



UNIVERSITAS INDONESIA

**KOMPOSIT KONDUKTIF POLIPROPILENA  
(PP)/MALEATED-ANHYDRIDE-GRAFTED-POLYPROPYLENE  
(PP-g-MA)/KARBON UNTUK APLIKASI PELAT BIPOLAR  
*POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE (PEM) FUEL CELLS***

**SKRIPSI**

**YOGHI SUHARJANTO  
0404040704**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**KOMPOSIT KONDUKTIF POLIPROPILENA  
(PP)/MALEATED-ANHYDRIDE-GRAFTED-POLYPROPYLENE  
(PP-g-MA)/KARBON UNTUK APLIKASI PELAT BIPOLAR  
*POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE (PEM) FUEL CELLS***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**YOGHI SUHARJANTO  
0404040704**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JULI 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Yoghi Suharjanto  
NPM : 0404040704  
Tanda Tangan :  
Tanggal : 2 Juli 2009

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Yoghi Suharjanto  
NPM : 0404040704  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi :

**KOMPOSIT KONDUKTIF PP/PP-g-MA/KARBON UNTUK APLIKASI  
PELAT BIPOLAR *POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE (PEM) FUEL  
CELLS***

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

#### **DEWAN PENGUJI**

Pembimbing : Prof.Dr.Ir. Anne Zulfia, M.Phil.Eng. (.....)  
Penguji : Dr.Ir. A. Herman Yuwono, M.Phil.Eng. (.....)  
Penguji : Dr.Ir. Sotya Astutiningsih, M. Eng. (.....)

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 2 Juli 2009

#### **KATA PENGANTAR**

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena atas berkat dan rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa selama masa penelitian sampai pada penyusunan skripsi ini banyak pihak yang telah membantu. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M. Phil. Eng. dan Dr. Ir. A. Herman Yuwono, M. Phil. Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Dr. Ir. Verina dan Lembaga P3TKEBT Departemen ESDM yang telah memberikan proyek penelitian ini dan memberikan dukungan dana selama penelitian;
3. Sentra Teknologi Polimer (STP) dan BATAN di PUSPIPTEK Serpong yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data;

4. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; serta
5. Seluruh pihak yang telah membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah Subhanahu Wa Ta'ala berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian dan penyusunan skripsi ini. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 2 Juli 2009

Penulis

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

---

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

Nama : Yoghi Suharjanto  
NPM : 0404040704  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**KOMPOSIT KONDUKTIF PP/PP-g-MA/KARBON UNTUK APLIKASI  
PELAT BIPOLAR *POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE (PEM) FUEL  
CELLS***

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 2 Juli 2009  
Yang menyatakan

(Yoghi Suharjanto)

## ABSTRAK

Nama : Yoghi Suharjanto  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul :

**Komposit Konduktif Polipropilena (PP)/Maleated-Anhydride-Grafted-Polypropylene (PP-g-MA)/Karbon untuk Aplikasi Pelat Bipolar pada Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells**

Untuk mendapatkan energi alternatif yang murah dan ramah lingkungan, trend saat ini ialah pengembangan teknologi *fuel cell*. Salah satu permasalahan yang ada ialah pembuatan komposit ini terbilang mahal dan berat karena material yang digunakan sebagian besar masih berupa logam.

Penelitian ini bertujuan membuat material komposit bermatriks polimer yang digunakan untuk aplikasi pelat bipolar pada PEM *fuel cell* dengan konduktivitas tinggi, ringan, dan murah dengan menerapkan kombinasi polipropilena (PP), maleated-anhydride-grafted-polypropylene (PP-g-MA), material pengisi konduktif (karbon hitam, serat karbon, grafit sintetis), dan antioksidan dicampur dalam *hot blender* dan dicetak menjadi sampel untuk pengujian dengan muatan pengisi 44 wt% dan 80 wt%

Kemudian untuk mengamati kinerja dari komposit yang dihasilkan diukur kerapatan massanya dan dilakukan karakterisasi mekanis (uji tarik dan uji tekuk) uji konduktivitas listrik dan SEM. Namun karena adanya permasalahan kompatibilitas, maka penelitian ini lebih difokuskan pada pengaruh dan efek sinergis dari jenis pengisi karbon yang berbeda-beda dalam matriks PP/PP-g-MA.

Dari hasil penelitian, diketahui bahwa kekuatan tarik dan kekuatan tekuk dipengaruhi oleh konsentrasi pengisi dan penambahan PP-g-MA dalam matriks polipropilena. Konduktivitas tertinggi 8,547 S/cm diperoleh pada komposit dengan konsentrasi pengisi 80 wt%. Dari hasil SEM yang dilakukan, terlihat bahwa morfologi yang dihasilkan komposit ini masih belum sempurna kompatibilitasnya. Dan secara umum, terlihat adanya pengisi yang tidak tersebar merata. Diperkirakan hal ini disebabkan oleh kurang kuatnya ikatan yang terbentuk antara compatibilizer PP-g-MA dengan PP-carbon karena proses *hot blender* yang kurang baik.

Kata kunci:

PEM *fuel cell*, pelat bipolar, konduktivitas listrik, sifat mekanik, komposit bermatriks polipropilena.

Name : Yoghi Suharjanto  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Title :

**Conductive Polypropylene (PP)/Maleated-Anhydride-Grafted-Polypropylene (PP-g-MA)/Carbon Composite for Bipolar Plates in Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells**

To obtain an alternative energy which is cheap and environmental friendly, nowadays, the trend is to develop fuel cell technology. The existing problem that is faced in this technology is the making of its composite still expensive and heavy because most of the materials to be used are still metal form.

The aim of this research is to make material that is polymer matrix composite to be used for application of Bipolar Plate in PEM fuel cell with high conductivity, light and cheap by using the combination of polypropylene (PP), maleated-anhydride-grafted- polypropylene (PP-g-MA), material for conductive filler (black carbon, carbon fiber, synthetic graphite) and antioxidant that is mixed in hot blender and compression molded into samples for testing with loadings up 44 wt% and 80 wt% of fillers.

After that, to observe the performance of the resulted composite, it was measured the mass density and checked the mechanic characteristic (tensile test and flexural test), electric conductivity test and SEM. However, because there was a problem in compatibility, thus, this research was more focused in the influence and synergy effect from variously different carbon filler type in matrix PP/ PP-g-MA.

From the result of the research, it had been known that tensile strength and flexural strength were influenced by the concentration of filler and increasing of PP-g-MA in polypropylene matrix. The highest conductivity 8.547 S/cm was obtained from composite which has concentration of filler 80 wt%. By the SEM test result, it was shown that the resulted morphology from this composite was still imperfect for its compatibility. In general, it was shown that there was un-spread filler. These phenomenon are caused by the weak bonding and the lack of compatibility of PP-g-MA with PP-Carbon due to the un-well of hot blender process.

Keywords:

PEM fuel cell, bipolar plates, electrical conductivity, mechanical properties, polypropylene matrix composite.

## DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	
.....	ii
PENGESAHAN.....	.....
...iii	
KATA PENGANTAR	
.....	iv
PERSETUJUAN PUBLIKASI	
.....	v
ABSTRAK.....	.....
...vi	

ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR SINGKATAN	xviii
DAFTAR ISTILAH / SIMBOL	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN	2
1.3 BATASAN MASALAH	3
1.4 SISTEMATIKA PENULISAN	4
BAB II LANDASAN TEORI	
2.1 <i>FUEL CELL</i>	5
2.1.1 PEM <i>Fuel Cell</i>	7
2.1.2 Pelat Bipolar	11
2.2 KOMPOSIT	17
2.2.1 Komposit Bermatriks Polimer	18
2.2.2 Interface dan Interphase pada Komposit	18
2.2.3 Termodinamika Pencampuran	20
2.3 POLIMER	24
2.4 POLIPROPYLENE	29
2.4.1 Struktur Polipropilene	31
2.4.2 Sifat Propilene	33
2.4.3 Viscoelastik	34



2.4.4 Kristalisasi dan Nukleasi	35
2.5 COMPATIBILIZER PP-G-MA	37
2.5.1 Karakteristik PP-g-MA	37
2.5.2 Kopolimerisasi PP-g-MA	40
2.6 ANTIOKSIDAN	43
2.6.1 Degradasi pada Polimer	43
2.6.2 Mekanisme Kerja Antioksidan	45
2.7 BAHAN PENGISI KONDUKTIF	45
2.7.1 Sifat Konduktivitas Listrik	45
2.7.2 Karbon Hitam	47
2.7.3 Grafit Sintetik	47
2.7.4 Serat Karbon	48
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN	51
3.1.1 Diagram Alir Preparasi dan Fabrikasi Sampel	51
3.1.2 Diagram Alir Pengujian	52
3.2 KOMPOSISI BAHAN	53
3.3 ALAT DAN BAHAN	54
3.3.1 Peralatan	54
3.3.2 Polipropilen	54
3.4 PROSEDUR PENELITIAN	58
3.4.1 Preparasi dan Fabrikasi Sampel	58
3.4.2 Pengujian Karakterisasi	59
Material	59
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN</b>	

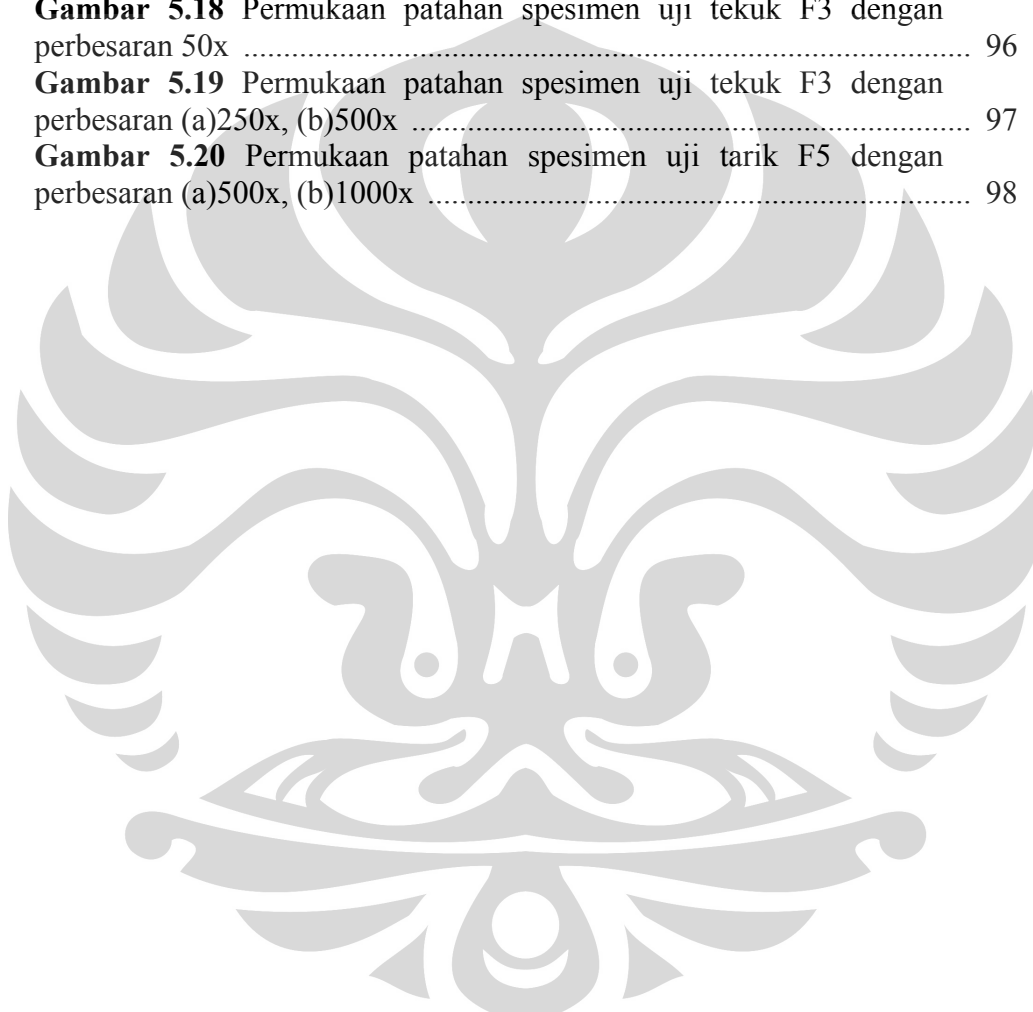
4.1PENGAMATAN VISUAL	68
4.1.1 Sampel Hasil Pencampuran	68
4.1.2 Sampel Hasil Penghalusan	69
4.1.3 Sampel Hasil Pencetakan	69
4.1.4 Sampel Hasil Pembuatan Specimen Uji	71
4.2 HASIL PENGUJIAN KERAPATAN MASSA	71
4.3 HASIL PENGUJIAN TARIK	72
4.4 HASIL PENGUJIAN TEKUK	73
4.5 HASIL PENGUJIAN KONDUKTIVITAS LISTRIK	74
4.5 PENGAMATAN SEM	74
4.5.1 Pengamatan SEM Perbesaran 500x Patahan Akibat Beban Tarik	75
4.5.2 Pengamatan SEM Perbesaran 500x Patahan Akibat Beban Tekuk	76
BAB V PEMBAHASAN	
5.1PENGUKURAN KERAPATAN MASSA	77
5.2PENGUJIAN TARIK	79
5.3PENGUJIAN TEKUK	87
5.4PENGUJIAN KONDUKTIVITAS LISTRIK	90
5.5PENGAMATAN SEM	94
5.5.1 Pengamatan SEM Patahan Sampel Uji Tarik	94
5.5.2 Pengamatan SEM Patahan Sampel Uji Tekuk	96
BAB VI KESIMPULAN	99
REFERENSI	100
LAMPIRAN	106

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> Diagram PEM Fuel Cell.....	8
<b>Gambar 2.2</b> Struktur PEM Fuel Cell.....	10
<b>Gambar 2.3</b> Pelat Bipolar pada FC.....	11
<b>Gambar 2.4</b> Susunan Fuel Cell.....	12
<b>Gambar 2.5</b> Pelat bipolar dengan saluran alir.....	13
<b>Gambar 2.6</b> Letak pelat bipolar ( <i>field flow plate</i> ) pada PEM FC.....	14
<b>Gambar 2.7</b> Karakteristik komposit.....	20
<b>Gambar 2.8</b> Klasifikasi komposit berdasarkan bentuk penguat: (a) komposit serat pendek acak, (b) komposit serat panjang sejajar, (c) komposit partikulat, (d) komposit serpihan, (e) komposit berpengisi .....	21
<b>Gambar 2.9</b> Orientasi pengisi pada komposit berpenguat serat: (a) panjang dan searah, (b) pendek dan searah, (c) pendek dan acak .....	23
<b>Gambar 2.10</b> (a) Kurva tegangan-regangan untuk material serat getas dan matriks ulet. Perpatahan akibat tegangan dan regangan pada kedua material tidak terjadi.(b) Kurva tegangan-regangan untuk komposit berpenguat serat pada pembebanan tegangan searah penjajaran (arah longitudinal) .....	24
<b>Gambar 2.11</b> Bentuk molekul rantai polimer .....	25
<b>Gambar 2.12</b> Rantai polimer amorf.....	25
<b>Gambar 2.13</b> Rantai polimer semikristalin .....	26
<b>Gambar 2.14</b> Ikatan silang pada termoset .....	27
<b>Gambar 2.15</b> Struktur rantai polimer .....	28
<b>Gambar 2.16</b> Ikatan silang pada elastomer .....	28
<b>Gambar 2.17</b> Struktur molekul monomer propilene .....	30
<b>Gambar 2.18</b> Struktur monomer propylene menjadi polipropylene .....	30
<b>Gambar 2.19</b> Isotaktik .....	32
<b>Gambar 2.20</b> Sindiotaktik .....	32
<b>Gambar 2.21</b> Ataktik .....	32
<b>Gambar 2.22</b> Struktur propilene: (a) Isotaktik, (b) Sindiotaktik, dan (c) Ataktik .....	33
<b>Gambar 2.23</b> Struktur spherulite yang tersusun dari fasa kristalin berlapis (lamelar) .....	37
<b>Gambar 2.24</b> PP-g-MA tercampok pada galeri <i>filler</i> .....	41
<b>Gambar 2.25</b> Mekanisme degradasi polimer .....	44
<b>Gambar 2.26</b> Ketergantungan nilai konduktivitas pada fraksi volume pengisi .....	46
<b>Gambar 2.27</b> Komposit hibrida serat-partikulat .....	47

