus dipelajari untuk melihat lebih cermat apakah terdapat kontribusi yang signifikan dari sisi sifat konduktivitas listrik yang dihasilkannya.

Data pengujian porositas material komposit Komposit Bipolar menunjukkan bahwa nilai porositas cenderung mengalami penurunan seiring semakin meningkatnya kompaksi serta temperatur sintering . Hal ini sesuai dengan teori yang ada dimana peningkatan densitas akan disertai penurunan porositas. Porositas terendah dihasilkan dari proses kompaksi tertinggi 200 bar yaitu 0,204 % dan porositas terbesar dihasilkan dari kompaksi terendah 100 bar yaitu 4,642 % Semakin besar kompaksi yang diberikan maka akan menyebabkan terbentuknya kerapatan partikel serbuk sehingga butiran dari resin ABS yang dikompaksi akan mampu mengisi pori-pori/rongga antar partikel grafit. Dengan semakin banyak/mudah resin ABS mengisi pori-pori antar partikel grafit maka menyebabkan semakin rapatnya partikel serbuk yang dikompaksi sehingga porositasnya akan berkurang.

Porositas terjadi dari reaksi pergerakan partikel yang menembus dengan cepat ke dalam ketebalan bentuk yang berpori terhadap penetrasi dalam karbon (yang merupakan fungsi suhu), sebagai fungsi suhu maka pada daerah yang lebih tinggi suhunya akan lebih cepat terjadi porositas, dengan begitu penetrasi terhadap permukaan ditutup dan mayoritas volume bentuknya akan lebih kecil untuk mempertahankan bagian volume yang besar pada porositas. (secara teknis fenomena ini diakibatkan oleh *inhomogeneity* bahan) serta Efek ini juga

mengakibatkan densitas bahan menjadi lebih tinggi. Pada penelitian yang dilakukan oleh Zhang Jie⁽¹⁰⁾. Porositas dipengaruhi oleh ukuran dan *granularity* partikel grafit yang terdistribusi ke dalam *Graphite Bipolar Plate* sehingga terjadi penumpukan partikel grafit pada resin ABS.

4.2 PENGARUH KOMPAKSI DAN HEATING TERHADAP KEKERASAN DAN KUAT TEKAN

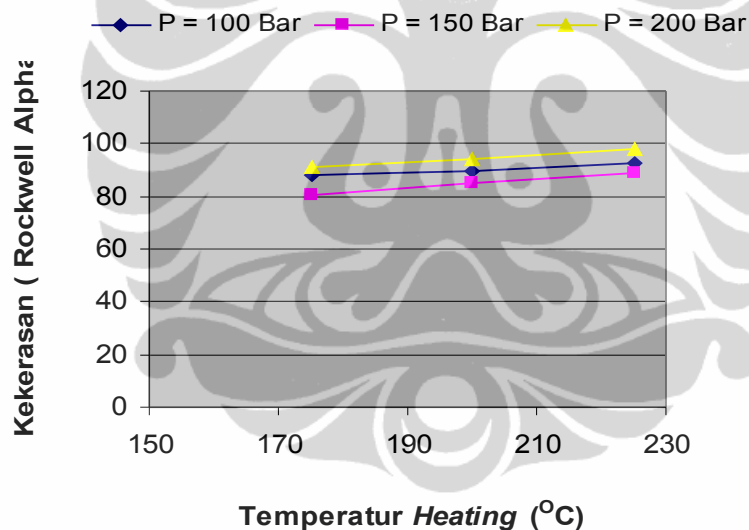
Dari hasil pengujian kekerasan dengan metode Ball Indentation yang dikonversikan ke nilai Hardness Rockwell α diperoleh peningkatan kekerasan seiring dengan meningkatnya kompaksi yang diberikan, namun pada temperatur maksimum kekerasan mengalami penurunan. Demikian juga untuk uji kuat tekan dari masing-masing sampel *Composite Bipolar Plate* menunjukkan dengan semakin meningkatnya kompaksi maka kuat tekan semakin meningkat namun kenaikan kuat tekan disertai penurunan pada rentang temperatur maksimum, hasil pengujian kekerasan dan kuat tekan ditunjukkan pada Tabel 4.2

Tabel 4.2. Hasil pengujian Kekerasan (Rockwell α) dan Kuat Tekan

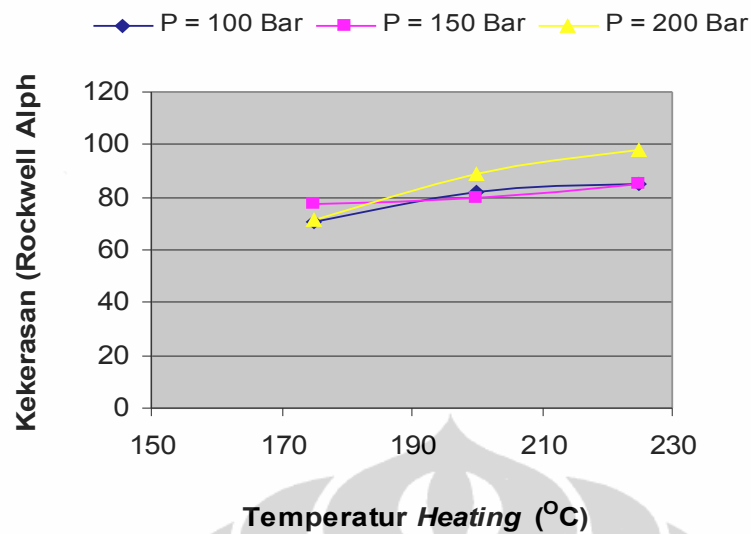
P Kompaksi (Bar)	T <i>Heating</i> ($^{\circ}$ C)	Komposisi Fraksi volume (%)	Kekerasan (Rockwell α)	Kuat Tekan (MPa)
100	175	75 : 25	88	6,86
	200		90	8,68
	225		93	6,60
150	175	75 : 25	80,6	7,90
	200		85,2	13,10
	225		89	12,34
200	175	75 : 25	91,5	8,10
	200		93,8	12,72
	225		98,1	9,69
100	175	60 : 40	70,5	7,75
	200		81,8	12,50
	225		85,0	11,89
150	175	60 : 40	71,5	8,85
	200		88,7	12,89
	225		97,6	10,67
200	175	60 : 40	77,6	12,29
	200		80,02	13,40

	225		84,94	12,58
100	175	50 : 50	90,8	15,67
	200		96,7	18,20
	225		101,8	18,19
150	175	50 : 50	91,0	16,16
	200		102,7	19,33
	225		100,5	15,78
200	175	50 : 50	100,0	21,83
	200		98,7	23,46
	225		95,78	12,02

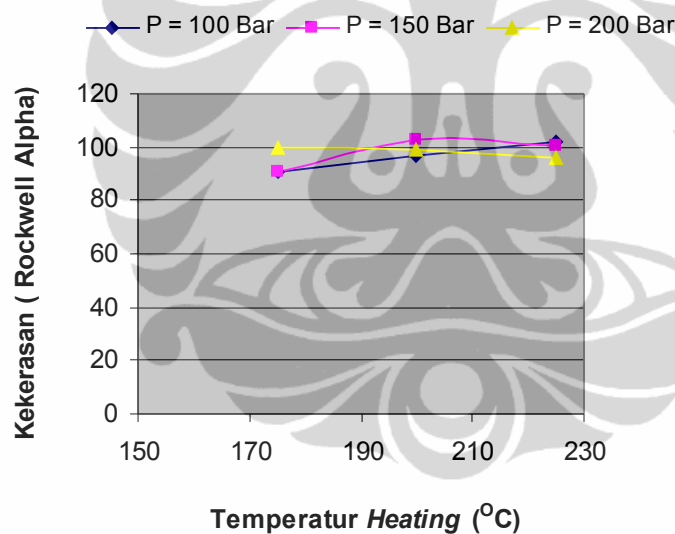
Kekerasan merupakan ketahanan material terhadap deformasi plastis akibat pembebanan, pada umumnya kekerasan merupakan fungsi dari kekuatan ikatan partikel bahan. Dari hasil uji kekerasan memperlihatkan kekerasan semakin meningkat seiring dengan semakin tingginya kompaksi.



Gambar 4.2. Pengaruh Kompaksi pada variasi *Heating* terhadap Kekerasan Komposit Bipolar Plate pada Vf:75:25 %.



Gambar 4.3. Pengaruh Kompaksi pada variasi *Heating* terhadap Kekerasan Graphite Bipolar Plate pada Vf:60:40 %.



Gambar 4.4. Pengaruh Kompaksi pada variasi *Heating* terhadap Kekerasan Graphite Bipolar Plate pada Vf:50:50 %.

Pada penelitian ini diperoleh kekerasan optimum pada umumnya terjadi saat kompaksi maksimum. Kekerasan material pada dasarnya dipengaruhi oleh kompresibilitas dan faktor lain seperti densitas serta porositas. Pada kompresibilitas yang tinggi terdapat kekerasan yang tinggi pula, hal ini dikarenakan pada partikel serbuk yang kompresibilitasnya tinggi luas bidang

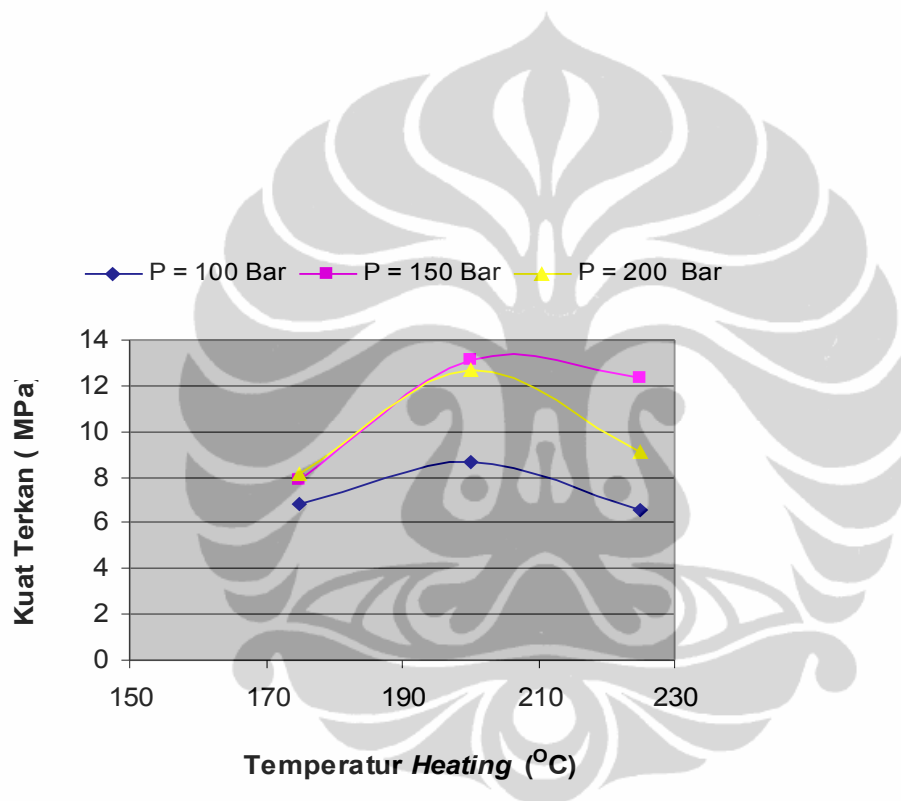
kontak permukaan serbuknya besar sehingga serbuknya halus dan ikatan partikelnya rapat/padat⁽²¹⁾. Peningkatan kekerasan disertai dengan kenaikan densitas serta porositas menjadi semakin berkurang akibat dari pengurangan volume partikel serbuk yang diikuti oleh pemadatan akibat kompaksi sehingga dengan dengan kecilnya porositas maka kekerasan menjadi naik. Terkecuali pada fraksi volume 50 : 50 justru terjadi bahwa pada kompaksi 200 bar terjadi penurunan kekerasan, hal ini kemungkinan pada saat penekanan dengan temperature 225°C material resin ABS mengalami degradasi. Pada penelitian ini diperoleh kekerasan yang optimum pada kompaksi 150 bar sebesar 102,7 Rockwell α pada variasi temperatur sintering 200°C kekerasan terendah diperoleh pada kompaksi 100 bar dengan variasi sintering 175°C yaitu 70,5 Rockwell α .

4.3 PENGARUH KOMPAKSI DAN *HEATING* TERHADAP KUAT TEKAN

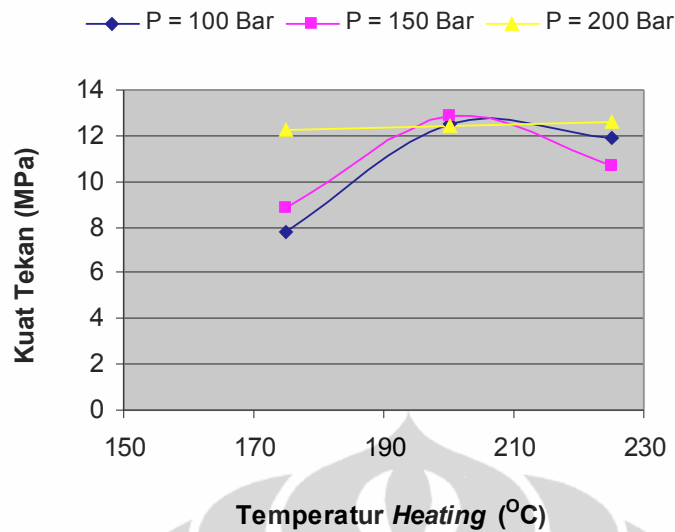
Kuat Tekan merupakan ketahanan material terhadap beban *kompresif*. Dengan pembebanan *kompresif* pada material maka menyebabkan material tersebut menjadi lebih rendah dan lebih tipis karena adanya *slippage* pada bidang geser yang arahnya berlawanan dibandingkan beban tarik⁽⁸⁾.

Berdasarkan hasil pengujian (Gambar 5.10, 5.11 dan 5.12), dapat dilihat bahwa nilai kuat tekan pada umumnya maksimum dicapai pada kompaksi 200 bar pada variasi sintering 200°C yaitu 23,46 dan mencapai nilai minimum pada kompaksi terendah 100 bar pada variasi sintering terendah pula 175°C. Kuat Tekan dipengaruhi oleh kompresibilitas dan faktor lain seperti densitas. Nilai kompresibilitas dan densitas yang tinggi dapat menaikkan kuat tekan material hal ini dikarenakan pada partikel serbuk yang kompresibilitasnya tinggi luas bidang kontak permukaan serbuknya besar sehingga serbuknya halus dan ikatan partikelnya rapat/padat dan hubungan terhadap porositas berbanding terbalik semakin kecil porositasnya maka kuat tekannya semakin besar. Namun dilihat dengan semakin naiknya temperatur sintering maka pada temperatur maksimum 225 °C nilai kuat tekan menjadi turun (12,02 MPa). Fenomena ini terjadi karena pada temperatur 225 °C adalah temperatur maksimal resin ABS diproses, sehingga kemungkinan terjadinya penurunan kuat tekan ini pada pengoperasin 225 °C telah

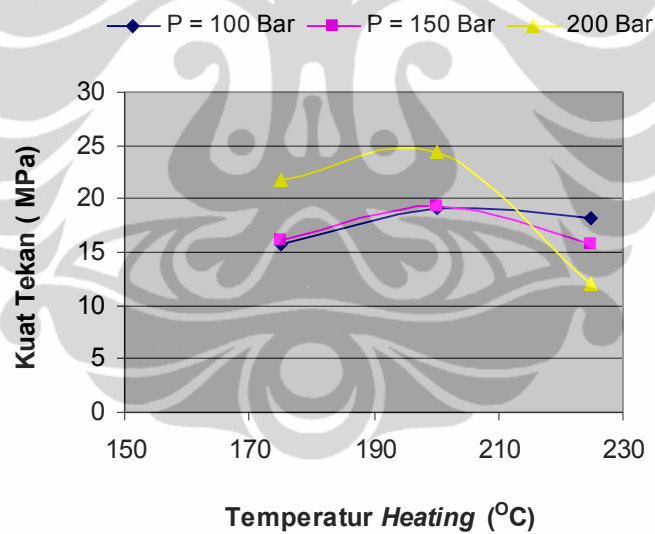
terjadi degradasi pada material resin ABS. Degradasi berefek pada putusya rantai polimer sehingga matrik resin ABS yang diharapkan bisa menyusup diantara partikel-partikel grafit justru hal ini tidak terjadi. Hal ini menjadikan ikatan partikelnya menjadi lemah sehingga fenomena tersebut dapat menurunkan kuat tekannya.



Gambar 4. 5. Pengaruh Kompaksi pada variasi *Heating* terhadap Kuat Tekan Graphite Bipolar Plate pada Vf:75:25 %.



Gambar 4.6. Pengaruh Kompaksi pada variasi *Heating* terhadap Kuat Tekan Graphite Bipolar Plate pada Vf:60:40 %.



Gambar 4.7. Pengaruh Kompaksi pada variasi *Heating* terhadap Kuat Tekan Graphite Bipolar Plate pada Vf:50:50 %.