<b>Gambar 3.1</b> Skema pengujian Tarik pada plastik .....	62
<b>Gambar 3.2</b> Bentuk spesimen uji tarik .....	62
<b>Gambar 3.3</b> Skematis pengujian fleksural .....	63
<b>Gambar 3.4</b> Sampel pengujian fleksural .....	64
<b>Gambar 3.5</b> (a) Skematis pengujian fleksural 3-titik. (b) Pembebanan Tarik-tekan yang dialami spesimen .....	65
<b>Gambar 3.6</b> Diagram alat uji konduktivitas dalam bidang (in-plane) sampel berdasarkan ASTM D-991 .....	66
<b>Gambar 3.7</b> Diagram sirkuit pengukuran kondisi listrik .....	66
<b>Gambar 3.8</b> Diagram alat <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) .....	67
<b>Gambar 4.1</b> Komposit PP-karbon hasil <i>hot-blending</i> : (a)F1, (b)F2, (c)F3, dan (d)F4 .....	68
<b>Gambar 4.2</b> <i>Masterbatch</i> komposit PP-karbon berbentuk granula hasil <i>crushing</i> .....	69
<b>Gambar 4.3</b> Pelat tipe I hasil <i>hot press</i> .....	70
<b>Gambar 4.4</b> Pelat tipe II hasil <i>hot press</i> .....	70
<b>Gambar 4.5</b> Spesimen uji tarik tipe IV dan spesimen uji tekuk .....	71
<b>Gambar 4.6</b> Spesimen uji tekuk .....	71
<b>Gambar 4.7</b> Pengamatan SEM formula F2 (44wt%C) .....	75
<b>Gambar 4.8</b> Pengamatan SEM formula F4 (44wt%C) .....	75
<b>Gambar 4.9</b> Pengamatan SEM formula F3 (80wt%C) .....	76
<b>Gambar 4.10</b> Pengamatan SEM formula F5 (80wt%C) .....	76
<b>Gambar 5.1</b> Grafik perbandingan kerapatan massa setiap formulasi komposit PP/PP-g-MA/C .....	78
<b>Gambar 5.2</b> Grafik linier kerapatan massa literatur komposit PP-karbon. ....	79
<b>Gambar 5.3</b> Grafik perbandingan kekuatan tarik setiap formulasi komposit PP/PP-g-MA/C .....	80
<b>Gambar 5.4</b> Grafik linier kekuatan tarik literature komposit PP-karbon. ....	82
<b>Gambar 5.5</b> Grafik perbandingan modulus tarik setiap formulasi komposit PP/PP-g-MA/C .....	84
<b>Gambar 5.6</b> Grafik linier modulus tarik literature komposit PP-karbon. ....	85
<b>Gambar 5.7</b> Gambaran skematik dari <i>craze</i> yang menunjukkan rongga-rongga mikro dan jembatan <i>fibrillar</i> kemudian diikuti oleh retak ( <i>crack</i> ) .....	86
<b>Gambar 5.8</b> Grafik perbandingan kekuatan tekuk setiap formulasi komposit PP/PP-g-MA/C .....	88
<b>Gambar 5.9</b> Grafik linier kekuatan tekuk literatur komposit PP/PP-g-MA/C .....	88
<b>Gambar 5.10</b> Grafik perbandingan modulus tekuk setiap formulasi komposit PP/PP-g-MA/C .....	89
<b>Gambar 5.11</b> Grafik linier modulus tekuk literatur komposit PP/PP-g-MA/C .....	90
<b>Gambar 5.12</b> Grafik perbandingan nilai konduktivitas setiap formulasi komposit PP/PP-g-MA/C .....	91

<b>Gambar 5.13</b> Grafik nilai konduktivitas literatur komposit PP/PP-g-MA/C .....	92
<b>Gambar 5.14</b> Grafik hubungan frekuensi terhadap nilai konduktivitas komposit PP/PP-g-MA/C .....	93
<b>Gambar 5.15</b> Permukaan patahan spesimen uji tarik F2 dengan perbesaran 50x .....	94
<b>Gambar 5.16</b> Permukaan patahan spesimen uji tarik F2 dengan perbesaran (a)250x, (b)500x .....	95
<b>Gambar 5.17</b> Permukaan patahan spesimen uji tarik F4 dengan perbesaran (a)500x, (b)1000x .....	95
<b>Gambar 5.18</b> Permukaan patahan spesimen uji tekuk F3 dengan perbesaran 50x .....	96
<b>Gambar 5.19</b> Permukaan patahan spesimen uji tekuk F3 dengan perbesaran (a)250x, (b)500x .....	97
<b>Gambar 5.20</b> Permukaan patahan spesimen uji tarik F5 dengan perbesaran (a)500x, (b)1000x .....	98



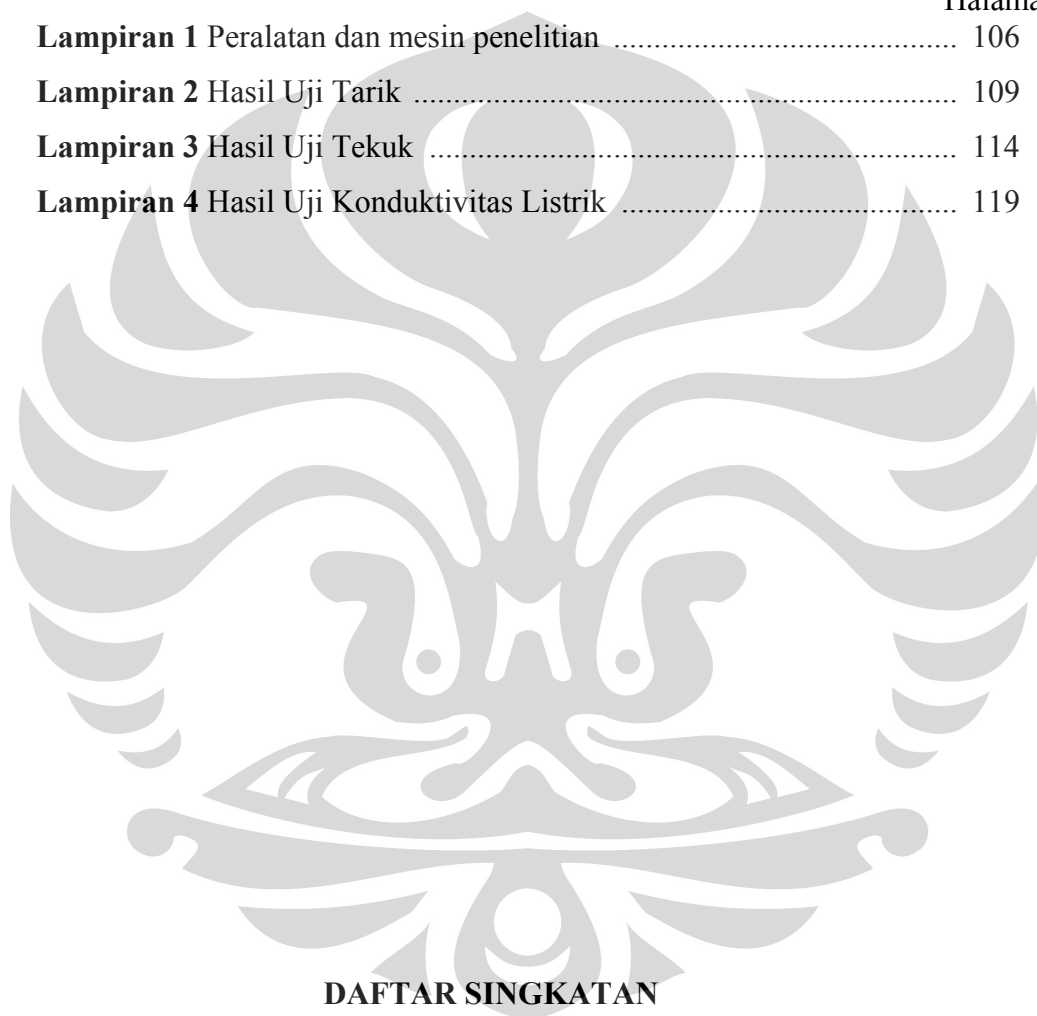
## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 1.1</b> Komposisi formula komposit PEM <i>fuel cell</i> .....	3
<b>Tabel 2.1</b> Komponen-komponen utama PEM <i>fuel cell</i> .....	10
<b>Tabel 2.2</b> Sifat material yang dibutuhkan untuk pelat bipolar PEM FC ...	15
<b>Tabel 2.3</b> Sifat-sifat material untuk pelat bipolar PEM <i>fuel cell</i> .....	15

<b>Tabel 2.4</b> Sifat dan struktur Polimer amorf dan kristalin .....	26
<b>Tabel 2.5</b> Jenis-jenis plastic beserta contohnya .....	29
<b>Table 2.6</b> Klasifikasi kopolimer .....	38
<b>Tabel 2.7</b> Sifat-sifat maleic anhydrite .....	40
<b>Tabel 2.8</b> Nilai konduktivitas untuk jenis material yang berbeda .....	46
<b>Tabel 2.9</b> Jenis-jenis serat grafit .....	48
<b>Tabel 2.10</b> Perbandingan sifat serat karbon berdasarkan bahan dasar .....	49
<b>Tabel 2.11</b> Sifat-sifat serat karbon .....	50
<b>Tabel 3.1</b> Komposisi dan pengkodean formulasi sampel .....	53
<b>Table 3.2</b> Perbandingan fraksi massa ketiga jenis karbon .....	53
<b>Tabel 3.3</b> Spesifikasi kopolimer blok polipropilena COSMOPLENE® .....	55
<b>Tabel 3.4</b> Spesifikasi karbon .....	55
<b>Tabel 3.5</b> Sifat-sifat karbon hitam <i>Cabot Vulcan XC-72</i> .....	56
<b>Tabel 3.6</b> Sifat-sifat serat karbon <i>Fortail 243</i> .....	56
<b>Tabel 3.7</b> Spesifikasi PP-g-MA .....	57
<b>Tabel 3.8</b> Sifat-sifat CN-CAT B215 .....	57
<b>Tabel 3.9</b> Dimensi spesimen uji tarik tipe IV .....	63
<b>Tabel 4.1</b> Nilai kerapatan massa ( <i>density</i> ) .....	72
<b>Tabel 4.2</b> Nilai kekuatan tarik ( <i>tensile strength</i> ) .....	72
<b>Tabel 4.3</b> Nilai modulus tarik ( <i>tensile modulus of elasticity</i> ) .....	73
<b>Tabel 4.4</b> Nilai kekuatan tekuk ( <i>flexural strength</i> ) .....	73
<b>Tabel 4.5</b> Nilai modulus tekuk ( <i>flexural modulus of elasticity</i> ) .....	73
<b>Tabel 4.6</b> Nilai konduktivitas listrik .....	74
<b>Tabel 5.1</b> Nilai kerapatan massa ( <i>density</i> ) masing-masing formula .....	77
<b>Tabel 5.2</b> Nilai kerapatan massa ( <i>density</i> ) literatur .....	77
<b>Tabel 5.3</b> Nilai kekuatan tarik ( <i>tensile strength</i> ) .....	80
<b>Tabel 5.4</b> Nilai modulus tarik ( <i>tensile modulus of elasticity</i> ) .....	83
<b>Tabel 5.5</b> Nilai kekuatan tekuk ( <i>flexural strength</i> ) .....	87
<b>Tabel 5.6</b> Nilai modulus tekuk ( <i>flexural modulus of elasticity</i> ) .....	89
<b>Tabel 5.7</b> Nilai konduktivitas listrik .....	91
<b>Tabel 5.8</b> Nilai konduktivitas listrik literatur .....	91
<b>Tabel 5.9</b> Nilai karakteristik keseluruhan formula .....	93

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Peralatan dan mesin penelitian .....	106
Lampiran 2 Hasil Uji Tarik .....	109
Lampiran 3 Hasil Uji Tekuk .....	114
Lampiran 4 Hasil Uji Konduktivitas Listrik .....	119



## DAFTAR SINGKATAN

C	<i>Carbon</i>
DOE	<i>Department of energy</i>
PPgMA	<i>Maleated-anhydride-grafted-polypropylene</i>
GDL	<i>Gas diffusion layer</i>
LCP	<i>Liquid crystal polymer</i>
MEA	<i>Membrane electrolyte assembly</i>

PAN	<i>Polyacrylonitrile</i>
PEM	<i>Polymer electrolyte membrane</i>
PE	<i>Polyethylene</i>
PP	<i>Polypropylene</i>
PVDF	<i>Polyvinylidene fluoride</i>
SC	<i>Spreading coefficient</i>
SEM	<i>Scanning electron microscopy</i>

### DAFTAR SIMBOL

<b>Simbol</b>	<b>Keterangan</b>	<b>Satuan</b>
$wt\%$	Persen berat	
$c\sigma$	Tegangan/kekuatan tarik komposit	$N/m^2$
$m\sigma$	Tegangan/kekuatan tarik matriks	$N/m^2$
$f\sigma$	Tegangan/kekuatan tarik pengisi/serat	$N/m^2$
$mV$	Fraksi volume matriks	
$V_f$	Fraksi volume pengisi/serat	
$mE$	Modulus elastisitas matriks	$N/m^2$
$fE$	Modulus elastisitas pengisi/serat	$N/m^2$
$clE$	Modulus elastisitas komposit serat panjang lurus	$N/m^2$
$cdE$	Modulus elastisitas komposit serat pendek acak	$N/m^2$
$K$	Parameter efisiensi serat	
$c\varepsilon$	Regangan komposit	$m/m$
$m\varepsilon$	Regangan matriks	$m/m$
$f\varepsilon$	Regangan pengisi/serat	$m/m$
$sl\gamma$	Tegangan permukaan antara padatan dan cairan	$N/m$
$sv\gamma$	Tegangan permukaan antara padatan dan uap	$N/m$
$lv\gamma$	Tegangan permukaan antara cairan dan uap	$N/m$
$\theta$	Sudut kontak antara cairan dan permukaan padat	
$\rho_c$	Kerapatan massa komposit	$g/cm^3$



$\rho_f$	Kerapatan massa pengisi/serat	$\text{g/cm}^3$
$\rho_m$	Kerapatan massa matriks	$\text{g/cm}^3$
$M_f$	Fraksi massa pengisi/serat	
sampel $\rho$	Kerapatan massa sampel	$\text{g/cm}^3$
air $\rho$	Kerapatan massa air	$\text{g/cm}^3$
u $M$	Massa sampel di udara	gram
a $M$	Massa sampel di air	gram



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. LATAR BELAKANG

Sel tunam (*Fuel cell*) merupakan suatu energi alternatif pengganti bahan bakar minyak yang menggunakan prinsip dasar elektrokimia dengan cara mengkonversi energi kimia (sebagai bahan bakar tanpa proses pembakaran) menjadi listrik. Dengan adanya krisis bahan bakar minyak belakangan ini, maka sangat diperlukan suatu energi alternatif untuk masa depan yang tentunya murah dan ramah lingkungan. Menggunakan gas hidrogen ( $H_2$ ) sebagai sumber bahan bakarnya, residu yang dihasilkan hanyalah berupa uap air sehingga tidak mencemari udara. Gas hidrogen sendiri diperoleh dari cara yang mudah dan murah, yaitu hanya dengan proses elektrolisis air<sup>[1]</sup>. Namun, untuk saat ini proses pembuatan komponen *fuel cell* masih tergolong mahal karena material yang digunakan sebagian besar masih berupa logam paduan. Selain itu juga berat jenis logam yang tinggi membuat efisiensi bahan bakar menjadi berkurang, misalnya bila diaplikasikan pada kendaraan bermotor maka berat kendaraan menjadi besar. Hal ini menjadikannya boros energi. Untuk itu selain diperlukan harga bahan baku yang murah, proses fabrikasi yang cepat dan sederhana, juga dibutuhkan komponen *fuel cell* yang ringan namun tetap kuat, tahan korosi, dan awet<sup>[2,3]</sup>.

Untuk mengatasi masalah tersebut, komposit *polymer electrolyte membrane fuel cell* bisa menjadi salah satu solusinya. Sifat polimer yang ringan dan tahan korosi menjadikannya sangat cocok untuk aplikasi ini. Harganya yang murah dan mudah dibentuk membuat proses fabrikasi secara massal menjadi mudah. Hanya saja, polimer masih memiliki beberapa kekurangan, antara lain: tidak tahan pada suhu tinggi, kekerasan rendah, bisa terdegradasi dalam lingkungan yang tidak stabil, dan bersifat non-konduktor listrik<sup>[4]</sup>. Sehingga perlu dilakukan rekayasa material dengan melakukan pencampuran (*mixing*) dengan penambahan bahan lain menjadi sebuah komposit polimer konduktif. Salah satu material polimer yang dapat diaplikasikan pada komposit tersebut adalah matriks polypropilene. Material ini umumnya memiliki kekuatan, ketahanan mulur, oksidasi dan korosi yang sangat baik pada lingkungan bertemperatur ruang

maupun lingkungan bertemperatur relative tinggi <sup>[2]</sup>. Bahkan harganya yang murah dan berat jenisnya yang ringan menjadikannya memiliki kemampuan produksi yang lebih baik dibandingkan baja tahan karat dan paduan super <sup>[3]</sup>.

Untuk menambahkan sifat konduktif listrik, perlu ditambahkan *filler* seperti *carbon black*, *carbon fiber*, dan *grafit*. *Carbon fiber* sendiri selain bisa menambahkan sifat konduktifitas, juga berfungsi untuk meningkatkan sifat fleksibilitas. Metoda pembuatan komposit polimer yang digunakan yaitu *hot blending* dan *compression molding*<sup>[5]</sup>. Aditif PP-g-MA yang berfungsi sebagai *coupling agent* ditambahkan agar proses pencampuran berjalan sempurna. Selain itu juga ditambahkan antioksidan untuk mencegah terjadinya degradasi akibat panas yang tinggi saat proses pencampuran pada mesin *rheomix*.

Komposit polimer konduktif ini nantinya diaplikasikan untuk material pembuat plat bipolar sebagai salah satu komponen yang memiliki volume paling besar (80 %), mencakup 70% berat keseluruhan, dan 60% dari total biaya pembuatan pada *polymer electrolyte membrane fuel cell* <sup>[2]</sup>. Penelitian terakhir yang dilakukan oleh Yuhua Wang (2006) berhubungan dengan masalah ini adalah adanya saling keterkaitan antara kekuatan mekanik dengan sifat konduktifitas dimana semua polimer komposit *bipolar plate* menunjukkan kemampuan mekanik (*tensile test* dan *flexural test*) yang lebih baik dibandingkan plat bipolar grafit namun lebih rendah pada uji kurva polarisasi arus-tegangan (*conductivity test*). Sedangkan penelitian yang akan dilakukan kali ini menyelidiki tentang pengaruh aditif *compatibilizer* PP-g-MA terhadap sifat mekanik dan *filler konduktifitas* komposit termoplastik konduktif untuk pembuatan plat bipolar pada *polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC)*.