4.4 PENGARUH KOMPAKSI DAN *HEATING* TERHADAP KUAT TARIK DAN KUAT LENTUR

Pengujian kuat tarik dari masing-masing sampel *Composite Bipolar Plate* menunjukkan dengan semakin meningkatnya kompaksi maka kuat tarik semakin meningkat namun kenaikan kuat tarik disertai penurunan pada

rentang temperatur maksimum. Untuk Pengujian kuat lentur menunjukkan dengan semakin meningkatnya kompaksi maka kuat lentur semakin meningkat namun kenaikan kuat lentur disertai penurunan pada rentang temperatur maksimum hasil pengujian kuat tarik dan kuat lentur ditunjukkan pada Tabel 4.3

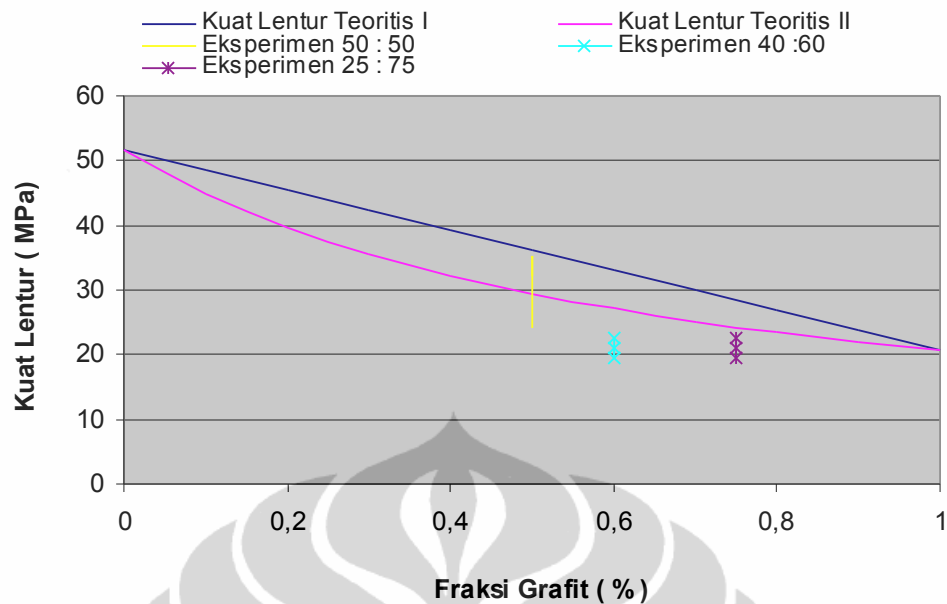
Tabel 4.3. Hasil Pengujian Kuat Tarik dan Kuat lentur

P Kompaksi (Bar)	T <i>Heating</i> (°C)	Komposisi Fraksi volume (%)	Kuat Tarik (MPa)	Kuat Lentur (MPa)
100	175	75 : 25	5,62	14,56
	200		6,68	19,0
	225		3,97	20,97
150	175	75 : 25	6,79	18,03
	200		7,10	18,2
	225		6,42	19,47
200	175	75 : 25	6,10	17,61
	200		7,69	19,83
	225		5,98	22,52
100	175	60 : 40	5,50	9,43
	200		6,75	13,83
	225		3,52	16,34
150	175	60 : 40	7,44	17,65
	200		9,89	19,95
	225		9,80	21,09
200	175	60 : 40	8,87	18,08
	200		10,20	21,91
	225		9,19	23,36
100	175	50 : 50	8,76	25,78
	200		10,20	26,57
	225		9,19	32,23
150	175	50 : 50	10,67	32,0
	200		11,20	32,7
	225		10,48	35,02
200	175	50 : 50	8,78	27,57
	200		13,86	28,7
	225		12,42	24,11

Dari Tabel 4.3 di atas memperlihatkan kuat tarik semakin meningkat seiring dengan semakin tingginya kompaksi. Dan kecenderungan dari kuat tarik

ini pada temperature sintering 225 °C dan penekanan kompaksi 100, 150 maupun 200 berkecenderungan mengalami penurunan. Hal ini justru tidak terjadi pada sifat kuat lenturnya, pada sifat kuat lenturnya berkecenderungan nilai pada tekanan tinggi dan temperature maksimal yakni 225°C nilai kuat lentur yang dicapai cenderung terjadi kenaikan. Nilai kuat lentur untuk fraksi 75 : 25 menunjukkan rata-rata kurang dari 20 MPa baik untuk tekanan 100, 150 ataupun 200 bar. Demikian juga untuk fraksi 60 : 40, nilai kuat lenturnya rata-rata kurang dari 20 MPa, terkecuali untuk tekanan 200 bar lebih dari 20 MPa. Nilai kuat lentur tertinggi dicapai pada kondisi fraksi 50 : 50 pada kondisi *Hot Compression* temperature 225°C dan tekanan 150 bar. Pada tekanan kompaksi 200 bar justru terjadi penurunan nilai . Kekuatan lentur pada dasarnya merupakan ketahanan material terhadap deformasi plastis akibat pembebanan . Sifat dari kekuatan lentur ini tidak boleh diabaikan, karena pada saat dilakukan pemasangan pada sistem sel bahan bakar material komposit pelat bipolar tidak boleh patah. Pada saat terjadi pembebanan untuk pengujian kekuatan lentur terjadi dua peristiwa yakni pada posisi permukaan atas material mengalami penekanan sedangkan pada permukaan bawah terjadi penarikan. Dari hasil uji kekuatan lentur memperlihatkan kekuatan tarik lentur meningkat seiring dengan semakin tingginya kompaksi dan sintering. Demikian juga dengan semakin tingginya fraksi volume resin ABS menunjukkan peningkatan kekuatan lentur.

Pada Gambar 4.8 memperlihatkan posisi kekuatan lentur secara teoritis dibandingkan dengan eksperimen.



Gambar 4.8 Kuat lentur teoritis dibandingkan dengan Eksperimen pada Tekanan 200 Bar dan Temperatur *Heating* 225°C.

Pada gambar diatas diperlihatkan hasil dari penelitian dengan fraksi 50 : 50 menghasilkan kekuatan lentur yang maksimal dengan kondisi operasional pada tekanan 150 bar dan temperature 225°C yakni 35,02 MPa. Perlu disampaikan bahwasanya pada kondisi tekanan 200 bar justru terjadi kekuatan lentur yang jatuh sampai 24,11 MPa, hal ini disebabkan pada kondisi tersebut material komposit sudah mengalami *flash* pada saat dilakukan persiapan pembuatan material komposit (*Process Hot Pressing*). Sedangkan pada komposisi 60 : 40 dan 75 : 25 jelas-jelas terlihat bahwasanya posisi kekuatan lentur ada di bawah *lower bond*. Ini bisa diartikan bahwa pada komposisi tersebut tidak bisa diterapkan untuk pembuatan komposit pelat bipolar karena masih jauh dari yang dipersyaratkan untuk kekuatan mekanik kuat lentur yang mensyaratkan minimal 40 MPa. Kekuatan maksimal kuat lentur yang dihasilkan dari komposisi 40 : 60 yakni sebesar 23,36 MPa.

Pada penelitian ini diperoleh kuat tarik optimum pada kompaksi maksimum yakni pada 200 bar. Kekuatan tarik material dipengaruhi oleh tingkat pengompaksian dan faktor lain seperti densitas serta porositas. Pada kompaksi yang tinggi dihasilkan kekuatan tarik yang tinggi pula, hal ini dikarenakan pada partikel serbuk yang kompresibilitasnya tinggi luas bidang kontak permukaan

serbuknya besar sehingga serbuknya halus dan ikatan partikelnya rapat/padat⁽⁸⁾. dan peningkatan kuat tarik disertai dengan kenaikan densitas serta porositas menjadi semakin berkurang akibat dari pengurangan volume partikel serbuk yang diikuti oleh pemadatan akibat kompaksi sehingga dengan dengan kecilnya porositas maka kuat tarik menjadi naik. Pada temperatur sintering maksimum (225⁰C) kuat tarik cenderung mengalami penurunan. Pada penelitian ini diperoleh kuat tarik yang optimum pada kompaksi 200 bar sebesar 13,86 MPa pada temperatur sintering 200⁰C dan kuat tarik terendah diperoleh pada kompaksi 100 bar dengan variasi sintering 225⁰C yaitu 3,97 MPa.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Ted Besmann⁽¹²⁾, serbuk yang tidak homogen dari bahan dapat menurunkan kekuatan karena resin ABS tidak dapat menyusup kedalam pori dari karbon sehingga ikatan partikelnya menjadi lemah. Disamping itu kehalusan serbuk juga mempengaruhi *mechanical properties*. Serbuk yang lebih halus cenderung dapat homogen sehingga ikatan partikel serbuk lebih rapat dan ketahanan *flexural strength* lebih besar.