## 1.2. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian yang akan dilakukan adalah:

- 1) menyelidiki mekanisme pembuatan komposit polimer dengan *filler* berupa campuran serbuk *carbon black*, *carbon fiber*, dan *grafit* pada matriks polypropylene melalui metode *mixing* menggunakan mesin *hot blender rheomix*.

- 2) menyelidiki pengaruh *compatibilizer* PP-g-MA terhadap sifat *mixing* matriks polypropylene dengan *filler* campuran serbuk *carbon black*, *carbon fiber*, dan *grafit* pada pembuatan komposit termoplastik.
- 3) menyelidiki kekuatan tarik, fleksibilitas, dan sifat konduktifitas komposit polimer untuk pembuatan plat bipolar pada *polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)*.

### 1.3. RUANG LINGKUP

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi oleh hal-hal berikut:

- material yang digunakan sebagai komposit terdiri dari 4 formula dengan komposisi berbeda (F1, F2, F3, F4 dan F5) formula F1 merupakan polypropylene murni.

**Tabel 1.1** Komposisi sampel komposit.

Bahan	Satuan	Kode Formulasi				
		F1	F2	F3	F4	F5
Polipropilena	%wt	100	50	50	14	14
	g	500	250	250	70	70
Karbon	%wt	0	44	44	80	80
	g	0	220	220	400	400
PP-g-MA	%wt	0	5	5	5	5
	g	0	25	25	25	25
Antioksidan	%wt	0	1	1	1	1
	g	0	5	5	5	5
<b>Total</b>	G	500	500	500	500	500

Keterangan:

Formula 2. Komposisi *filler*: serat karbon fiber 22%, karbon hitam 22%.

Formula 3. Komposisi *filler*: serat karbon 15%, karbon hitam 20%, grafit 9%.

Formula 4. Komposisi *filler*: serat karbon 25%, karbon hitam 30%, grafit 25%.

Formula 5. Komposisi *filler*: serat karbon 20%, karbon hitam 40%, grafit 20%.

- proses pencampuran dilakukan terhadap masing-masing formula dengan menggunakan mesin *hot blending*.
- Pembuatan sampel dilakukan dengan metode *hot pressing* kemudian dicetak menjadi spesimen uji sesuai standar ASTM D638 (uji tarik) dan ASTM D790 (uji fleksural).
- Karakterisasi dilakukan untuk membandingkan sifat-sifat komposit. Pengujian sampel meliputi pengukuran kerapatan massa, pengujian tarik (*tensile*), pengujian tekuk (*flexural*), dan pengujian konduktivitas listrik. Selain itu, dilakukan juga pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengamati morfologi material komposit pada bagian perpatahan sampel uji tarik dan uji tekuk.

#### 1.4 SISTEMATIKA PENULISAN

Skripsi ini terdiri dari enam bab:

**Bab I Pendahuluan** berisi latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

**Bab II Landasan Teori** berisi studi literatur yang berkaitan dengan penelitian ini.

**Bab III Metodologi Penelitian** berisi prosedur penelitian, daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

**Bab IV Hasil penelitian** berisi data-data pengujian.

**Bab V Pembahasan** berisi diskusi dan analisis dari hasil penelitian tersebut.

**Bab VI Kesimpulan** berisi kesimpulan akhir berdasarkan hasil dan pembahasan.

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 FUEL CELL**

**Fuel cell** adalah sebuah konversi energi baru (pengganti minyak bumi) yang menggunakan prinsip elektrokimia. Alat ini memproduksi listrik dari berbagai sumber bahan bakar seperti hidrogen (anoda) dan oksigen (katoda). Reaksi ini menghasilkan elektrolit. Elektron dari elektrolit inilah yang dipakai untuk tenaga listrik<sup>[1]</sup>. Umumnya, reaktan mengalir kedalam sistem dan produk hasil reaksi mengalir ke luar dimana elektrolit terbentuk didalam sel. Fuel cell bisa beroperasi secara terus-menerus selama aliran elektrolit ini terjaga. Fuel cells berbeda dari batere dimana batere menghabiskan reaktan, sehingga hanya bisa sekali pakai. Sedangkan fuel cell selama oksidan tersebut masih tersedia, maka prosesnya akan terus berlangsung. Ada beberapa kombinasi dari bahan bakar dan oksidan yang memungkinkan. Sel hidrogen menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar dan oksigen sebagai oksidan. Contoh lainnya menggunakan hidrokarbon dan alcohol. Dan lain-lain.

*Jika elektrolisa dapat menguraikan air menjadi gas hidrogen dan oksigen dengan bantuan listrik dan elektroda. Pada fuel cell memasukan gas hidrogen dan oksigen dengan bantuan elektrolit dan elektroda untuk memproduksi tenaga listrik.*

Distribusi listrik dalam jumlah besar merupakan kesulitan tersendiri terutama untuk daerah yang jauh. Banyaknya saluran listrik tegangan tinggi kurang disukai orang karena ada efek samping dan memerlukan biaya operasional besar. Fuel cell bersama kincir angin dan foto cell merupakan alternatif untuk menyediakan listrik untuk daerah terpencil. Foto cell memerlukan matahari, kincir angin bergantung pada adanya angin dan berisik, sedang fuel cell memerlukan gas hidrogen. Kelebihan dari fuel cell adalah lebih efisien, tidak berisik, tidak mengeluarkan gas buang kecuali air sehingga tidak menyebabkan polusi<sup>[6]</sup>.

Untuk fuel cell bahan gas oksigen dapat dari udara sedang gas hidrogen dapat diperoleh dari reaksi reformer dari hidrokarbon yang pada saat ini diperoleh dari pabrik besar. Gas hidrogen mempunyai kesulitan untuk disimpan dan ditransport karena molekul yang kecil sehingga sulit untuk dicairkan dan mudah terbakar. Usaha memperoleh hidrogen dengan mudah sedang diusahakan dengan berbagai cara misalnya memperkecil reaktor reformer dengan bahan baku LPG atau gas methane, menguraikan metanol yang dibuat dari pabrik besar tetapi dalam bentuk cair sehingga mudah untuk ditransport. Gas hidrogen dapat juga diperoleh dari methanol setelah diuraikan menjadi gas CO dan hidrogen, kemudian gas CO dioksidasi menjadi CO<sub>2</sub> dan air<sup>[1]</sup>.

Macam bahan bakar lain seperti metan, minyak diesel dapat dipergunakan langsung untuk beberapa jenis fuel cell. Ion yang bermigrasi dapat sebagai hidrogen, oksigen atau hidroksida. Sedang elektrolit dapat berupa membrane plastik, garam karbonat cair, lapisan oksida keramik, larutan alkali, asam fosfat. Elektroda biasanya dari logam platina atau nikel.

Konstruksi, elektrode dan elektrolit yang dipergunakan bermacam-macam tergantung dari nama dan jenis fuel cell. Pada saat ini dikenal berbagai macam fuel cell: Alkali (AFC), karbonat cair (MCFC), Asam fosfat (PAFC), membran pemindah proton (PEM), oksida padat (SOFC).

Salah satu contoh nyata aplikasi *Composite fuel cell* ini adalah *Bipolar Plate Fuel Cell*, suatu pelat atau lempengan struktur penguat dalam fuel cell (bahan bakar), selain itu juga berfungsi sebagai pengumpul arus muatan listrik (*electrical current*), sebagai alur pemasok bahan bakar itu sendiri, penahan lewatnya gas secara langsung (*gas barrier*) juga sebagai penyalur sisa reaksi/hasil samping<sup>[7]</sup>. Pada awalnya pelat bipolar terbuat dari bahan konduktor tinggi seperti tembaga, grafit maupun aluminium. Pelat bipolar dengan bahan baku seperti itu memiliki banyak kekurangan seperti pembuatannya yang relatif lama sangat sulit serta berat yang terlalu besar. Lamanya pembuatan pelat tersebut karena pengolahan permukaan untuk mendapatkan permukaan yang luas dan mudah mengalirkan suatu masa. Sedangkan pelat dengan bahan logam memiliki berat bisa mencapai 70 – 90 % dari berat bahan bakar sistem PEM.

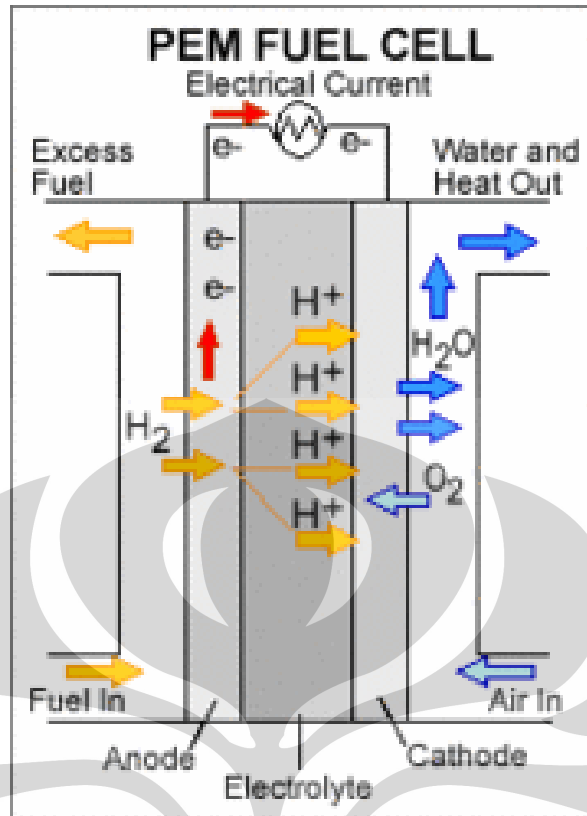
komposit antara material plastik dengan material konduktor merupakan suatu alternatif untuk memecahkan permasalahan di atas, yaitu untuk mendapatkan masa yang lebih ringan dengan produksi yang relatif cepat. Pada awal tahun 2000-an, pelat bipolar komposit plastik ini sudah mulai di produksi, dimana plastik yang digunakan berjenis termoset, yaitu jenis plastik yang tidak bisa di daur ulang dan proses pencetakannya agak lama. Akhir-akhir ini pengembangan material plastik/polimer lebih ke arah jenis termoplastik yang memiliki sifat dapat didaur ulang dan cepat proses produksinya. Pengembangan material terus berlanjut untuk mendapatkan beberapa nilai lebih (*values added*).

Aplikasi fuel cells sangat berguna sebagai sumber energi alternative pada lokasi yang terpencil, seperti pesawat ulang-alik, alat pendeteksi cuaca, kendaraan umum dipelosok daerah, bahkan untuk kalangan militer dengan medan yang relatif sulit. Sistem fuel cell yang bekerja menggunakan hidrogen bisa didesain dengan sangat ringan dan mudah dibawa. Alat fuel cell tidak mempunyai bagian yang bergerak/ bergetar (bila dibandingkan system piston pada bahan bakar minyak) dan sama sekali tidak menimbulkan polusi. Sehingga pada kondisi yang ideal, system ini tahan uji.

### **2.1.1 PEM Fuel Cell**

*Polymer electrolyte membrane* (PEM) *fuel cell* adalah sebuah perangkat elektrokimia yang mengubah secara langsung energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik melalui reaksi berpasangan oksidasi-reduksi<sup>[8]</sup>.





**Gambar 2.1** Diagram PEM fuel cell. <sup>[9]</sup>

PEM fuel cell merupakan sumber energi yang sangat baik bila diaplikasikan pada alat transportasi, karena perangkatnya mudah didistribusikan dan mudah dibawa <sup>[10]</sup>. Selain itu, PEM fuel cell memiliki potensial *solid state*, ringan, rapat arus yang tinggi, dan beroperasi pada temperatur rendah <sup>[11]</sup>. Pada lima tahun terakhir, penelitian PEM fuel cell mengalami peningkatan yang signifikan. Industri otomotif melakukan investasi melalui berbagai usaha dalam mengkomersialisasi PEM fuel cell pada mobil, dengan harapan mampu bersaing dengan kendaraan bermesin bakar internal <sup>[12]</sup>. Di sisi lain, ada berbagai hambatan dalam pengkomersialisasian PEM fuel cell, seperti; kurangnya produksi hidrogen dan infrastruktur distribusi, rendahnya kerapatan/densitas wadah penyimpanan gas, masalah kekuatan susunan PEM fuel cell, serta biaya produksinya masih tinggi. Sebagai salah satu komponen utama dari PEM fuel cell, pelat bipolar membutuhkan material dan desain yang baru dalam rangka mengurangi biaya produksi serta untuk mengurangi bobot fuel cell <sup>[2]</sup>.

PEM *fuel cell* Mempergunakan membran plastik tipis sebagai elektrolit, dioperasikan pada suhu 80 °C, untuk mempercepat reaksi dipergunakan katalis platina pada kedua sisi membran. Gas hidrogen melepaskan elektron dengan cara ionisasi pada katalis di anoda kemudian proton yang bermuatan positif menuju katoda dengan menembus membran tipis yang berpori. Sementara itu elektron melalui sirkuit luar mengalir kearah katoda dan dipergunakan sebagai sumber tenaga listrik. Pada katoda elektron, ion hidrogen dan oksigen bereaksi membentuk air dan sedikit panas. Effisiensi dari proses ini mencapai 40-50%. Membran harus dapat mengalirkan proton dan menahan elektro dan gas yang lebih berat.

PEM mempunyai berbagai kelebihan misalnya dioperasikan pada suhu rendah, mempergunakan elektrolit didalam membrane polimer sehingga tipis dan dapat dengan mudah untuk transportasi.

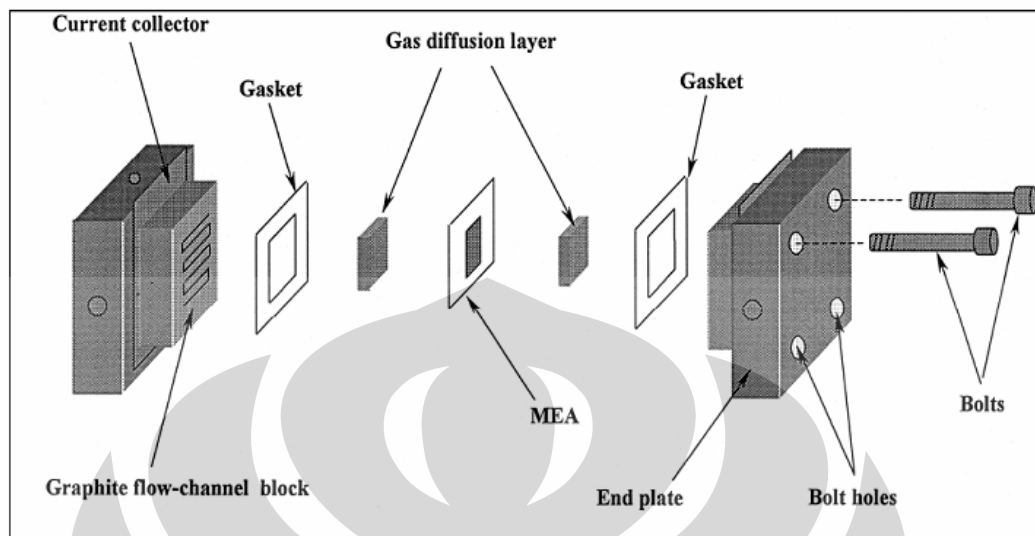
Kesulitan dari jenis ini adalah: mempergunakan gas hidrogen sebagai bahan bakar yang sulit untuk ditransportasikan, dan mempergunakan elektroda platina yang berharga mahal. Membrane yang sering digunakan dari jenis polimer PS, PEEK, PBI, PPS, PTFE yang tersulfonasi mempunyai ketebalan antara 125-250 mm.

Sabagai contoh, kegagalan penggunaan PS pada penerbangan ruang angkasa GEMINI disebabkan karena adanya reaksi dengan senyawa radikal HO<sup>2</sup>, sehingga saat ini banyak digunakan polimer dari jenis PTFE seperti Nafion, Flemion, Aciplex, Gore-Select dan lainnya. Pada dasarnya membrane harus memenuhi beberapa persyaratan untuk dapat dipergunakan pada PEM seperti konduktifitas  $10^{-2} - 10^{-1} \text{ S cm}^{-1}$ , kuat, tahan panas, dan dapat menyerap air diatas 15 H<sub>2</sub>O/-SO<sub>3</sub>H. Untuk lebih ekonomis membrane harus dari bahan murah, konduktifitas tinggi diatas suhu 100 °C dan dibawah 0 °C, dapat menyerap air walaupun suhu diatas 100 °C dan dapat tahan untuk dipergunakan lebih dari 10 tahun<sup>[13]</sup>.

#### **2.1.1.1 Struktur PEM Fuel Cell**

Struktur PEM *fuel cell* terdiri dari *membrane electrolyte assembly* (MEA) yang memiliki lapisan katalis di kedua sisinya, lapisan difusi gas (GDL), *gaskets*,

pelat bipolar, penyimpanan arus, dan pelat penutup. PEM *fuel cell* terdiri dari 4 komponen utama seperti disajikan pada Tabel 2.1.