4.5. PENGARUH KOMPAKSI DAN HEATING TERHADAP KONDUKTIVITAS ELEKTRIK

Konduktifitas Elektrik dari sample *Composit Bipolar Plate* menunjukkan peningkatan pada kenaikan kompaksi namun pada temperatur maksimum konduktifitas elektrik mengalami penurunan. Hasil pengujian Konduktivitas Elektrik dan Resistivitas ditampilkan pada Tabel 4.4

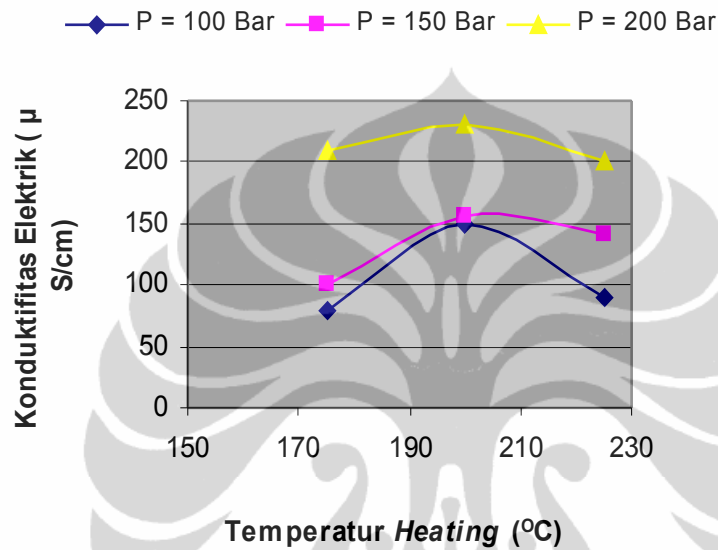
Tabel 4.4. Hasil Pengujian Konduktivitas Elektrik dan Resistivitas

P Kompaksi (Bar)	T <i>Heating</i> (⁰ C)	Komposisi Fraksi volume (%)	Konduktivitas Elektrik (μ S/cm)	Resistivitas (K Ω)
100	175	75 : 25	80	0,45
	200		150	0,37
	225		90	0,32
150	175	75 : 25	100	0,3
	200		157	0,36
	225		140	0,38
200	175	75 : 25	210	0,23

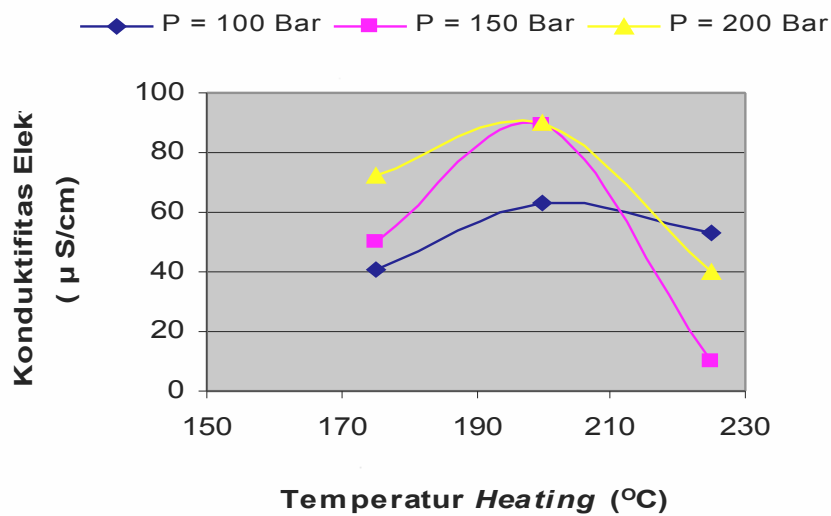
	200		230	0,34
	225		200	0,35
100	175	60 : 40	41	0,43
	200		63	0,58
	225		53	0,46
150	175	60 : 40	50	0,65
	200		89	0,75
	225		60,3	0,4
200	175	60 : 40	72	0,46
	200		90	0,57
	225		70	0,36
100	175	50 : 50	46	0,72
	200		53	0,57
	225		48	0,56
150	175	50 : 50	35	0,32
	200		67	0,58
	225		50	0,52
200	175	50 : 50	50	0,73
	200		80	0,87
	225		61	0,567

Konduktivitas Elektrik dipengaruhi oleh kerapatan ikatan partikel dan porositas yang minimum (mendekati 0 ideal) pada sampel dengan nilai porositas yang minim maka konduktivitas elektriknya bagus⁽²¹⁾. Hubungan antara Kompaksi pada variasi temperatur sintering terhadap Konduktivitas Elektrik ditunjukkan

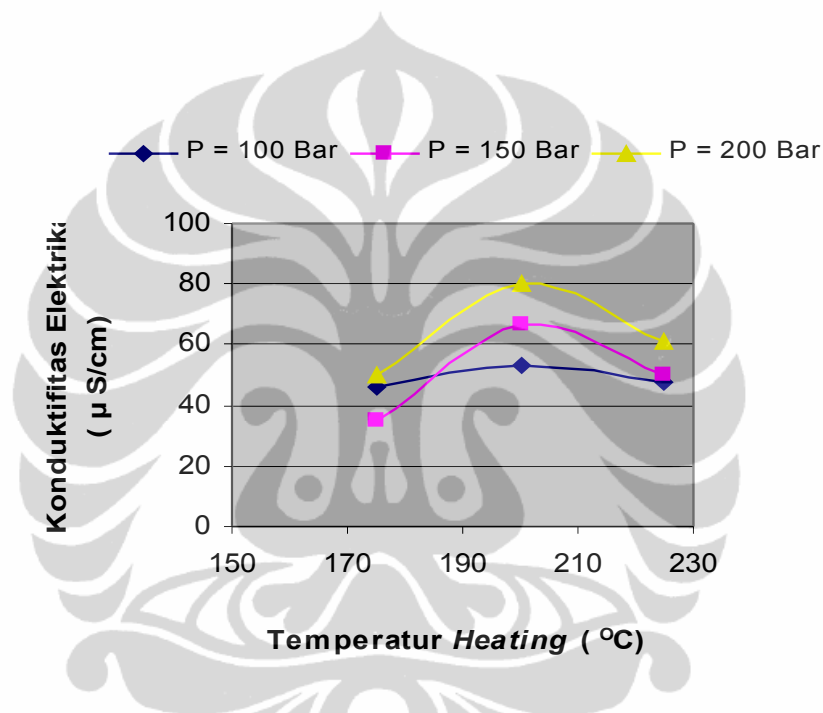
pada Gambar 4.9. dan 4.10 dan 4.11.



Gambar 4.9. Pengaruh Kompaksi pada variasi *Heating* terhadap Konduktifitas Elektrik Graphite Bipolar Plate pada Vf:75:25 %.



Gambar 4.10. Pengaruh Kompaksi pada variasi *Heating* terhadap Konduktifitas Elektrik Graphite Bipolar Plate pada Vf: 60:40 %.



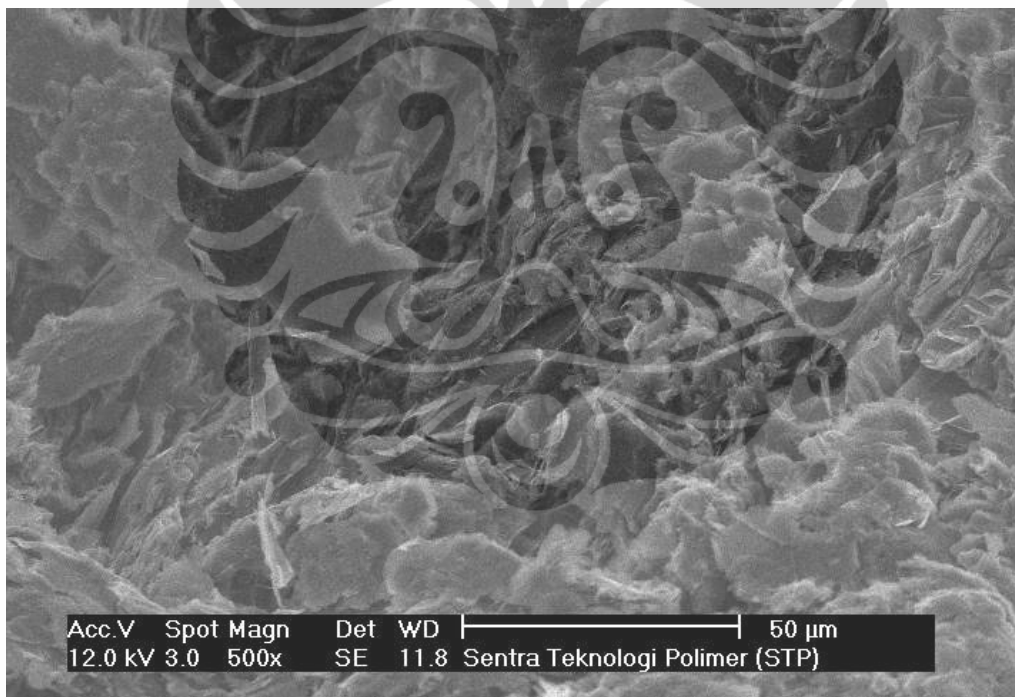
Gambar 4.11. Pengaruh Kompaksi pada variasi *Heating* terhadap Konduktifitas Elektrik Graphite Bipolar Plate pada Vf:50:50 %.