Gambar 2.2 Struktur rangkaian PEM *fuel cell* [2]

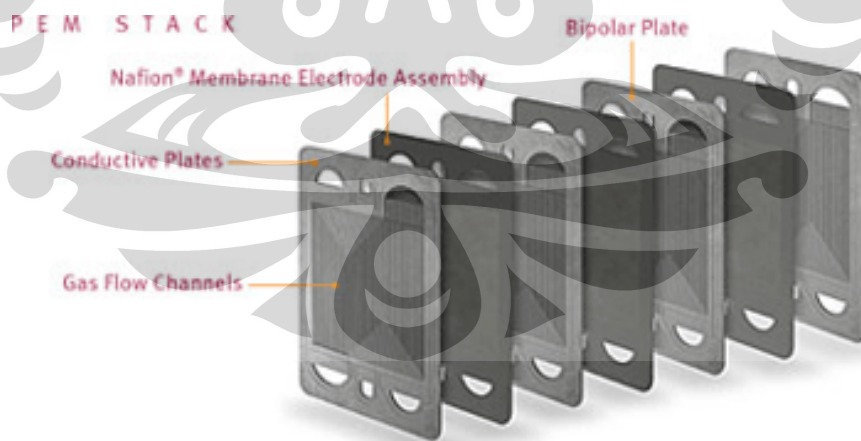
Tabel 2.1 Komponen-komponen utama PEM *fuel cell* [14].

Komponen	Material	Fungsi
<i>Membrane electrolyte assembly</i> (MEA)	Polimer solid terimpregnasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda.  Kertas atau kain carbon berpori untuk lapisan difusi gas (GDL)	Terdiri dari 2 elektroda, 1 membran elektrolit, dan 2 GDL. Membran memisahkan (dengan pembatas gas) 2 setengah-reaksi sel dan melepas proton dari anoda ke katoda. Lapisan katalis yang terdispersi pada elektroda memacu setiap setengah-reaksi. GDL mendistribusikan gas secara merata ke katalis di membran, mengalirkan elektron dari area aktif menuju pelat bipolar dan membantu pengaturan air.

Pelat bipolar	Grafit, <i>stainless steel</i> , atau komposit polimer termoplastik	Mendistribusikan gas di bagian area aktif membran. Mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda. Membuang air keluar sel.
Pelat penutup	Material dengan kekuatan mekanik yang baik (biasanya baja atau aluminium)	Menyatukan rangkaian <i>fuel cell</i> .
Penyimpan arus	Logam dengan kontak elektrik dan konduktivitas yang baik (biasanya tembaga)	Menyimpan dan mentransfer arus listrik dari dalam ke luar sirkuit.

### 2.1.2 Pelat Bipolar

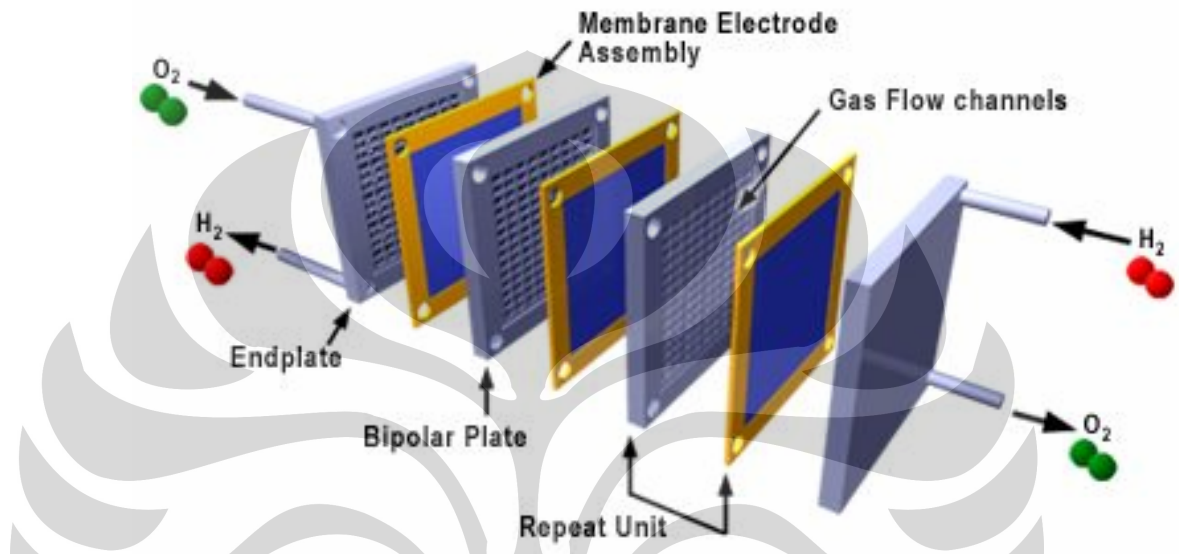
Pelat bipolar merupakan bagian dari struktur system fuel cell yang memiliki fungsi ganda, yaitu sebagai pengatur pendistribusian bahan bakar fuel sel (gas hydrogen-oksigen) dan sebagai pengumpul arus listrik yang dihasilkan system fuel cell. Fungsi lain dari pelat bipolar ini adalah sebagai struktur penguat (integrity) susunan fuel cell. Pelat bipolar dapat dilihat pada Gambar 1. Dibawah ini.



**Gambar 2.3.** Pelat Bipolar pada FC <sup>[15]</sup>

Pada umumnya pelat bipolar ini terbuat dari material grafit dan logam seperti aluminium, baja, titanium, nikel dan lainnya dimana proses pencetakannya sangat rumit dan mahal. Kelemahan lain dari pemakaian logam tadi adalah berat,

pelat bipolar logam memiliki berat sekitar 70% dari berat alat fuel cell. Pembuatan pelat bipolar logam juga rumit dan mahal sehingga biaya untuk pelat bipolar ini bisa mencapai 60% dari harga keseluruhan dari alat fuel cell. Posisi pelat bipolar dalam system fuel cell tipe PEM (Polymer Electrolyte Membrane) dapat dilihat pada Gambar 2.4 Dibawah ini.

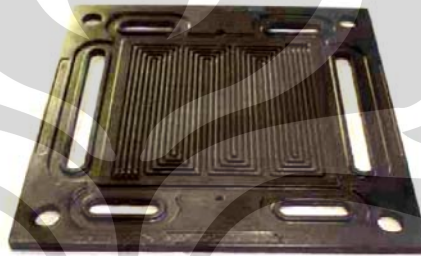


Gambar 2.4. Susunan fuel cell<sup>[7]</sup>

Agar fuel cell dapat dipasarkan dimasyarakat maka perlu dilakukan inovasi dari para peneliti, terutama untuk menurunkan biaya produksi serta menjadikan sel yang ringan, karena umumnya sel akan digunakan portable. Untuk menunjang inovasi dari kedua parameter tersebut diatas maka salah satu usaha adalah mensubtitusikan komponen pelat bipolar dari berat menjadi ringan dan dengan harga proses yang relatif murah. Pilihan utama dari usaha tersebut adalah menggantikan material pelat bipolar dari logam dengan komposit bermatriks polimer seperti apa yang telah diuraikan tersebut diatas. Komposit polimer PP-Grafit mudah dicetak dengan injection molding dan harga material serta biaya cetaknya relatif murah. Sedangkan untuk meningkatkan sifat elektriknya (konduktivitas) maka kiranya perlu ditambahkan logam konduktor seperti tembaga ataupun aluminium. Penambahan logam untuk sifat konduktifnya akan lebih efektif dan efisien jika ditambahkan dalam bentuk nano material, karena

permukaan dari logam tersebut akan sangat luas walaupun penambahannya hanya sedikit saja.

Pelat bipolar atau pelat bidang alir (*flow field plate*) digunakan sebagai penghubung antara dua elektroda berbeda kutub. Pelat bipolar dibuat dari material yang mampu mengalirkan listrik dan tidak dapat ditembus gas, fungsinya sebagai penyimpan arus dan sebagai struktur penguat rangkaian *fuel cell*. Pelat ini biasa dibuat dari grafit, logam (aluminium, *stainless steel*, titanium, dan nikel), atau dapat juga dibuat dari komposit<sup>[16]</sup>. Saluran alir gas dicetak pada permukaan pelat sebagai tempat aliran gas-gas yang bereaksi. Gambar di bawah ini menunjukkan sebuah pelat bipolar PEM *fuel cell* dengan saluran alir.



**Gambar 2.5** Pelat bipolar dengan saluran alir<sup>[17]</sup>.

Sebagai komponen utama pada PEM *fuel cell*, pelat bipolar memenuhi bagian yang signifikan dari total biaya dan bobot rangkaian *fuel cell*. Pelat bipolar mencakup 80% total bobot dan 45% biaya, sehingga hal ini bersifat kritis dan perlu pertimbangan dalam mendesain *fuel cell*<sup>[16]</sup>. Pembuatan saluran alir (*flow path*) pada permukaan pelat bipolar juga salah satu proses yang membutuhkan biaya, hal ini menjadi faktor kunci yang menghambat komersialisasi PEM *fuel cell*. Oleh karena itu, diperlukan pelat bipolar yang murah, tipis, dan ringan, sehingga dapat mengurangi bobot, volume, dan biaya produksi *fuel cell*.

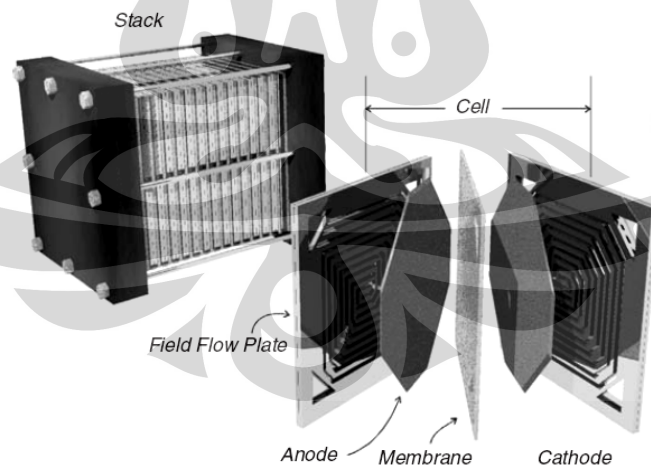
Pada aplikasi di bidang transportasi, bobot secara khusus menjadi bahan pertimbangan, karena penambahan bobot berarti mengurangi efisiensi bahan bakar. Salah satu jenis *fuel cell* dalam aplikasi kendaraan bermotor membutuhkan 200 - 400 pelat bipolar. Dalam kasus ini, diperlukan pemilihan material dan metode pemrosesan pelat bipolar yang tepat, agar dapat diaplikasikan pada industri otomotif<sup>[18]</sup>. Material baru pelat bipolar untuk industri otomotif harus memiliki konduktivitas yang tinggi dan kerapatan massanya rendah bila

dibandingkan material lain, seperti; baja, aluminium, dan grafit. Selain itu, pelat bipolar harus dapat diproduksi secara massal<sup>[19]</sup>.

### 2.1.2.1 Fungsi Pelat Bipolar

Pelat bipolar memiliki banyak fungsi dalam lingkungan operasi PEM *fuel cell*. Fungsi utama pelat bipolar adalah sebagai berikut:

- Mengalirkan elektron ke seluruh sirkuit;
  - mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda dan katoda,
  - menyatukan rangkaian *fuel cell* yang dilengkapi voltase (rangkaian *fuel cell* tergantung pada bentuk pelat bipolar).
- Mengalirkan dan mendistribusikan gas ke elektroda secara merata;
- Memisahkan oksidan dan bahan bakar gas, memasukkan H<sub>2</sub> ke anoda dan O<sub>2</sub> ke katoda, serta membuang air hasil reaksi;
- Sebagai penguat mekanik sekaligus menahan membran tipis dan elektroda, serta sebagai penjepit rangkaian *fuel cell*;
- Sebagai konduktor panas untuk meregulasikan temperatur *fuel cell* dan memindahkan panas dari elektroda ke saluran pendingin.



**Gambar 2.6** Letak pelat bipolar (*field flow plate*) pada PEM *fuel cell*.<sup>[7]</sup>

Agar pelat bipolar mampu menjalankan semua fungsi tersebut, maka dibutuhkan material yang tepat. Sifat-sifat material pelat bipolar yang ideal disajikan pada tabel berikut ini:

**Tabel 2.2** Sifat material yang dibutuhkan untuk pelat bipolar ideal. <sup>[2]</sup>

Parameter	Nilai Standar
Muatan Konduktivitas	$>10^4$ S/m
Kekuatan	Mampu bertahan dari tekanan 200 psi
Bobot	Maksimum 200 gr per pelat
Volume	1 L/kW/stack
Biaya	$< \$ 0,0045/\text{cm}^2$
Kerapatan Arus <i>Decay</i>	$< 10\%$ per 5000 jam operasi
Daya Tembus ( <i>permeability</i> )	Maksimum kebocoran $\text{H}_2$ $10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s-cm}^2$
Korosi	$8 \times 10^{-7} \text{ mol/cm}^2$ per 5000 jam atau $0,0016 \text{ mA/cm}^2$ per 5000 jam

### 2.1.2.2 Material Pelat Bipolar

Ada berbagai jenis material yang dapat digunakan untuk material pelat bipolar, seperti; logam dengan atau tanpa pelapisan, grafit, komposit karbon/polimer, komposit karbon/karbon. Pelat logam sering dilapisi dengan lapisan antikorosi pada permukaannya, sementara pelat grafit diimpregnasi dengan *sealant treatment* untuk mengurangi daya tembus gas. Berbagai penelitian terbaru telah dilakukan untuk membuat pelat bipolar yang murah, ringan, dan berdaya guna, sehingga dapat menggantikan pelat grafit yang harganya masih mahal. [2]

**Tabel 2.3** Sifat-sifat material untuk pelat bipolar PEM *fuel cell* <sup>[7]</sup>.

Jenis Material	Sifat-Sifat
Grafit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diimpregnasi dengan polimer</li> <li>- Konduktivitas tinggi</li> <li>- Getas dan tebal</li> <li>- Biaya untuk membuat saluran alir mahal</li> </ul>
Logan atau	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Stainless steel</i>, paduan Ni-Cr, paduan Al, baja Ti</li> </ul>



Paduan Logam	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konduktivitas tinggi</li> <li>- Masalah korosi</li> <li>- Biaya untuk membuat saluran alir mahal</li> </ul>
Komposit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Komposit polimer-karbon</li> <li>- Komposit karbon/karbon</li> <li>- Ringan dan murah</li> <li>- Konduktivitas rendah dibanding grafit dan logam</li> </ul>
Plastik Konduktif	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Polimer cair kristalin (<i>liquid crystal polymer</i>)</li> <li>- Konduktivitas relatif rendah</li> </ul>

### 2.1.2.3 Pelat Bipolar Komposit Polimer-Karbon

Material baru untuk pelat bipolar yang mampu mengurangi bobot *fuel cell* sangatlah diperlukan. Saat ini, komposit bermatriks polimer sudah banyak diteliti untuk digunakan sebagai material pelat bipolar karena komposit polimer-karbon lebih murah dan lebih ringan bila dibandingkan material seperti baja, aluminium, dan grafit. Kemampuan proses juga menjadi sebuah persoalan yang penting untuk produksi massal pelat bipolar. Oleh karena itu, komposit polimer-karbon menjadi alternatif menarik dari pelat bipolar logam atau grafit. Idealnya, pelat komposit harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut: [2]

- Konduktivitas yang tinggi (100 S/cm);
- Daya tembus (*permeability*) hidrogen harus sama atau di bawah rentang daya tembus membran penghantar ion;
- Sifat-sifat mekanik yang baik;
- Stabilitas panas saat kondisi kerja *fuel cell* (-40 sampai 120 °C untuk *fuel cell* penggerak kendaraan bermotor);
- Kerapatan massa yang rendah;
- Stabilitas kimia dalam kondisi kontak dengan bahan bakar, oksidan, dan air yang mungkin sedikit bersifat asam (korosi < 16  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ );
- Tahan korosi;
- Daya tembus yang rendah terhadap bahan bakar dan oksidan (daya tembus gas  $\text{H}_2 < 2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{scm}^2$ )

- Muai panasnya rendah;
- Dapat ditiru ulang, secara khusus mampu meniru ulang saluran alir yang dimanufaktur pada pelat dalam toleransi teknik;
- Mudah diselesaikan untuk dapat diterima standar kualitas;
- Dapat didaur ulang.

Melalui pemilihan matriks polimer yang tepat, komposit polimer-karbon dapat memberikan sifat inert terhadap bahan kimia dan keketatan terhadap gas. Polimer termoplastik dan termoset dapat dipilih menjadi matriks komposit dengan ditambahkan bahan pengisi konduktif, seperti; karbon hitam, serat karbon, grafit, dan partikel logam. Mesin cetak tekan (*compression molding*) dan cetak injeksi (*injection molding*) digunakan untuk memfabrikasi pelat bipolar dengan saluran alir pada permukaan pelatnya. Pemilihan metode proses yang tepat dapat mengurangi biaya produksi pelat bipolar.

## 2.2 KOMPOSIT

Komposit adalah gabungan antara bahan matrik atau pengikat yang diperkuat. Bahan material ini terdiri dari dua bahan penyusun, yaitu bahan utama sebagai bahan pengikat dan bahan pendukung sebagai pengisi. Bahan utama membentuk matrik di mana bahan pengisi ditanamkan di dalamnya. Bahan pengisi dapat berbentuk serat, partikel, serpihan atau juga dapat berbentuk yang lain. <sup>[20]</sup> Dimana dalam penelitian ini, matriks yang digunakan dapat digolongkan sebagai *Polymer Matrix Composites* (PMC), atau lebih detailnya lagi, digolongkan dalam komposit berpengisi serbuk karbon atau *Polymer Carbon Composite*.

Untuk memperoleh sifat bahan komposit seperti yang diinginkan, langkah pertama yang perlu diperhatikan adalah mengetahui sifat dari bahan matrik. Dari pengetahuan tentang sifat-sifat bahan matrik inilah dapat dipilih material apa yang harus diisikan pada bahan matrik untuk memperbaiki karakteristik matriks. <sup>[21]</sup> Pada dasarnya, matrik meneruskan tegangan yang diberikan kepada partikel pengisi sehingga ketahanan bahan komposit semakin bertambah

### 2.2.1 Komposit Bermatriks Polimer (*Polymer Matrix Composite*)

Komposit Bermatriks Polimer atau *Polymer Matrix Composite* (PMC) merupakan jenis komposit yang menggunakan material polimer sebagai matriks pengikat. Matriks dapat diartikan sebagai konstituen paling besar dalam komposit dan sebagai karakteristik dasar yang mempunyai fungsi sangat penting.<sup>[21]</sup> Matriks merupakan suatu fasa kontinu yang berada dalam material komposit yang mengikat pengisi dengan tidak terjadi ikatan secara kimia. Matriks juga berfungsi sebagai pentransfer *stress* (tegangan) dari suatu fasa ke fasa yang lain agar *stress* tidak terpusat di satu titik sehingga beban yang dialami oleh material akan terdistribusi secara merata, dan memproteksi fasa tersebut dari lingkungannya akibat beban kejut (*shock*), dan lain sebagainya.

Untuk memperoleh sifat bahan komposit seperti yang diinginkan, langkah pertama yang perlu diperhatikan adalah mengetahui sifat dari bahan matrik. Dari pengetahuan tentang sifat-sifat bahan matrik inilah dapat dipilih material apa yang harus diisikan pada bahan matrik untuk memperbaiki karakteristik matriks.<sup>[21]</sup> Pada dasarnya, matrik meneruskan tegangan yang diberikan kepada partikel pengisi sehingga ketahanan bahan komposit semakin bertambah.

Tujuan dibentuknya komposit berbasis matriks dari polimer umumnya adalah untuk memperoleh produk dengan ketangguhan yang tinggi dan relatif lebih ringan. Tujuan umum lainnya adalah alasan manufaktur, yaitu biaya pembuatan yang relatif lebih rendah, dapat diproduksi secara massal, mudah dibentuk dan memiliki kemampuan *machinability* yang baik.<sup>[22]</sup>

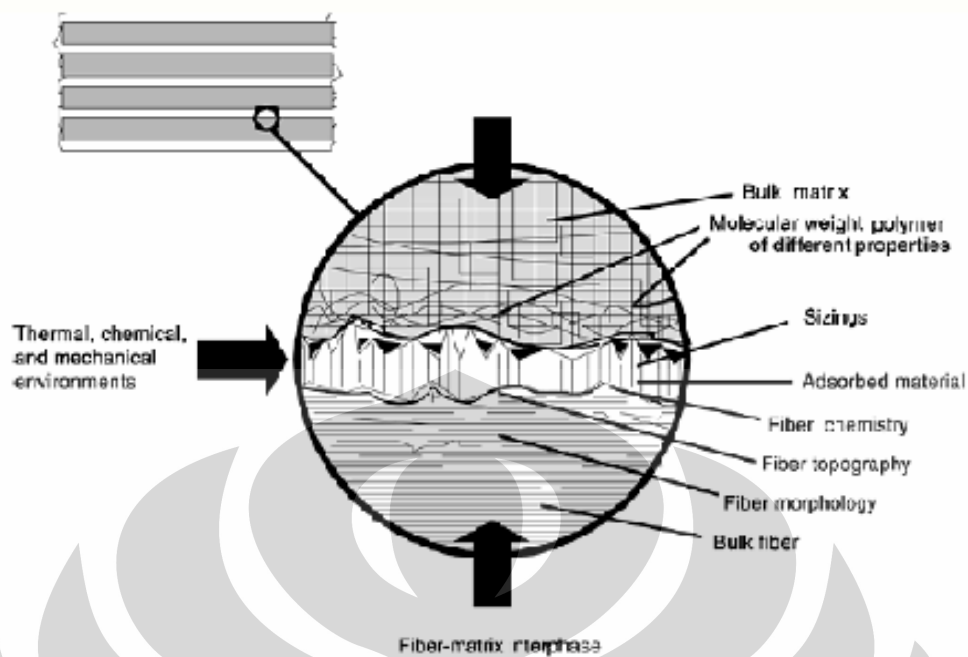
### 2.2.2 Interface (antarmuka) dan Interphase (antafasa) pada Komposit

Definisi umum dari antarmuka pada komposit serat adalah sebuah permukaan yang terbentuk oleh suatu batas bersama antara serat penguat dan matriks yang bersentuhan dengan ikatan di antara keduanya dan mempertahankan ikatan tersebut terhadap transfer beban<sup>[20]</sup>. Ikatan yang terjadi pada antarmuka matriks dan serat terbentuk saat permukaan penguat telah terbasahi oleh matriks<sup>[21]</sup>. Antarmuka yang ada pada komposit berfungsi sebagai penerus beban antara matriks dan penguat<sup>[24]</sup>. Perilaku perpatahan pada komposit juga bergantung pada

kekuatan antarmuka. Antarmuka yang bersifat lemah akan menghasilkan kekuatan dan kekakuan yang rendah. Sedangkan, antarmuka yang bersifat kuat akan menghasilkan kekuatan dan kekakuan yang tinggi <sup>[21]</sup>.

Konsep dua dimensi dari antarmuka lebih lanjut menjadi tiga dimensi yang sering disebut antarfasa, yaitu fasa antar matriks dan serat dengan ketebalan tertentu di mana sifat fisik, kimia, dan morfologinya berbeda dari bagian terbesar material (bulk material)-nya. Antarfasa merupakan daerah dimana bagian dari matriks yang dipengaruhi oleh adanya penguat, sehingga dengan adanya penguat dengan sifat fisik dan kimia yang dimilikinya akan merubah bentuk lokal dari matriks pada daerah antarfasa. Karena perubahan mikrostruktur seringkali mengakibatkan perubahan sifat mekanis, maka kehadiran antarfasa ini dapat memberikan pengaruh yang besar terhadap sifat dari komposit <sup>[23]</sup>.

Ketika matriks dan permukaan serat saling bersentuhan, ikatan kimia dan fisika dapat terbentuk pada antarmuka. Gugus kimia permukaan penguat dapat bereaksi dengan gugus kimia yang ada pada matriks, yang dapat membentuk ikatan kimia maupun ikatan fisika; gaya Van der Waals, ikatan hidrogen, dan ikatan elektrostatik. Jenis dan banyaknya dari masing-masing ikatan tersebut secara kuat mempengaruhi daya ikat antara matriks serat. Sifat fisik dan kimia yang dimiliki oleh penguat dapat merubah bentuk lokal dari matriks di dalam daerah antarfasa. Gambar 2.7 dibawah ini menunjukkan karakteristik yang berbeda dari masing-masing daerah yang ada.



Gambar 2.7 Karakteristik Komposit [23]

### 2.2.3 Termodinamika Pencampuran

Jika dua buah polimer digabungkan hasil yang paling sering terjadi adalah jika dalam suatu sistem terjadi pemisahan fasa secara sempurna akibat dari reaksi penolakan diantara kedua komponen (akibat dari ketidakcocokan kimia antara kedua buah polimer).<sup>[23]</sup> *Miscibility* yang sempurna antara pencampuran dua buah polimer memerlukan kondisi sebagai berikut untuk terpenuhi terlebih dahulu:

$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m < 0$  (2.16) Dimana secara berurutan  $\Delta G_m$ ,  $\Delta H_m$ , dan  $\Delta S_m$  adalah Gibb's free energy, enthalpy dan entropy pencampuran pada saat temperature  $T$  tertentu. *Miscible polymer blend* adalah *polymer blend* yang homogen hingga sampai e tingkat molekul dinyatakan dengan nilai negative dari free energy of mixing ( $\Delta G_m$ ). Nilai dari  $T\Delta S_m$  selalu positif karena terjadi peningkatan pada entropy pada proses pencampuran<sup>[21]</sup>. Dalam hal ini nilai dari  $\Delta G_m$  aselalu bergantung pada nilai dari *enthalpy* pencampuran  $\Delta H_m$ . Pasangan polimer bercampur membnttuk fasa tunggal hanya jika besarnya energi entropi lebih besar dari *enthalpy*  $\Delta H_m < T\Delta S_m$  (2.17)

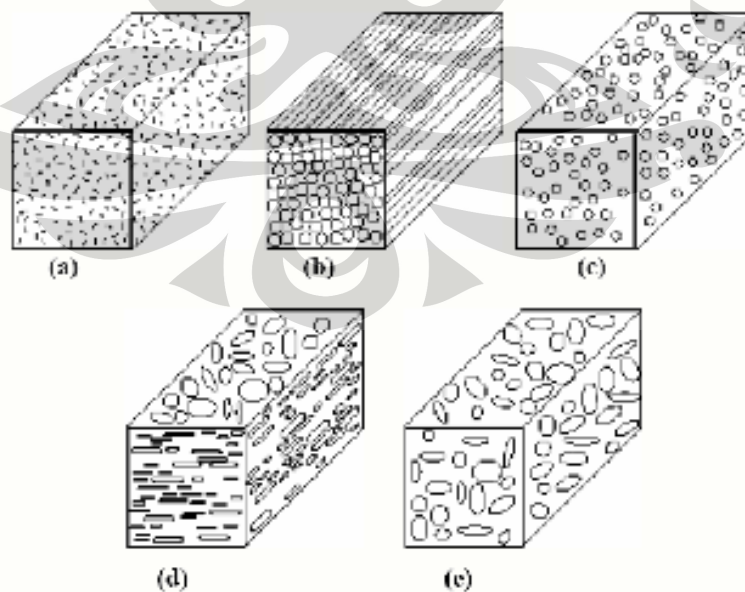
Campuran yang *miscible* dari polimer amorf hanya memiliki satu fasa dan sifatsifatnya dapat secara mudah ditentukan berdasarkan sifat-sifat komponen

penyusunnya. Sedangkan campuran yang *miscible* dari polimer-polimer yang dapat terekristalisasi, sifat-sifatnya tergantung pada keadaan kristalisasi komponen penyusunnya, yang tentunya pada sejarah termal yang telah dialami. Begitu pula yang terjadi pada polimer-*clay* nanokomposit, struktur komposit meliputi *properties* yang dihasilkan sangat dipengaruhi *miscibility* diantar keduanya (interkelasi/eksfoliasi), selanjutnya upaya peningkatan *miscibility* diusahakan dengan memilih konstituen (*compatibilizer*) dari segi kepolaran yang sesuai, *solubility parameter*, viskositas atau tegangan permukaan.

Skematis dari antarfasa matriks serat dan beberapa faktor yang berpengaruh terhadap pembentukannya disebabkan oleh:

### 2.2.3.1 Pengaruh jumlah fraksi volume penguat terhadap sifat komposit

Untuk menentukan karakteristik dari komposit yang ingin dibuat, faktor utama yang harus dipertimbangkan adalah perbandingan matrik dan pengisi. Perbandingan ini dapat ditunjukkan dalam bentuk fraksi volume pengisi ( $V_f$ ) untuk menghitung nilai kekuatan komposit secara total. Umumnya penambahan pengisi bertujuan untuk meningkatkan kekuatan sehingga semakin banyak fraksi volum pengisi yang digunakan maka kekuatan komposit akan semakin tinggi.



**Gambar 2.8 Klasifikasi komposit berdasarkan bentuk penguat :**  
(a) komposit berpenguat serat acak/serat pendek,

- (b) komposit berpenguat serat kontinu/serat panjang,
- (c) komposit partikulat,
- (d) komposit serpihan,
- (e) komposit berpengisi [25].

Dalam hal ini, dianggap performa komposit optimum sehingga arah serat diasumsikan terorientasi sama secara longitudinal.

Jika komposit diberikan beban (*stress*) sampai mengalami regangan yang sama besar antara matrik dengan pengisi (*isostrain*), maka besar pembebanan yang dibutuhkan adalah sebesar pembebanan yang harus dilakukan pada matriks terhadap fraksi volumenya dan pembebanan yang harus dilakukan pada pengisi terhadap fraksi volume pengisi tersebut.[9] Hal ini dapat dirumuskan menjadi:

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

Untuk mempermudah analisis kekuatan suatu komposit, ikatan serat dan matrik diasumsikan terjadi secara sempurna. Pergeseran antara serat dan matriks dianggap tidak ada dan deformasi serat sama dengan deformasi matrik. Hal ini dapat dirumuskan dengan  $\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$ . Sehingga pembebanan terhadap komposit secara total dapat dituliskan dengan persamaan:

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} V_f \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

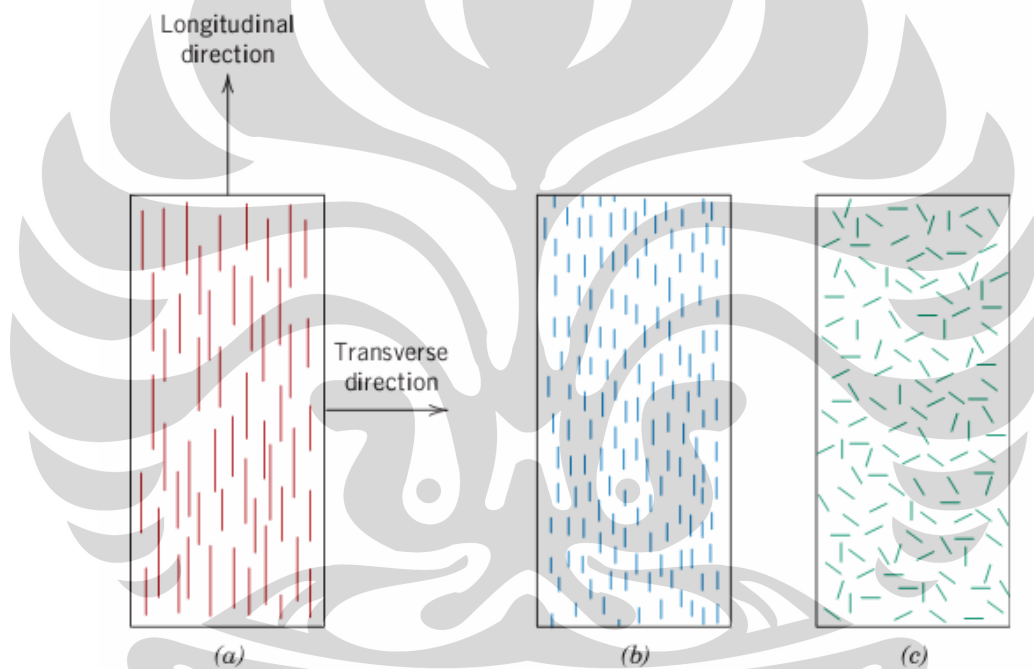
Dimana,  $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$  nilai sehingga persamaannya menjadi:

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Berdasarkan persamaan ROM tersebut, dapat dilihat bahwa fraksi volume pengisi berbanding lurus dengan kekuatan komposit secara total. Nilai K,  $E_f$ , dan  $E_m$  merupakan konstanta tetap, sedangkan nilai  $V_m = (1 - V_f)$ . Oleh sebab itu, jika pengisi bersifat menguatkan, maka semakin besar nilai fraksi volume pengisi akan membuat kekuatan komposit secara total akan meningkat.

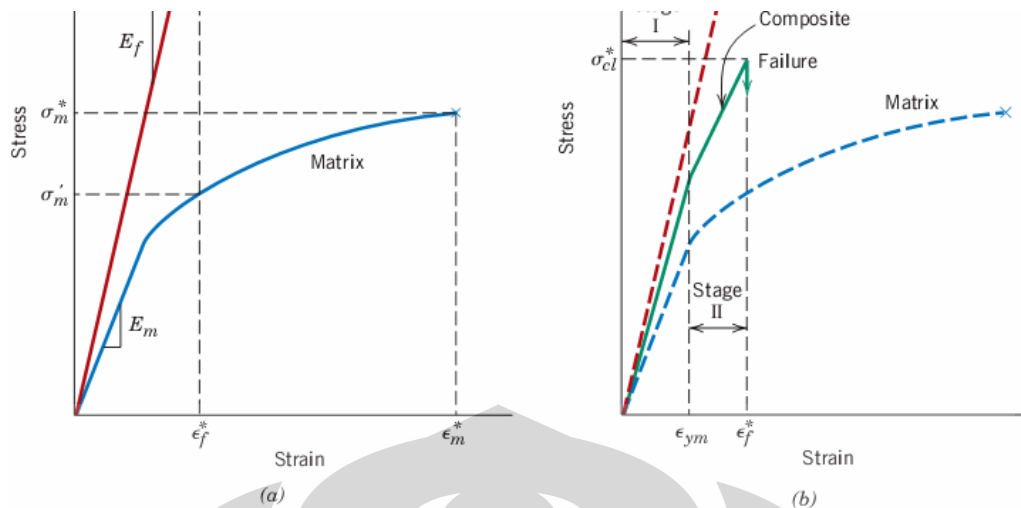
### 2.2.3.2 Sifat Mekanik

Faktor utama yang harus dipertimbangkan dalam menentukan karakteristik komposit yang ingin difabrikasi adalah perbandingan jumlah antara matriks dan pengisi. Perbandingan ini dapat ditunjukkan dalam bentuk fraksi volume pengisi ( $V_f$ ) untuk menghitung nilai kekuatan komposit secara total. Umumnya penambahan pengisi bertujuan untuk meningkatkan kekuatan, semakin banyak fraksi volume pengisi yang ditambahkan maka kekuatan komposit akan semakin tinggi. Dalam hal ini performa komposit dianggap optimum, sehingga arah serat diasumsikan terorientasi sejajar pada arah longitudinal.