Konduktifitas Elektrik mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan kompaksi. Pada kompaksi maksimum 200 bar dihasilkan konduktifitas Elektrik yang optimal yaitu 230 $\mu\text{S/cm}$. Dengan semakin meningkatnya kompaksi pada variasi temperatur sintering serta penurunan porositas dan peningkatan densitas bahan maka konduktifitas elektrik semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan teori yang ada dimana porositas merupakan hambatan terhadap gerakan-gerakan elektron ketika mentransmisikan energi listrik sehingga dengan minimnya porositas maka gerakan electron tidak mengalami hambatan akibat porositas. Pada

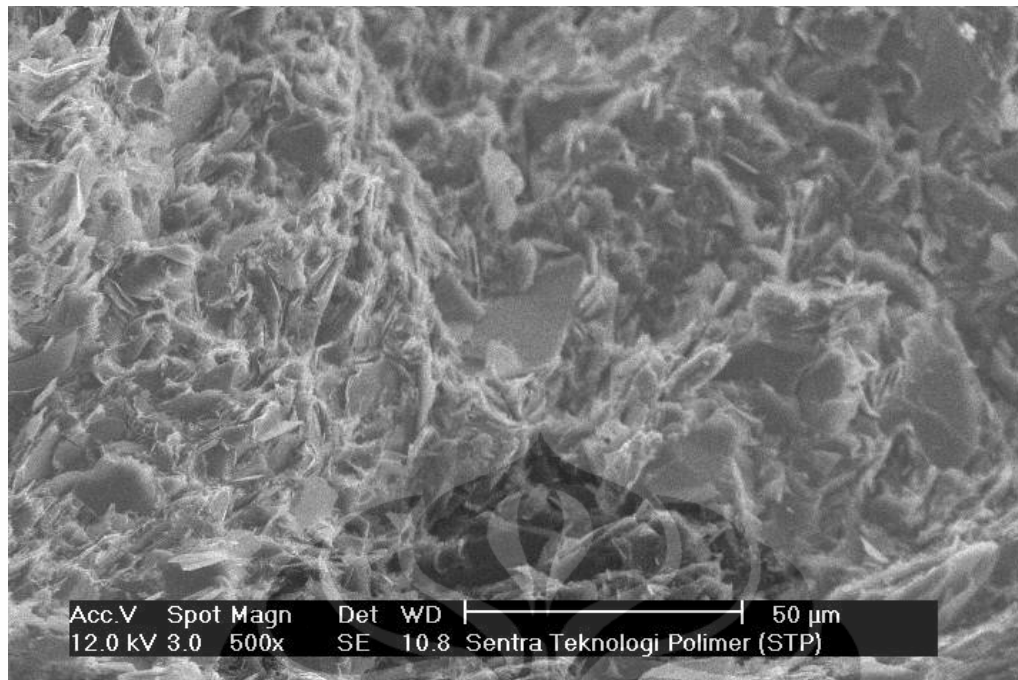
Penelitian yang dilakukan oleh Ted Besmann⁽¹²⁾ matriks polimer yang menembus pori pada carbon grafit akan terjadi penimbunan karbon, dan hal ini menggambarkan penetrasi dalam karbon sehingga volume dari porositas berkurang dan ini menghasilkan *electrical properties* yang bagus..

4.6. PENGAMATAN SEM

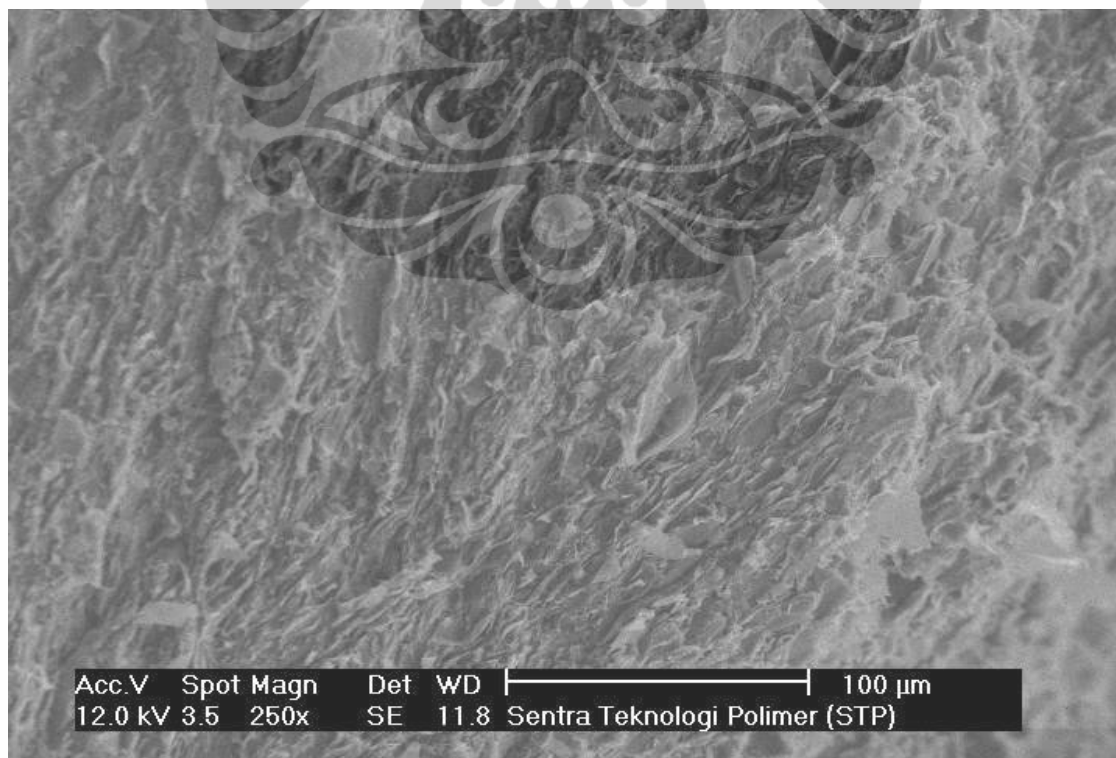
Dari hasil pengamatan SEM pada Gambar 4.12, 4.13 dan 4.14 terlihat distribusi reinforce carbon grafit yang tersebar pada daerah matriksnya (resin ABS). Pada gambar ini terlihat distribusi dari partikel grafit yang semakin terlihat lebih merata untuk perbandingan matriks resin ABS 50 : 50 %. Hal ini berefek pada kekuatan tariknya akan menjadi semakin kuat, hal ini juga diperkuat dengan efek dari semakin besarnya kompaksi yang diberikan maka distribusi grafit semakin tersebar merata mengisi pori-pori pada partikel serbuk.



Gambar 4.12. Distribusi karbon grafit terhadap resin ABS pada *Composite Bipolar Plate* akibat Kompaksi 150 Bar pada *Heating* 175°C, dengan fraksi volume 75:25 % dan pembesaran 500 X.

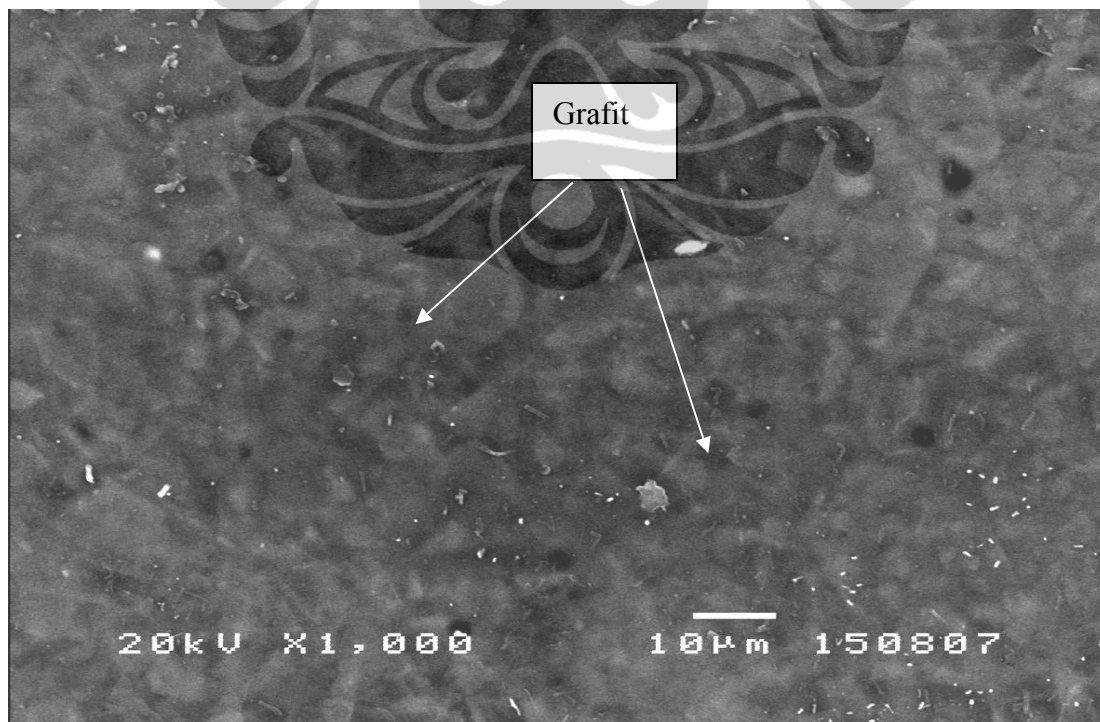


Gambar 4.13. Distribusi carbon grafit terhadap resin ABS pada *Composite Bipolar Plate* akibat Kompaksi 200 Bar pada *Heating* 175°C, dengan fraksi volume 60:40 % dan pembesaran 500 X.