**Gambar 2.9** Orientasi pengisi pada komposit berpenguat serat: (a) panjang dan searah, (b) pendek dan searah, (c) pendek dan acak. <sup>[26]</sup>.





**Gambar 2.10** (a) Kuva tegangan-regangan untuk material serat getas dan matriks ulet. Perpatahan akibat tegangan dan regangan pada kedua material tidak terjadi. (b) Kurva tegangan-regangan untuk komposit berpenguat serat pada pembebanan tegangan searah penjumlahan (arah longitudinal). [26].

### 2.3 POLIMER

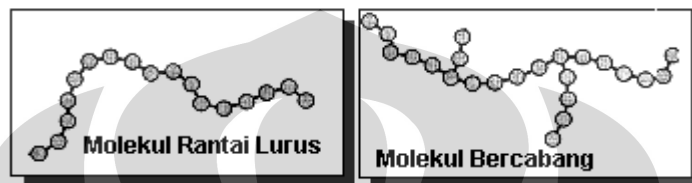
Polimer (polymer) berasal dari bahasa Yunani yaitu Poly (banyak) dan mer (partikel/molekul). Polimer adalah molekul besar (makromolekul) yang dibangun oleh pengulangan unit kimia yang kecil dan sederhana (*mer*). Unit yang diulang dapat sama atau hampir sama dengan *monomer*, yaitu material awal pembentuk polimer. Pengulangan ini akan terus terjadi hingga menjadi seperti rantai disebut rantai polimer. Istilah “Plastik” diartikan sebagai polimer (dengan rantai yang sangat panjang) yang diproses baik dalam keadaan plastic maupun soft yang memiliki kemampuan alir dan juga dibentuk.

Pada dasarnya, polimer dibagi atas polimer alamiah dan polimer sintesis. Polimer alamiah yaitu polimer yang langsung diambil dari tumbuh-tumbuhan dan hewan. Polimer jenis ini telah dimanfaatkan manusia selama berabad-abad seperti karet, kayu, kapas, wol dan kulit. Selain itu, terdapat pula polimer alamiah yang sangat diperlukan dalam proses-proses biologis dan fisiologis tumbuh-tumbuhan dan hewan, seperti protein, enzim dan selulosa. Sedangkan polimer sintesis merupakan polimer hasil buatan manusia. Saat ini hampir seluruh peralatan manusia, baik sebagian atau seluruhnya terbuat dari polimer sintesis.

Polimer diklasifikasikan sehubungan dengan struktur makromolekul dan macam mekanisme ikatan di dalamnya. Kategori polimer adalah Termoplastik, Termoset, dan Elastomer.

#### 1. Termoplastik

Polimer terdiri dari makromolekul dengan rantai linear atau bercabang, yang menyatu bersama dalam ikatan antar molekul yang disebut termoplastik.



**Gambar 2.11.** Bentuk molekul rantai polimer

Termoplastik akan melunak (softening) jika dipanaskan sehingga akan melemahkan tenaga antar molekul yang kemudian mudah untuk dicetak. Dibedakan dengan polimer lain, produk termoplastik yang telah dicetak dapat dipanaskan kembali untuk dicetak lagi (berulang).

#### Termoplastik Amorf

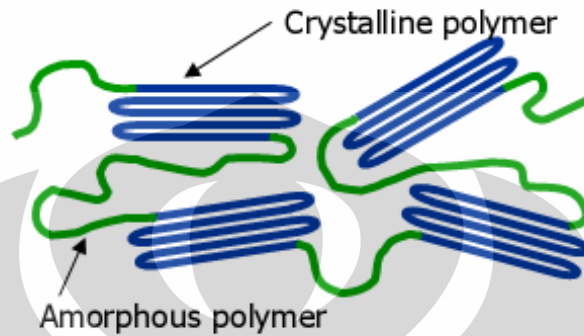
Polimer dengan banyak rantai molekul cabang dan dengan rantai samping yang panjang tidak dapat dikompakkan karena struktur yang tidak teratur. Rantai molekul-molekul ini bersaling-silang melilit seperti benang kusut. Plastik yang tidak terstruktur disebut termoplastik amorf.



**Gambar 2.12** Rantai polimer amorf<sup>[4]</sup>

## Termoplastik Semikristalin

Hanya sebagian tertentu dari rantai molekul yang tersusun dalam susunan yang rapat, padat dan teratur. Sedang sebagian lain tetap dalam keadaan saling-silang dan melilit. Termoplastik yang memiliki bagian kristalin dan amorf disebut termoplastik semikristalin.



**Gambar 2.13** Rantai polimer semikristalin <sup>[4]</sup>

Perbedaan antara termoplastik amorf dan kristalin dapat dilihat pada tabel berikut:

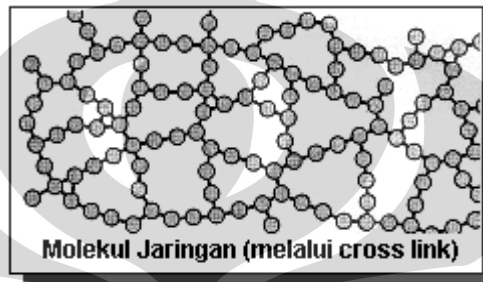
**Tabel 2.4.** Sifat dan struktur dari polimer amorf dan kristalin <sup>[28]</sup>

	<b>Amorf</b>	<b>Kristalin</b>
Contoh material	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ ABS</li> <li>➤ Acrylics</li> <li>➤ Polycarbonate (PC)</li> <li>➤ Polystyrene (PS)</li> <li>➤ Polyvinyl Chloride (PVC)</li> <li>➤ Styrene Acrylonitrile (SAN)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Acetals</li> <li>➤ Nylons</li> <li>➤ Polyethylene (PE)</li> <li>➤ Polypropylene (PP)</li> <li>➤ Thermoplastic Polyester (e.g. PBT, PET)</li> </ul>
Mikro struktur	Orientasi molekul acak dalam fase solid maupun liquid	Orientasi molekul acak pada saat fase liquid, tetapi terbentuk kristalit-kristalit padat saat fase solid
Reaksi terhadap panas	Meleleh pada rentang temperatur tertentu (tidak ada temperatur leleh yang jelas)	Ada temperatur leleh yang jelas
Sifat-sifat umum	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Transparan</li> <li>➤ Ketahanan kimia buruk</li> <li>➤ Volumetric shrinkage rendah saat molding</li> <li>➤ Umumnya kurang kuat</li> <li>➤ Viskositas melt umumnya tinggi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Translucent atau opaque</li> <li>➤ Ketahanan kimia sangat baik</li> <li>➤ Volumetric shrinkage tinggi saat molding</li> <li>➤ Umumnya kuat</li> <li>➤ Viskositas melt umumnya</li> </ul>

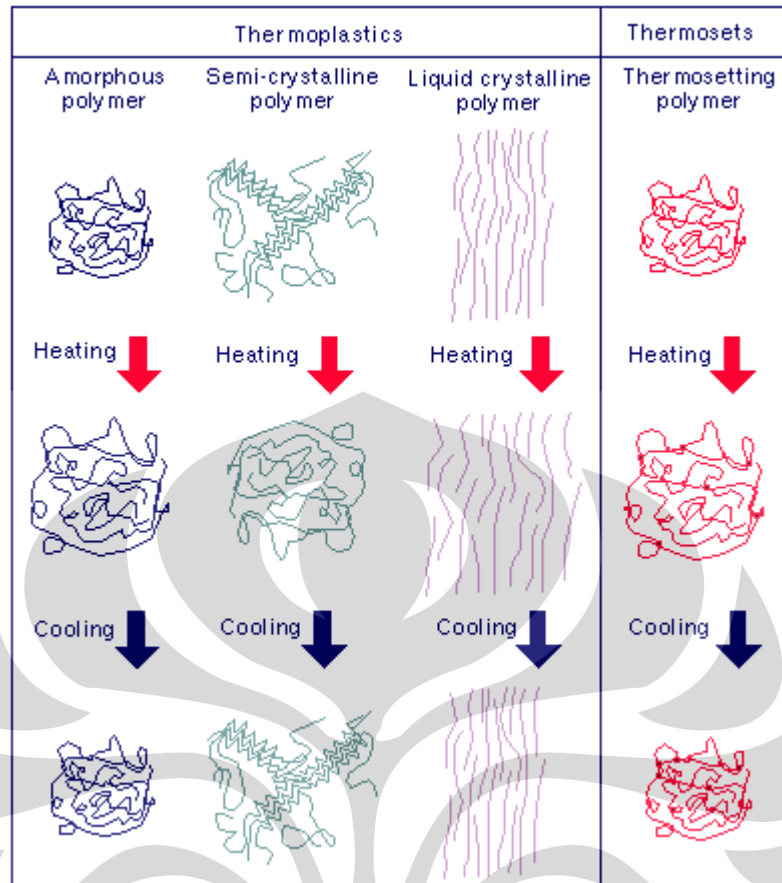
	➤ Heat content lebih rendah	rendah
		➤ Heat content lebih tinggi (dengan panas dari kristalisasi)

## 2. Termoset

Polimer yang mempunyai struktur ikat silang yang rapat (jauh lebih banyak dan rapat daripada elastomer).



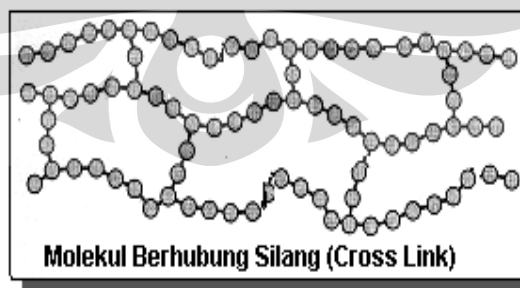
**Gambar 2.14.** Ikatan silang pada termoset <sup>[28]</sup>



Gambar 2.15. Struktur rantai polimer<sup>[4]</sup>

### 3. Elastomer

Rantai molekul dari elastomer mempunyai sedikit jumlah ikat silang dan tersusun secara acak(ketidakteraturan)



Gambar 2.16. Ikatan silang pada elastomer<sup>[28]</sup>

Termoset dan elastomer dikategorikan sebagai polimer ikat silang (cross link) karena setiap individunya dihubungkan dengan ikatan penghubung

(transverse bond). Pada suhu ruang, molekul yang mempunyai banyak cross link akan sangat keras (hardness) tetapi mudah patah (brittle) yaitu sensitif terhadap beban kejut (impact). Seperti halnya elastomer, termoset tidak meleleh jika dipanaskan karena banyaknya cross link.

Polimer kristalin umumnya terdiri dari kristal-kristal yang membaaur dengan struktur amorf. Polimer dapat membentuk kristal apabila memiliki struktur rantai atau segmen rantai yang bergabung sangat dekat sehingga gaya Van der Waals dapat memainkan peran, dan tidak terbentuk bulk dalam rantai harus tidak bersifat polar. Polimer mengkristal pada suhu tertentu ketika segmen-segmen rantai molekul mencapai posisi lurus dalam gerakan yang tidak beraturan. Di sini suhu memegang peran sangat penting, dan kecepatan kristalisasi akan menentukan besarnya ukuran kristal.

Berdasar uraian diatas kita temukan plastik jenis thermoplastik, thermoset dan elastomer.

**Tabel 2.5** Jenis plastik beserta contohnya <sup>[28]</sup>

Jenis Plastik	Contoh
Thermoplastik	polietilen, polipropilen, polistiren, polivinil khlorida, ABS, nilon, poliester, polikarbonat.
Thermoset	epoxy resin, alkyd resin, UF, MF, PF, unsaturated poliester.
Elastomer	karet alam dan sintesis.

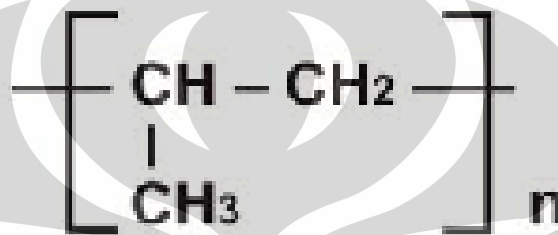
## 2.4 POLIPROPILEN

Polipropilen (PP) adalah bagian dari keluarga polyolefin dan termasuk kelompok termoplastik karena material ini dapat mengalami perlakuan panas dan tekanan yang berulang kali tanpa mengalami perubahan sifat. Aplikasinya yang luas dalam kehidupan kita sehari – hari dikarenakan keunggulan – keunggulan yang dimiliki PP dibanding plastik lainnya dalam hal kombinasi sifat-sifat listrik,

ketahanan panas, kekakuan, ketangguhan, ketahanan kimia, stabilitas dimensi, kilap permukaan dan melt flow dengan harga yang relatif lebih murah.

Diantara semua komoditi plastik, PP merupakan plastik teringan. Densitasnya yang rendah (specific mass of 0.9) memberikan keuntungan dalam kebutuhan material yang lebih sedikit untuk menghasilkan suatu part dibandingkan plastik lainnya<sup>[27]</sup>.

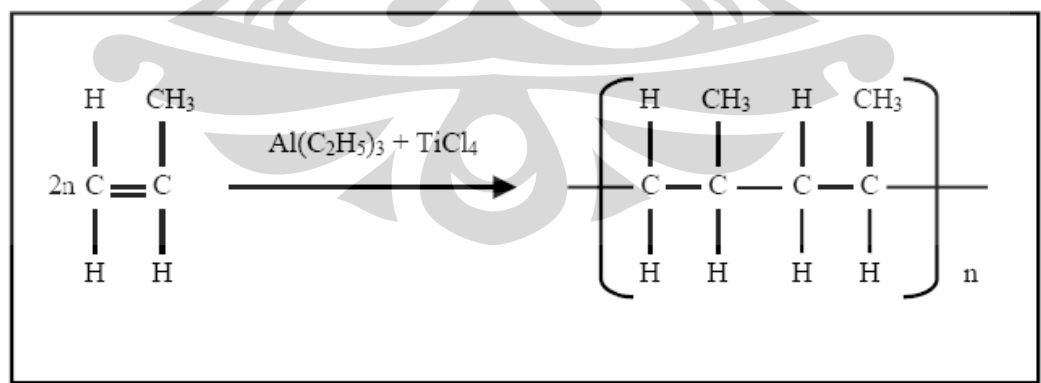
PP merupakan polimer hidrokarbon linier dengan struktur kimia yang terdiri atas rantai-rantai molekul dari sejumlah monomer propilen:



**Gambar 2.17.** Struktur molekul monomer propilen<sup>[27]</sup>

Proses polimerisasi terhadap propilen dapat dilakukan berkat penemuan sistem katalis Ziegler-Natta pada tahun 1954. Dengan melakukan polimerisasi propilen pada temperatur 70-80<sup>0</sup> C, tekanan 100 atm dan katalis campuran Titanium tetrachloride (TiCl<sub>4</sub>) dan Alumuniumtriethyl chloride Al(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>, maka akan diperoleh polimer polipropilen seperti ditunjukkan pada gambar 2.17 diatas.

Reaksi polimerisasi propilen menjadi polipropilen<sup>[27]</sup>.



**Gambar 2.18** Struktur Monomer Propilen menjadi Polypropilene.<sup>[27]</sup>

PP digolongkan sebagai polimer semikristalin, sehingga sifat fisik dan mekaniknya dipengaruhi oleh derajat kristalinitasnya. Kenaikan kristalinitas akan meningkatkan sifat kekuatan tarik (tensile strength) dan kekakuan namun menurunkan ketangguhannya.

Adanya kelompok metil ( $\text{CH}_3$ ) pada propilen menyebabkan terjadinya sedikit kekakuan rantai dan dapat mengganggu kesimetrisan molekulnya. Hal tersebut menyebabkan PP mengalami kenaikan suhu  $T_g$  (glass temperature), kekakuan yang lebih dan  $T_m$  (melting point temperature) mencapai  $170^\circ\text{C}$ . Di lain pihak, kehadiran ikatan tersier (tertiary carbon) di rantai utama mengakibatkan tingginya sensitivitas PP atau lemah terhadap reaksi oksidasi, environmental exposure, atau pada temperatur tinggi<sup>[27]</sup>.

#### 2.4.1 Struktur Polipropilen

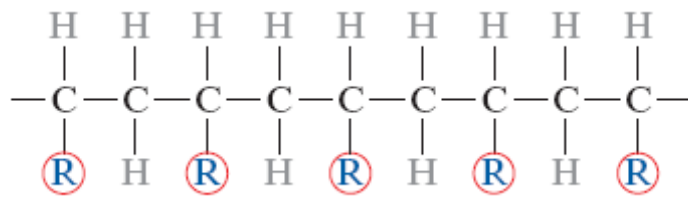
Kristalisasi dari rantai makromolekul merupakan faktor yang menentukan dalam pembentukan morfologi polipropilen. Salah satu parameter terpenting dalam menentukan derajat kristalisasi adalah keteraturan (stereogularitas).

Gambar 2.22 menunjukkan struktur polipropilen yang dibedakan menjadi 3 macam struktur<sup>[4]</sup> yaitu:

##### 1) Isotaktik

Pada isotaktik, seluruh grup metil terletak disisi yang sama pada rantai karbon. Polimer komersial biasanya mengandung  $> 95\%$  isotaktik. Bentuk isotaktik adalah bentuk yang paling biasa dan bersifat kaku dengan kristalinitas yang tinggi serta titik lebur yang tinggi pula. Dalam polimer komersial, makin tinggi isotaktiknya, makin tinggi pula kristalinitas serta kekuatan tarik, modulus dan kekerasannya sedangkan sifat-sifat struktur lainnya tetap. Dengan keteraturan gugus metil ini, maka rantai polimer dapat dikemas lebih padat sehingga menghasilkan plastik yang tahan panas dan kuat.

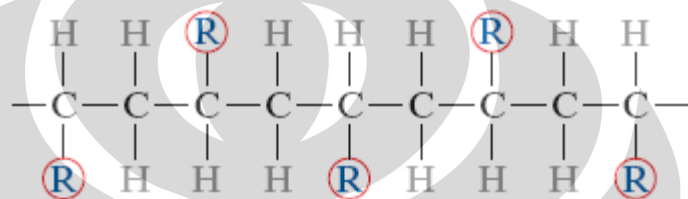




**Gambar 2.19** Isotaktik <sup>[27]</sup>

## 2) Sindiotaktik

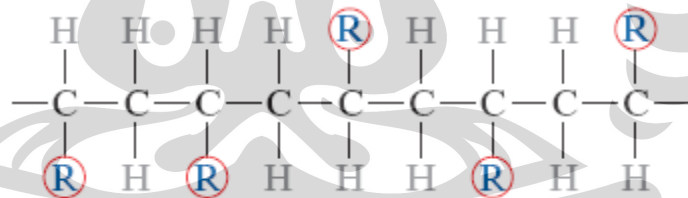
Pada sindiotaktik, grup metil terletak berselang-seling pada sisi yang berbeda.



**Gambar 2.20.** Sindiotaktik <sup>[27]</sup>

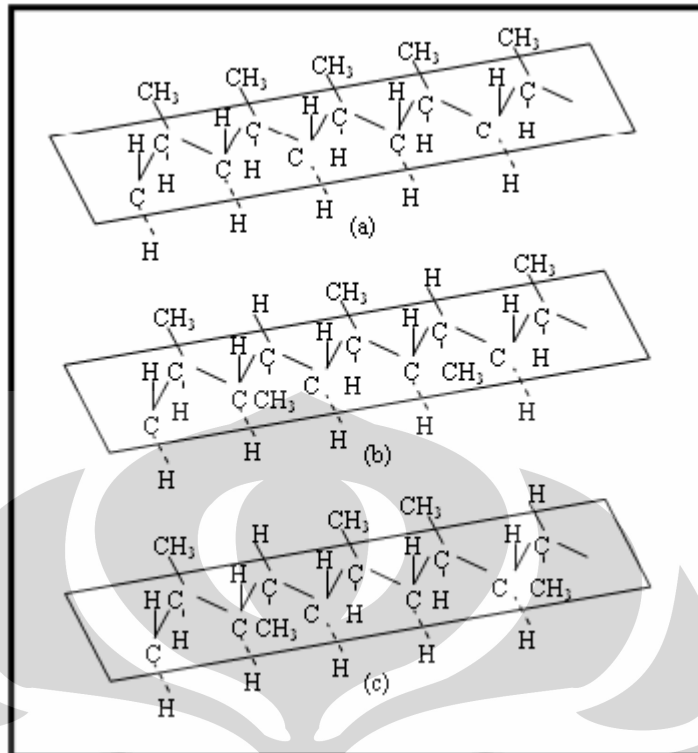
## 3) Ataktik

Pada ataktik, grup metil terletak acak. Memiliki kristalinitas yang rendah. Apabila PP dalam keadaan seluruhnya ataktik, maka bersifat amorf. Wujud fisiknya antara karet dan lilin.



**Gambar 2.21** Ataktik <sup>[27]</sup>

Secara keseluruhan bila dilihat dari atas struktur Propililene:



**Gambar 2.22.** Struktur Polipropilen (a) isotaktik, (b) sindiotaktik, (c) ataktik.

#### 2.4.2 Sifat Polipropilen

Umumnya, polimer dengan berat molekul yang lebih tinggi akan memiliki sifat-sifat fisik yang lebih baik namun kemampuan prosesnya relatif buruk. Sebaliknya, berat molekul yang lebih rendah akan menurunkan sifat – sifatnya namun meningkatkan kemampuan prosesnya. Untuk mengatasi hal ini, biasanya dilakukan perlakuan khusus terhadapnya, misalnya dengan visbreaking, yaitu semacam degradasi kimia, misalnya dengan peroksida, guna menurunkan berat molekul dengan melakukan pemutusan rantai polimer, yang tentunya akan mempertajam pula distribusi berat molekulnya. Polimer hasil perlakuan ini memiliki kombinasi antara sifat-sifat fisik dan kemampuan proses yang baik.

Berikut ini adalah beberapa karakteristik dan keterbatasan dari PP<sup>[27]</sup> :

Karakteristik:

- ⌚ Kejernihan.
- ⌚ Ketahanan moisture / air yang sangat baik. Hal ini dikarenakan ikatan hidrokarbon yang menyebabkan PP menjadi non-polar.

- ⌚ Ketahanan kimia yang baik terhadap hidrokarbon, alkohol dan reagen non-oksidasi.
- ⌚ Kekuatan impak yang baik.
- ⌚ Tidak beracun.

Keterbatasan:

- # Kekuatan impak yang lemah pada temperatur rendah.
- # Mudah terdegradasi oleh sinar UV.
- # Mudah terbakar.
- # Mudah terserang pelarut klorin dan senyawa aromatik.
- # Sulit berikatan.
- # Mudah teroksidasi.

### 2.4.3 Viscoelastik

Karakteristik umum polimer yang juga merupakan karakteristik PP adalah sifat viskoelastis, yaitu perpaduan antara sifat elastis dan kental (*viscous*). Bahan yang bersifat viskoelastik dapat mengalami pemelaran dengan relaksasi tegangan. Apabila suatu polimer dikenai suatu beban, perpanjangan yang terjadi tidak selalu sebanding dengan beban. Pada saat beban diturunkan, sebagian regangan hilang, namun sebagian lagi tidak kembali ke asal. Sifat-sifat fisik dari polimer dipengaruhi oleh sifat viskoelastisitas.<sup>[14]</sup> Dalam pengamatan mekanik polimer, hal-hal yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut:

1. Sifat viskoelastisitas polimer menyebabkan polimer dapat mengalami pemuluran dan juga relaksasi tegangan.
2. Pada temperatur yang tinggi, banyak polimer yang ketahanannya rendah.
3. Pada pemanasan, regangan sisa pada saat pencetakan dapat menyebabkan polimer retak.
4. Dalam pelarut, minyak dan air yang mengandung surfaktan, beberapa polimer memiliki ketahanan yang baik dalam waktu yang pendek.

5. Reologi adalah ilmu pengetahuan yang mempelajari deformasi dan sifat aliran suatu bahan. Dalam dunia industri, kontrol terhadap aliran sangat penting pada hampir seluruh proses dan operasi. Beberapa istilah yang penting dalam reologi adalah <sup>[6,15]</sup>:

⌚ Tegangan geser, yaitu gaya persatuan luas yang bekerja secara tangensial pada cairan yang mengakibatkan terjadinya aliran geser (shear flow).

$$\tau = F/A \dots\dots\dots (2.5)$$

dimana,  $\tau$  = tegangan geser (N/m<sup>2</sup>) atau )Pa)

F = gaya (N)

A = luas area (m<sup>2</sup>)

⌚ Laju geser, yaitu perubahan kecepatan alir terhadap jarak pada arah aliran.

$$\gamma = dv/dx \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana,  $\gamma$  = laju geser (s<sup>-1</sup>)

dv = kecepatan (satuan jarak/s)

dx = jarak (satuan jarak)

Viskositas, yaitu ketahanan material terhadap aliran pada tegangan mekanik tertentu. Viskositas dinyatakan dalam g/cm.s atau poise.

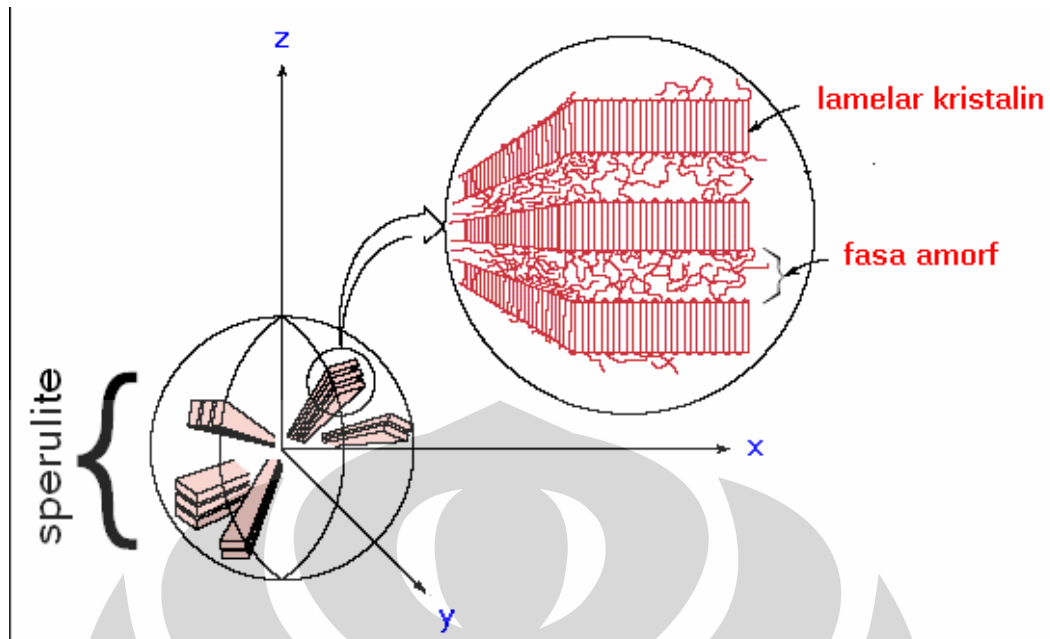
#### 2.4.4 Kritalisasi dan Nukleasi

Keunikan dari polimer semi-kristalin adalah sifat termalnya karena memiliki dua temperatur transisi, yaitu temperatur transisi glass (T<sub>g</sub>) dan temperatur leleh (T<sub>m</sub>). Temperatur transisi glass adalah temperatur di mana terjadi perubahan fasa dari fasa *glassy* (kaku) menjadi fasa *rubbery* (lentur), sedangkan temperatur leleh adalah temperatur di mana PP mulai meleleh menjadi lelehan kental. Selain itu, PP juga memiliki temperatur kristalisasi (T<sub>kris</sub>), namun T<sub>kris</sub> bukanlah temperatur transisi. Temperatur kristalisasi adalah temperatur dimana molekul mulai menyusun diri membentuk suatu kisi (susunan) tertentu secara beraturan.[9,13].

Pada saat polimer dilelehkan, molekul-molekul akan terpisah dan saling menjauh serta akan terjadi vibrasi-vibrasi dan rotasi sehingga struktur molekul menjadi tidak teratur. Proses pemanasan ini membuat struktur teratur pada kristalin menjadi acak, sedangkan struktur amorf menjadi lebih mengembang dan lebih tidak teratur.

Sebaliknya proses pendinginan diikuti dengan penurunan volume karena strukturnya menyusut kembali seperti sebelum dipanaskan. Jika proses pemanasan dan pendinginan tidak merata, maka antara pengembangan dan penyusutan tersebut terdapat penyusutan volume. Fenomena ini disebut dengan pengkerutan (*shrinkage*).<sup>[28]</sup> Pada waktu didinginkan gerakan-gerakan molekul akan berhenti dan struktur molekul akan teratur kembali. Efek kecepatan pendinginan sangat berpengaruh pada pemulihan struktur yang terjadi. Pada saat pendinginan inilah terjadi kristalisasi.

Pembentukan inti kristal pada PP terjadi mulai dari temperatur kristalisasi sampai temperatur transisi glass atau sampai kristal yang telah tumbuh saling menyentuh kristal yang lain. Temperatur kristalisasi adalah temperatur di antara temperatur transisi glass dan temperatur leleh, yang mana pada temperatur ini mulai terjadi pertumbuhan inti kristal. Pembentukan inti kristal ini berawal ketika beberapa segmen molekul polimer mengatur diri pada arah yang sama dan membentuk kisi secara beraturan. Pertumbuhan kisi yang beraturan ini berlanjut membentuk struktur berlapis-lapis yang disebut dengan lamela. Lamela akan terus tumbuh dengan arah pertumbuhan yang beragam menjauhi inti kristal sehingga membentuk *spherulite* berupa bola.<sup>[28]</sup>



**Gambar 2.22** Struktur spherulit yang tersusun dari fasa kristalin berlapis (lamelar)<sup>[9]</sup>

Penambahan *nucleating agent* pada polimer menyebabkan pertumbuhan inti kristal lebih cepat, sehingga inti yang terbentuk lebih banyak. Dengan semakin banyak inti kristal, maka kristal-kristal yang terbentuk akan semakin mudah bersentuhan satu sama lain dan pertumbuhan kristal akan berhenti. <sup>[13]</sup>

## 2.5 Aditif PPgMA dan Antioksidan

### 2.5.1 PP-g-MA

Kopolimer merupakan polimer yang tersusun dari dua jenis atau lebih monomer yang berbeda. Sehingga terdapat beberapa kemungkinan terbentuknya struktur rantai polimer. Struktur rantai kopolimer dapat berupa kopolimer acak (random), kopolimer berselang-seling (alternating), kopolimer blok (block), atau kopolimer cangkok (grafting).

Seperti dijelaskan sebelumnya, bahwa antarmuka pada komposit serat berfungsi sebagai penerus beban antara matriks dan serat <sup>[25]</sup>. Oleh karena itu, maka matriks dan penguat harus dalam keadaan kontak yang baik sekali <sup>[21]</sup>. Kontak yang baik terjadi apabila seluruh bagian serat terbasahi dengan oleh matriks. Pembasahan dapat terjadi apabila perbedaan energi permukaan antara pengisi dan matriks relatif kecil <sup>[25]</sup>. Besar energi permukaan itu sendiri

dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya kepolaran. Seperti poliolefin pada umumnya, polipropilena (PP) yang belum mengalami perlakuan tertentu memiliki energi permukaan yang relatif rendah karena sifatnya yang nonpolar <sup>[29]</sup>. Sedangkan kebanyakan bahan yang digunakan sebagai penguat komposit, seperti serat baja, serat gelas, dan serbuk kayu, memiliki kepolaran yang tinggi, sehingga tegangan permukaannya tinggi. Apabila PP akan dijadikan komposit dengan bahan penguat yang disebut di atas, tentunya tidak akan terbentuk komposit yang baik karena tidak dapat terjadi pembasahan yang baik. Promotor adhesi diperlukan untuk memperbaiki sifat mampu basah pada komposit yang terdiri dari konstituen-konstituen yang berbeda tingkat tegangan permukaannya. Promotor adhesi adalah zat yang dapat menyatukan komponen-komponen yang tidak saling bergabung dengan cara menjadi penghubung diantara komponen-komponen tersebut <sup>[30]</sup>. Promotor adhesi umumnya disebut dengan istilah sesuai dengan aplikasinya. Apabila promotor adhesi digunakan untuk meningkatkan keterpaduan (compatibility) pada pencampuran dua macam polimer yang tidak saling melarutkan (immiscible), maka disebut pemadu (compatibilizer). Apabila promotor adhesi digunakan untuk meningkatkan adhesi antara sistem polimerik dan pengisi, maka disebut zat penggabung (*coupling agent*) <sup>[30]</sup>.

Pembuatan polimer dengan lebih dari 1 jenis monomer ini disebabkan karena kebutuhan akan performa yang lebih baik dibanding homopolimer (polimer dengan 1 jenis monomer) biasa. Umumnya kopolimer terdiri dari kopolimer blok dan kopolimer cangkok. Dengan menggunakan A, B, dan C untuk menandakan monomer berbeda, berikut ialah tabel yang menunjukkan perbedaan antara jenis-jenis kopolimer.

**Tabel 2.6** Klasifikasi Kopolimer <sup>[33]</sup>

Jenis	Struktur	Nama
Kopolimer acak	-(A/B)-	Poli (A-co-B)
Kopolimer berselang-seling	-A-B-A-B-A-B-A-B-	Poli (A-alt-B)
Diblok kopolimer	-A.....A-B.....B-	Poli (A)-blok-Poli (B)
Triblok kopolimer	-A....A-B....B-C....C-	Poli (A)-blok-Poli (B)-blok-Poli (C)
Kopolimer cangkok	-A-A...-A-A-...-A-A	Poli (A)-graft-poli (B)
	B <sub>m</sub> B <sub>n</sub> B <sub>o</sub>	

Sekalipun monomer penyusun kopolimer adalah sama A dan B, namun sifat-sifat yang ditunjukkan poli (A-alt-B), poli(A-blok-B), poli(A)-graft-poli(B), dan seterusnya akan berbeda-beda seiring dengan perbedaan susunan dan morfologi rantai yang terbentuk. Saat terjadi kopolimerisasi antara 2 monomer, A dan B, akan terjadi reaksi sebagai berikut:



Mayo-Lewis equation (biasa disebut copolymerization equation) memberikan hubungan antara  $r$  (reactivity ratio) dan molar ratio (perbandingan konsentrasi monomer) dengan struktur produk polimer yang akan dihasilkan. Karena itu selama kopolimerisasi sangat penting untuk memperkirakan bagaimana komposisi kopolimer bervariasi tergantung pada fungsi reaktivitas komonomer dan konsentrasi setiap saat<sup>[33]</sup>.  $r$  merupakan perbandingan kecepatan reaksi dengan monomer sendiri terhadap kecepatan reaksi dengan monomer berbeda. Atau secara matematis, dapat ditulis:

$$r_1 = \frac{k_{11}}{k_{12}} \quad \text{dan} \quad r_2 = \frac{k_{22}}{k_{21}}$$

Efek dari Reactivity Ratios, yaitu:

- Homopolymer: terjadi saat  $r = 8$ , dengan struktur:  
 -A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A- (bila  $r_1 = 8$ )  
 -B-B-B-B-B-B-B-B-B-B-B- (bila  $r_2 = 8$ )
- Random copolymer (atau statistical copolymer): terjadi saat  $r_1, r_2$  mendekati 1:  
 -A-A-B-B-A-A-A-B-A-A-B-B-
- Alternating copolymer: terjadi saat  $r_1, r_2$  mendekati nol, dengan struktur:  
 -A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-, atau  $-(A-B)_n-$
- Block copolymer: terjadi saat  $r_1 > 1, r_2 > 1$ , dengan struktur:  
 -A-A-A-A-B-B-B-B-A-A-A-A-B-B-...