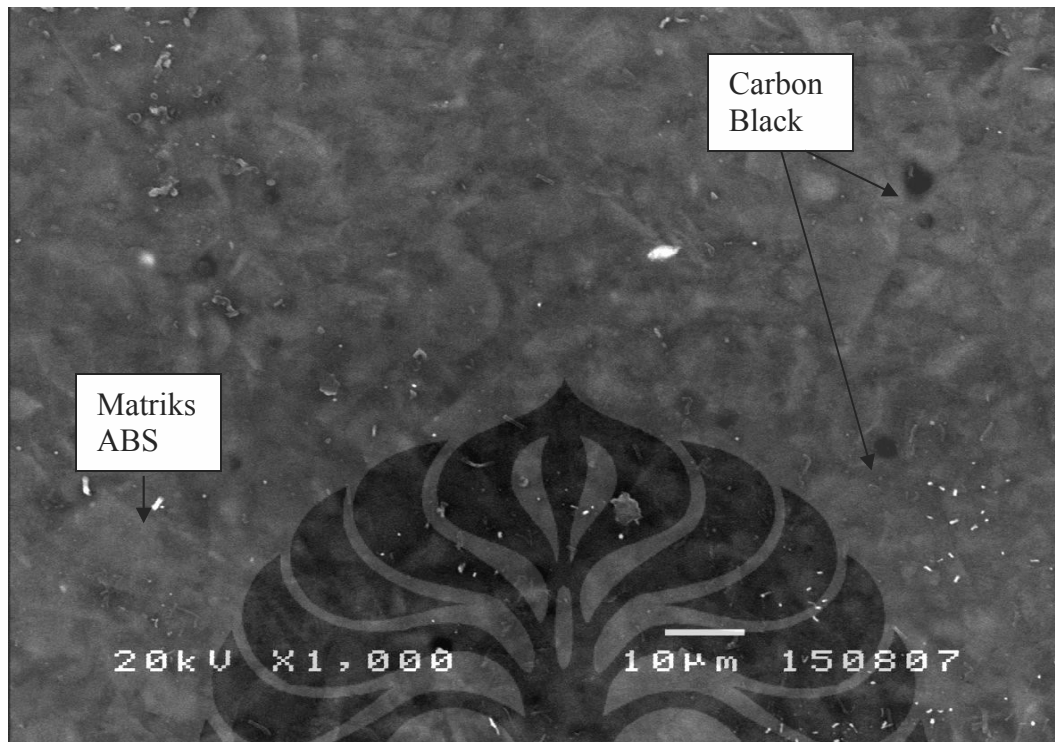


Gambar 4.14. Distribusi carbon grafit terhadap resin ABS pada *Composite Bipolar Plate* akibat Kompaksi 200 Bar pada *Heating* 225°C, dengan fraksi volume 50:50 % dan pembesaran 250 X.

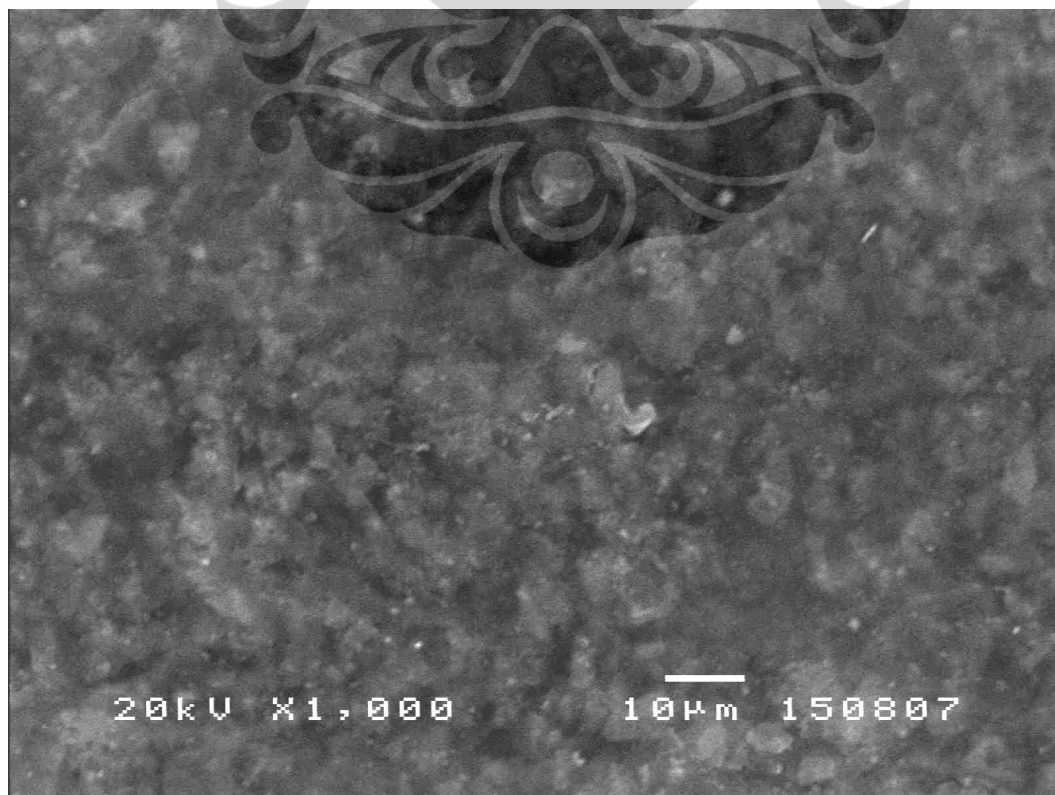
Pada gambar 4.12, 4.13 menunjukkan perbedaan perlakuan sintering maupun pengkompaksian. Pada gambar 4.14 pada kompaksi 200 dan sintering 225°C terlihat distribusi matrik lebih merata dibandingkan gambar 4.12. Mekanisme terbentuknya ikatan antara resin ABS dan grafit serta karbon hitam sebagai peningkatan electrical properties adalah ketika dilakukan proses kompaksi maka masing-masing serbuk saling melakukan pergerakan dan terjadi green compac ketika temperatur sintering mencapai glass transisi dari matriks maka antara matriks dan penguat dalam hal ini grafit terjadi interlocking sehingga ikatan tersebut menghasilkan distribusi serbuk yang seragam antara masing-masing partikel. Pada gambar 4.16 terlihat distribusi karbon hitam yang terlihat teraglomerasi sebagaimana sifat dari carbon black yang berkecenderungan teraglomerasi pada pencampuran blending dengan karet ⁽²³⁾.



Gambar 4.15. Distribusi karbon grafit terhadap resin ABS pada *Composite Bipolar Plate* akibat Kompaksi 100 Bar pada *Heating* 175°C, dengan fraksi volume 75:25 % dan pembesaran 1000 X.



Gambar 4.16. Distribusi karbon grafit terhadap resin ABS pada *Composite Bipolar Plate* akibat Kompaksi 150 Bar pada *Heating* 225°C, dengan fraksi volume 75:25 % dan pembesaran 1000 X



Gambar 4.17. Distribusi karbon grafit terhadap resin ABS tanpa penambahan carbon black pada *Composite Bipolar Plate* akibat Kompaksi 100 Bar pada *Heating* 175°C, dengan fraksi volume 50:50 % dan pembesaran 1000 X

Pada gambar 4.17 diatas bisa terlihat distribusi dari carbon grafit lebih merata dan homogen jika dibandingkan dengan pada gambar dari 4.16. Efek dari homogenitas ini adalah nilai dari porositasnya juga lebih bagus yakni sebesar 0,2240 % jika dibandingkan dengan adanya penambahan karbon hitam, nilai porositasnya 0,4631 % dengan kondisi perlakuan yang sama. Sedangkan pada sifat mekaniknya berkecenderungan mengalami penurunan seperti halnya untuk sifat kuat lenturnya 22,98 MPa, sedangkan dengan penambahan karbon hitam kuat lenturnya 25,78 MPa demikian juga untuk sifat konduktiviti elektrikalnya juga tidak sebgus dengan penambahan karbon hitam, nilai konduktivitas elektrikalnya sebesar 6,95 μ S/cm, untuk material komposit bipolar plate dengan penambahan karbon hitam sebesar 50 μ S/cm.

4.7. PERBANDINGAN ANTARA PELAT BIPOLAR KOMERSIAL DENGAN HASIL PENELITIAN

Pada tabel 4.5. dibawah ini diperlihatkan perbandingan antara pelat bipolar komersial dengan hasil penelitian.

Tabel 4.5 Perbandingan Pelat Bipolar komersial dengan Hasil penelitian

<i>Properties</i>	Pelat Komersial	Pelat Hasil Penelitian		
		25 :75	40 : 60	50 : 50
Densitas (gr/cm ³)	1,9	1,742	1.600	1,494
Porositas (%)	0	1,179	0,503	0,204
<i>Flexural Strength</i> (MPa)	40	22,52	32,23	24,11
<i>Compressive Strength</i> (MPa)	50	9,69	12,58	12,02
<i>Conductivity</i>	➤ 50	200	70	61

<i>Electric</i> ($\mu\text{S}/\text{cm}$)				
<i>Hardness</i> (HRB)	40 - 100	98,1	84,94	95,78*

*) nilai hardness dengan satuan Rockwell α

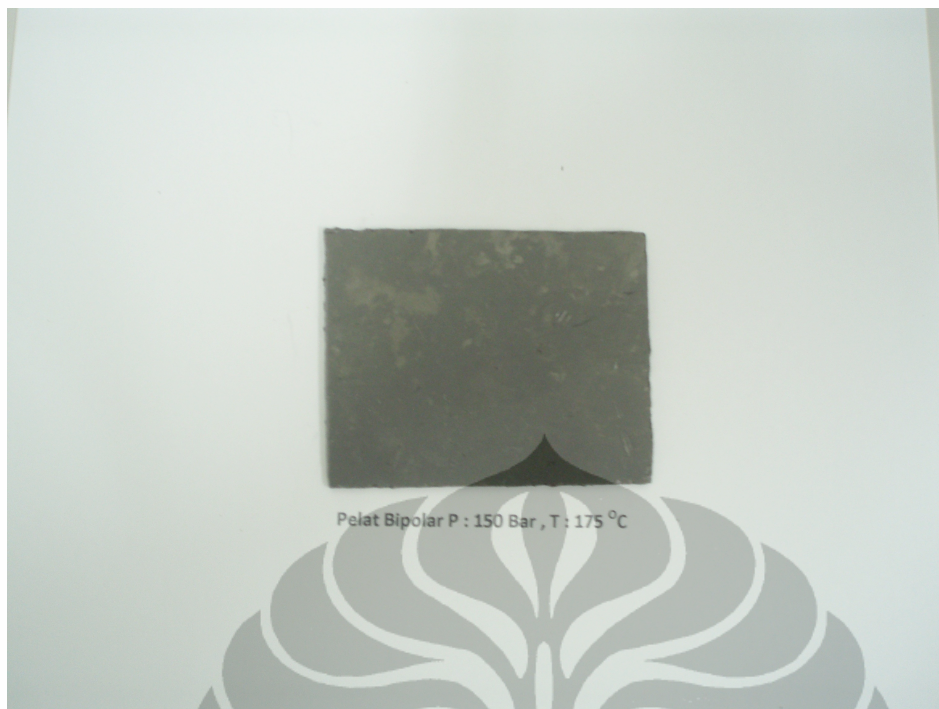
Dari hasil penelitian yang sudah dilakukan terlihat bahwasanya untuk sifat-sifat mekanikalnya rata-rata belum bisa memenuhi untuk standart pelat bipolar sesuai dengan yang dipersyaratkan dipasaran seperti halnya untuk nilai kuat lenturnya baru mencapai sekitar 80,57 % dari yang ada dipasaran demikian juga untuk compressive strengthnya yang juga masih jauh dari persyaratan yaitu baru mencapai sekitar 25,01 % . Namun demikian dari hasil penelitian tersebut , terdapat beberapa besaran yang memiliki nilai yang sudah memenuhi nilai yang dipersyaratkan di pasaran yaitu konduktivitas elektrikalnya yang sudah mencapai lebih dari 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ untuk ke tiga komposisi fraksi, demikian juga untuk nilai kekerasan yang sudah mencapai di range yang dipersyaratkan yakni 40 - 100.

5.9 HASIL PENELITIAN KOMPOSIT PELAT BIPOLAR

Pada gambar 4.18, 4.19 dan 4.20 dibawah ini menunjukkan hasil pembuatan komposit pelat bipolar dengan variasi pada tekanan dan temperature.



Gambar 4.18 Komposit Pelat Bipolar pada P : 100 Bar, T : 175 $^{\circ}\text{C}$



Gambar 4.19 Komposit Pelat Bipolar pada P : 150 Bar, T : 175°C



Gambar 4.20 Komposit Pelat Bipolar pada P : 200 Bar, T : 225°C

Dari gambar 4.18 diatas bisa terlihat bahwa pada penekanan 100 bar masih terlihat banyak lubang-lubang kecil yang masih belum terisi oleh material polimer dan karbon hitam terlihat kurang terdistribusi secara sempurna serta berkecenderungan teraglomerasi, sedangkan pada gambar 4.20 dengan tekanan 200 bar terlihat material komposit yang dihasilkan sudah *flash*. Pada gambar 4.19 menunjukkan hasil yang paling bagus dimana terlihat tidak ada porositas dan kondisi *flash* hampir tidak terjadi.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan diskusi terdahulu dapat ditarik kesimpulan bahwa komposit polimer diperkuat grafit dan karbon hitam dalam bentuk pelat bipolar dengan komposisi 60 : 40 memenuhi spesifikasi teknis untuk aplikasi sel bahan bakar. Bila pelat komposit dipersiapkan dengan penekanan 200 bar pada temperatur 200°C menghasilkan nilai konduktivitas listrik sebesar 230 $\mu\text{s/cm}$ jauh melebihi nilai konduktivitas listrik sel bahan bakar komersial yaitu sebesar 50 $\mu\text{s/cm}$.

Pengaruh Kompaksi dan Temperatur *Heating* material komposit Pelat Bipolar sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat densitas dan porositasnya dimana dua sifat ini berefek pada sifat mekanikal yang lainnya seperti kuat tekan, kuat lentur dan kuat tarik. Densitas maksimum yaitu 1,742 g/cm^3 dicapai pada penekanan 200 bar temperatur sintering 225 °C. Sedangkan nilai terbaik porositas yakni 0,204 % dicapai untuk pada konsolidasi kompaksi 200 bar dan temperatur *heating* 225 °C. Nilai kekerasan maksimum 102,7 Rockwell α dicapai pada kompaksi 150 bar dan temperatur *heating* 200 °C. Sedangkan Kuat Tekan maksimum sebesar 23,46 MPa dicapai pada kompaksi 200 bar dengan temperatur *heating* 200 °C sebesar MPa. Kuat Tarik maksimum sebesar 13,86 MPa dicapai pada kompaksi 200 bar dengan temperatur *heating* 200 °C . Sifat mekanik lainnya yang sangat mempengaruhi performance dari kinerja sel bahan bakar adalah sifat kuat lenturnya. Kuat lentur maksimum sebesar 35,4 MPa dicapai pada kompaksi 150 bar dengan temperatur sintering 225 °C .

6.2. Saran

Dalam melakukan proses pembuatan *Composite Bipolar Plate* dengan proses dispersan polimer sebaiknya dilakukan *prelimenary* untuk mengetahui parameter ideal untuk menghasilkan properties yang optimum dari material sehingga dapat dihasilkan *Composite Bipolar Plate* yang memenuhi spesifikasi dari membran *Fuel Cell*.

Proses dengan menggunakan sistem *Melt Compounding* memanfaatkan peralatan Reomix lebih baik dilakukan untuk yang meminimumkan proses pembuatan Composit Bipolar Plate .



DAFTAR REFERENSI

1. William, M.C.(2000). Fuel Cell Hand Book, Fifth edition, US Department Energy, Morgantown, West Virginia, , p 352.
2. Richard Blunk, Mahmoud H, Daniel lisi, (2006). Polimric Composite Bipolar Plate for Vihicle Application, *Journal of Power Sources*, 156 p. 151-157.
3. Jianhua Hung, Donald G. Baird, James E. McGrath. (2005). Development of Fuel Cell Bipolar Plate from Graphite filled wet-lay Thermoplastic Composite Material, *Journal of PowerSources*, 150 p.110-119.
4. [http: www.ms.ornl.gov/researchgroups/SPM/meth](http://www.ms.ornl.gov/researchgroups/SPM/meth)
5. J. wind, A. Lacroix, S. Brauninger, P. Hendric, C. Heller. (2003). Hand Book of Fuel Cells Fundamentals, Technology and Application, vol 3 : Fuel cell technology and Application, Wiley & Sons, New York, , p 294 – 307
6. Priyanka H. Maheshwari, RB. Mathur, T.L. Dhami. (2005). Fabrication of High Strength and a low Weight Composite Bipolar Plate for Fuel Cell Application, *Journal of Power Sources*, 156p.256-264.
7. Gregor Hoogers “ *Handbook of Fuel Cell* “ SAE International CRC Press Bocaraton London New York Washington DC, p 156-163.
8. Zhang Jie, Zou Yan-wen, , He Jun . (2005). “Influence of graphite particle size and its shape on performance of carbon composite bipolar plate” (Institute of Nuclear Energy and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China); revision accepted July 26, Program (863) of China.
9. Lesdzek Gladczuk, Chiragjoshi.Anamika Patel, Jim guiheen, Zafar Iqbal, Marek Sosnowski. (2000). “ Corrosion-resistant Tantalum Coating for PEM Fuel Cell Bipolar Plate” ,.
10. Kallio, T.,C. Slevin, G. Sundholm, P. Holmlund, and K. Kontturi. (2003). *Electrochem. Comunic. 5*
11. T. M. Besmann, J. W. Klett, dan J. J. Henry. (2000). Metals dan Ceramics Division Oak Ridge National Laboratory Carbon Composite Bipolar Plate for PEM Fuel Cells National Laboratory R&D Meeting DOE Fuel Cells for Transportation Program Pacific Northwest National Laboratory, Juni 7-8,

12. Lubin, G. (1982). Ed. *Handbook of Composites*. Van Nostrand Reinhold Co., New York:.
13. Lenel, Fritz. V.(1980). "***Powder Metallurgy, Principles and Application***", Metal Powder Industries Federation Pricenton, New Jersey, Borup, R.L., Vanderborgh, N.E. (1995). Design and testing criteria for bipolar plate materials for PEM fuel cell application. *Mater. Res. Soc. Symp*
14. Mingruo Hu, Seng sui, X. Zhu, Q. Yu, G. Cao, X. honh, and Hengyong Tu. (2006) . A 10 kW Class PEM Fuel Cell Stactk Based on the catalyst – coated membrane (CCM) method *Intl. Journal Hybrid Energy* 31 p. 1010-1018
15. Mel .M.Schwartz. (2006). “Composite Material Handbook” Mc Graw-Hill Book Company New York St.Louis San Francisco Auckland Bogota Hamburg Johannesburg London,
16. Scholta, J., Rohland, B., Trapp, V., Focken, U.(1999). Investigation on novel low-cost graphite composite bipolar plate. *Journal of Power Source*, p. 84
17. ABS – Acrylonotril Butadine Styrene On Designsite, dk, List Application. Retrieved 27 october 2006.
18. Gessner G. Hawley. (1998). “ The Condensed Chemical Dictionary “ tenth Edition, Vandnostrand reinhold Company, New York..
19. Plastic – Determination of Hardness, Part 1. Ball Indentation Methods, ISO 2039 – 1: 2001
20. Zou, Y.W., Zhang, J., He, J., Yong, P.Z., Tang, Y.P., Sun, B., Qiu, X.L. (2004). Study on the composite bipolar plate for PEMFC. *New Carbon Materials*, **19**(4).
21. Calister , William D. (2003).” Material Science and Engineering An Introduction “ New York , John Willey and Sons,
22. U. Balachandran, S. Doris, J. Guan, and M. Liu.(1999). "Composite Ceramic Membranes for Hydrogen Separation". Patent Application.
23. StandardTest Methods for Apparent Porosity, Water Absorbtion, Apparent Specific Gravity, Bulk Density of Burn Refractory Brick and Shapes by Boiling Water, ASTM C20 - 00
24. The methods for Flexural properties of Unreinforced and Reinforced Plastic and Electrical Insulating, ASTM D 790, 2008

25. Standard Test Methods for Tensile Properties of Polymer Matrix Composites Materials, ASTM D 3039, 2008
26. Standard Test Methods for Compressive Properties of Rigit Plastic, ASTM D D 695, 2008



Lampiran 1 : Perhitungan Penentuan Fraksi Volume

Penentuan Fraksi Volume Matrik (ABS) dan material Karbon Grafit

Jari – jari serbuk

Serbuk = 200 mesh (spesifikasi teknis dari pabrikan)

Data dari ASTM E – 11-61 (Solid – solid operation and Equipment)

didapatkan diameter Sieve adalah : 0,00021 in = 0,0053 mm

Kita asumsikan $r_p = 0,00265$ mm (r_p = jari-jari partikel)

$$t \text{ polimer} = 0,1 \mu\text{m} = 0,00001 \text{ mm}$$

Sampel dengan volume $V_c = A \times t$

$$A = \pi r^2$$

$$\text{Bila } V_p = \frac{4}{3} \pi r^3$$

Jumlah partikel dalam Volume V_c adalah :

$$N = V_c/V_p$$

$$A_p = 4 \pi \times r_p^2$$

$$A_{\text{total}} = N \times A_p$$

Volume polimer yang diperlukan untuk melapisi 1 partikel adalah :

$$V_{\text{polimer}} = A_p \times t$$

Untuk N partikel $V_{\text{polimer}} = N \times A_p \times t$

Fraksi volume ABS yang diperlukan untuk melapisi N partikel dalam volume V_c :

$$V_{\text{polimer}} = V_{\text{polimer}} / (V_g + V_{kb} + V_{\text{polimer}})$$

Untuk membuat sampel komposit dengan ketebalan $t = 4$ mm

$$\text{Diameter cetakan } D = 140 \text{ mm}$$

$$R = 70 \text{ mm}$$

$$\text{Didapatka } V_c = A \times t$$

$$= 61544 \text{ mm}^3 = 61,544 \text{ cm}^3$$

$$V_p = \frac{4}{3} \pi r_p^3$$

$$= 7,79 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3 = 7,79 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3$$

Jadi jumlah partikel dalam volume V_c

Universitas Indonesia

$$N = 789913821$$

$$A_p = 0,0088203 \text{ mm}^2$$

$$A \text{ total} = 6967245,3 \text{ mm}^2 = 69672,45 \text{ cm}^2$$

Volume polimer yang diperlukan untuk melapisi 1 partikel adalah :

$$V \text{ polimer} = A_p \times t = 8,82 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3$$

$$\text{Untuk } N \text{ partikel} = 69,6724 \text{ mm}^3$$

Jadi fraksi volume ABS yang diperlukan untuk melapisi N partikel dalam volume V_c :

$$\begin{aligned} V \text{ ABS} &= 0,0011308 \\ &= 0,113 \% \end{aligned}$$

Dengan perhitungan basis ketebalan coating polimer pada partikel karbon grafit maka bisa kita dapatkan fraksi volume ABS dan partikel karbon grafit sebagaimana tabel dibawah ini .

No	t coating (mm)	V ABS (mm ³)	Fraksi ABS (% Vol)	Fraksi Karbon Grafit (% Vol)
1	0,003	$2,65 \times 10^{-5}$	25	75
2	0,006	$5,29 \times 10^{-5}$	40	60
3	0,009	$7,94 \times 10^{-5}$	50	50

Karena sifat dari karbon grafit yang digunakan bulk , maka untuk lebih mengurangi kesalahan dalam pengukuran pengambilan pembuatan spesimen untuk itu digunakan fraksi berat sehingga bisa digunakan timbangan.

Lampiran 2 : Data hasil pengujian Densitas dan Porositas

















Lampiran 3 : Data hasil pengujian Kekerasan

Universitas Indonesia



Universitas Indonesia

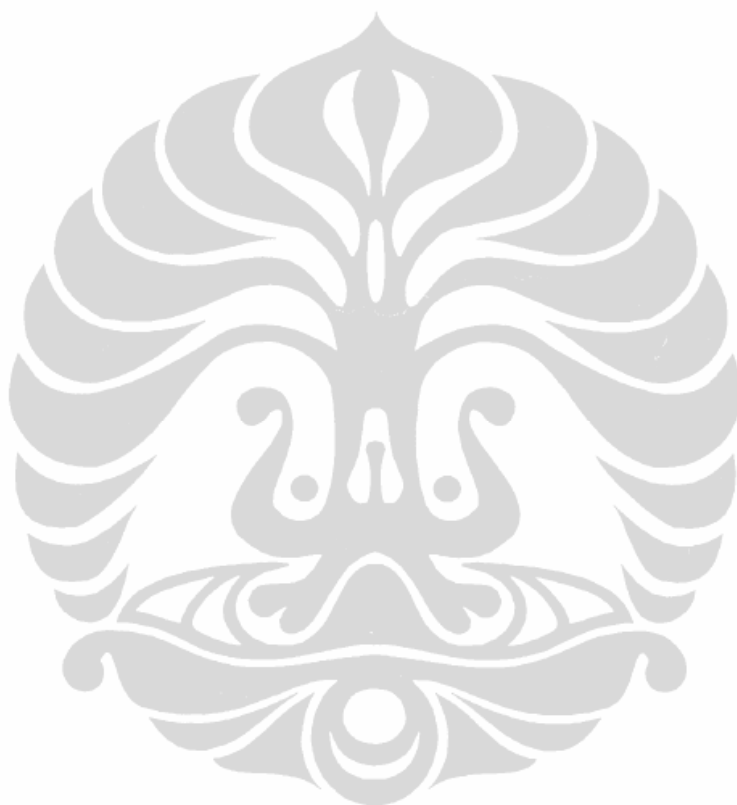




Universitas Indonesia











Lampiran 4 : Data hasil pengujian Kuat Tekan









Universitas Indonesia

Lampiran 5 : Data hasil pengujian Kuat Lentur

Lampiran 6 : Data hasil pengujian Kuat Tarik

Universitas Indonesia