Salah satu promotor adhesi yang paling umum digunakan untuk PP adalah kopolimer cangkok propilena - anhidrida maleat karena misibilitasnya yang sangat baik terhadap molekul PP dan juga dapat bereaksi dengan gugus hidroksil (-OH) membentuk ikatan ester dan bereaksi dengan gugus amina (-NH<sub>2</sub>) ikatan amida, juga mampu berikatan hidrogen pada beberapa gugus kimia dari konstituen pengisi <sup>[30]</sup>, sehingga dapat membentuk ikatan antarmuka antara matriks PP dan pengisi yang bersifat polar

### 2.5.1.1 Kopolimerisasi PP-g-MA

Kopolimerisasi PP-g-MA terjadi antara PP dengan Maleic Anhydride. Sifat-sifat Maleic Anhidride dapat dilihat pada tabel 2.7 dibawah ini.

**Tabel 2.7** Sifat-Sifat Maleic Anhydride <sup>[29]</sup>

Sifat	Nilai
Berat molekul	98,06 gr/mol
Struktur molekul	C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Wujud	Serpihan putih
Sifat	Higroskopis
Berat jenis	1,480 Kg/dm <sup>3</sup>
Titik leleh	52,8°C
Titik didih	202°C

**Compatibilizer PP-g-MA** lebih sering digunakan untuk matriks polypropylene dengan *filler clay*. Pada penelitian ini, polipropilen yang non-polar membutuhkan compatibilizer guna memungkinkan terjadinya kontak antara PP dengan lapisan karbon. Maka dilakukan penambahan kopolimer PP grafted Maleic Anhydride (PP-g-MA). Anhidrida Maleat (maleic anhydride / MA) dengan berat molekul 98,06 gr/mol merupakan senyawa fisik, berwarna putih, bersifat higroskopis, dalam bentuk padat memiliki berat jenis 1,480 Kg/dm<sup>3</sup>, titik leleh 52,8 °C dan titik didih 202 °C <sup>[33]</sup>.

Polipropilen akan kompatibel dengan PP dari PP-g-MA, sedangkan gugus MA (polar) yang tercangkok pada polipropilen akan meningkatkan kepolaran PP-g-MA (kepolaran bergantung dengan jumlah anhidrida maleat yang tercangkok),

sehingga PP-g-MA akan memiliki polaritas yang sesuai dengan *filler* dan akan menyusup masuk diantara galeri *filler*.



**Gambar 2.24.** PP-g-MA tercangkok pada galeri *filler*.

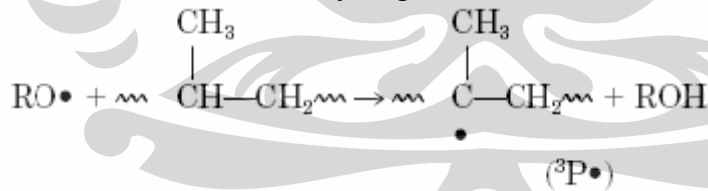
Secara teoritis, PP-g-MA dengan kompatibilitas yang baik terhadap *filler* (memiliki derajat polaritas yang hampir sama dengan *filler*) akan berikatan dengan *filler*, namun ikatan yang terjadi juga dapat didasarkan pada ikatan kovalen, yakni ester linkage. Pada sistem komposit PP-*filler*, ikatan kovalen yang terjadi adalah antara gugus OH dari *filler* dengan gugus C=O pada anhidrida maleat dari PP-g-MA.

Mekanisme reaksi proses pencangkokan anhidrida maleat pada polipropilen adalah sebagai berikut <sup>[23]</sup>.

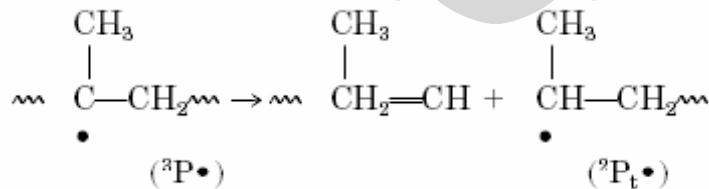
1. Dekomposisi dari inisiator



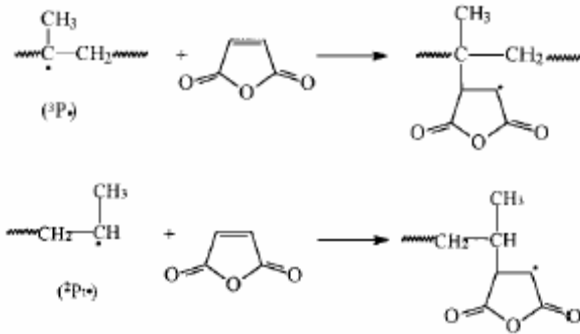
2. Abstraction of Hydrogen



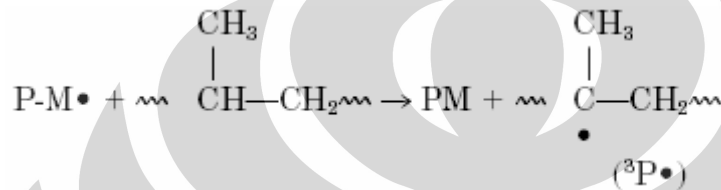
3.  $\beta$  Scission



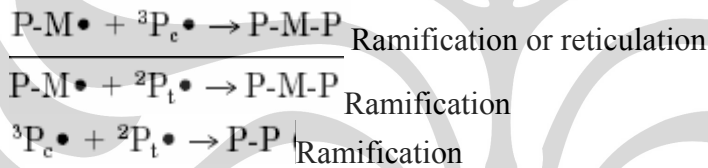
#### 4. Grafting of Maleic Anhydride



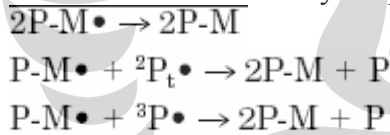
#### 5. Chain Transfer



#### 6. Termination by Combination



#### 7. Termination by Disproportioning



Keterangan: >> 2Pt• adalah radikal pada karbon sekunder;  
 >> 3P• adalah radikal pada karbon tersier;  
 >> P adalah rantai polipropilen;  
 >> M adalah anhidrida maleat; dan  
 >> P-M• adalah succinic radikal.

Reaksi pencangkakan (grafting) anhidrida maleat pada polipropilen dalam proses ini melibatkan reaksi polimer leleh dengan anhidrida maleat yang dipengaruhi adanya peroksida organik.

Peroksida organik tidak stabil secara termal dan mengalami pemutusan ikatan – ikatan oksigen membentuk radikal bebas. Radikal bebas ini akan

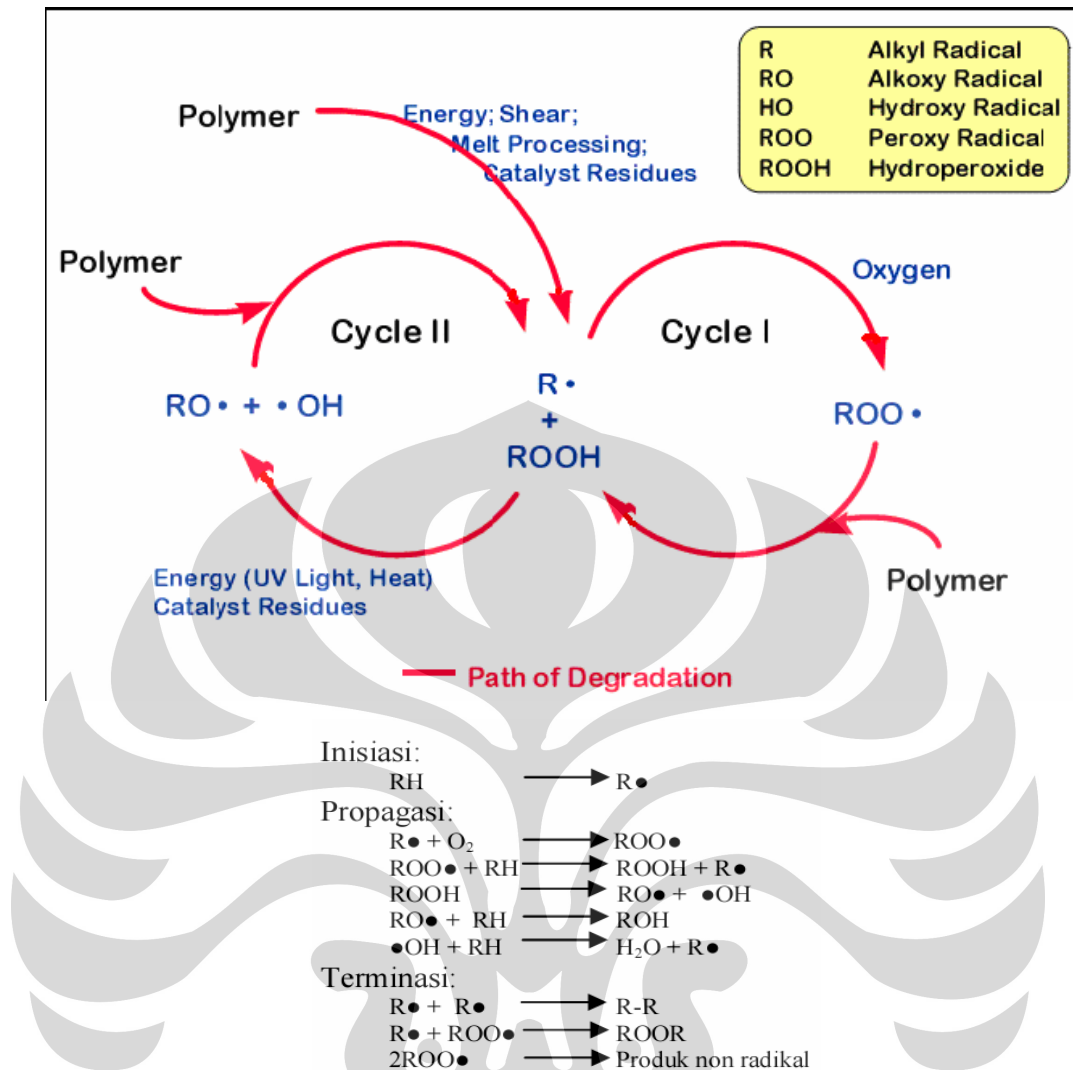
mengambil atom hidrogen dari rantai polipropilen sehingga membentuk mikroradikal di rantai polimer dimana secara teori ketika anhidrida maleat ditambahkan akan terjadi proses pencangkokan (grafting). Untuk mendapatkan kondisi optimum dari proses pencangkokan adalah suatu penelitian yang sulit yang melibatkan banyak variabel diantaranya: jenis dan konsentrasi peroksida, konsentrasi Anhidrida Maleat, waktu reaksi, temperatur reaksi, kecepatan rotor, urutan penambahan berbagai reagen, serta ada atau tidaknya stabilizer<sup>[23]</sup>.

## **2.6. Antioksidan**

Seperti polimer pada umumnya, kelemahan utama PP adalah mudah mengalami kerusakan akibat degradasi. Proses degradasi akan menghasilkan radikal bebas yang akan merusak rantai molekul secara berkesinambungan sehingga kualitas polimer akan terus menurun. Degradasi akibat oksidasi seperti ini dapat dikurangi dan dicegah dengan menggunakan aditif antioksidan.<sup>[33]</sup>

### **2.6.2.1 Degradasi pada Polimer**

Degradasi adalah pemutusan rantai molekul polimer akibat adanya pengaruh cahaya, panas, atmosfer, dan lingkungan. Material polimer yang telah mengalami degradasi akan mengalami oksidasi dengan sendirinya (auto-oksidasi), membentuk radikal peroksida, kemudian radikal ini akan merusak rantai polimer lain<sup>[35]</sup>, sehingga proses perusakannya akan terus-menerus terjadi



**Gambar 2. 25** Mekanisme sirkulasi degradasi polimer<sup>[34]</sup>

Tahap pertama adalah tahap inisiasi, dimana pada tahap ini radikal bebas menginisiasi terjadinya reaksi oksidasi, tahap kedua adalah propagasi dimana radikal bebas yang terbentuk akan bereaksi dengan oksigen dan diakhiri dengan tahap terminasi atau tahap pengakhiran dari reaksi oksidasi<sup>[35]</sup>

Degradasi bisa menyebabkan terjadinya ikat-silang ataupun pemutusan rantai pada polimer. Pemutusan rantai menyebabkan berat molekul turun sehingga aliran leleh (*melt flow*) tinggi dan mengurangi kekuatan tarik. Kerusakan ini dapat teramati dengan adanya perubahan warna, berkurangnya kekilapan dan kejernihan. Dampak yang lebih buruk yaitu berupa penurunan kekuatan dan kekakuan, juga fleksibilitas<sup>[35]</sup>

### 2.6.2.2 Mekanisme Kerja Antioksidan

Degradasi akibat oksidasi seperti ini dapat dikurangi dan dicegah dengan menggunakan aditif antioksidan. Antioksidan adalah suatu zat aditif yang berfungsi untuk mencegah terjadinya reaksi oksidasi oleh udara/oksigen yang dapat menyebabkan polimer terdegradasi.<sup>[35]</sup>

Antioksidan dibagi dua jenis menurut fungsi mekanisme pencegahan oksidasi yaitu antioksidan primer dan antioksidan sekunder. Antioksidan primer berfungsi dengan mendonasikan hidrogen ke reaksi radikal bebas peroksi untuk mencegah tahap propagasi. Antioksidan sekunder menghambat oksidasi dengan menyiapkan proliferasi alkoksi dan radikal hidroksi dengan mengurangi hidroperoksida menjadi produk yang tidak reaktif. Kombinasi kedua antioksidan menghasilkan perpaduan yang sinergi. Antioksidan primer memiliki tiga tipe yaitu amina, fenolik dan garam metal. Tipe fenolik adalah jenis yang lebih umum digunakan sebagai contoh fenolik sederhana antara lain bisfenolik, polifenolik dan tiobisfenolik. Contoh amina adalah dari jenis arilamina, sedangkan jenis antioksidan sekunder berupa organofosfit, tioester dan metal deaktivator.

## 2.7 BAHAN PENGISI

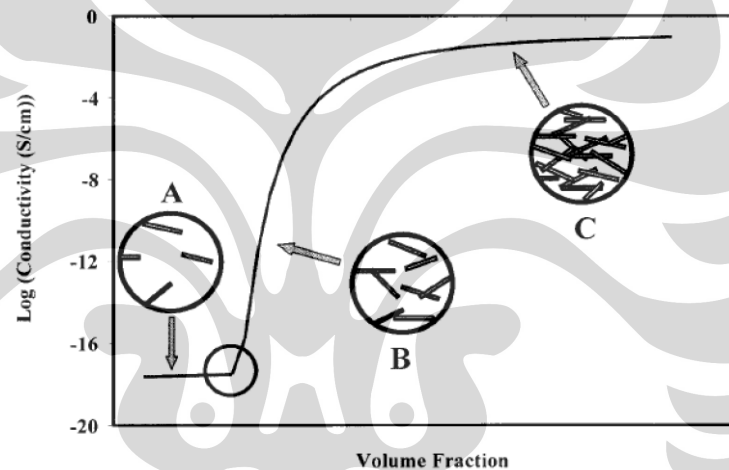
### 2.7.1 Sifat Konduktivitas Listrik

Polimer pada dasarnya bersifat insulator, dan nilai konduktivitasnya kira-kira  $10^{-14} - 10^{-17}$  S/cm (Tabel 2.10). Konduktivitas material polimer dapat ditingkatkan dengan menambahkan karbon konduktif, seperti; serat karbon, karbon hitam, dan grafit sintetis membentuk material komposit. Akan tetapi, konduktivitas komposit bergantung pada konsentrasi, orientasi, bentuk, ukuran, dan sifat-sifat dari pengisi konduktif yang dipakai. Dispersi partikel dan bentuk jaringan kontinyu dari bahan pengisi konduktif juga berpengaruh pada sifat konduktivitas. Di sisi lain, sering dihasilkan material komposit yang sifat-sifat mekaniknya dari lebih buruk dari material-material penyusunnya.

**Tabel 2.8** Nilai konduktivitas untuk jenis material yang berbeda. [2]

Material	Konduktivitas (S/cm)
Polimer	$10^{-4} - 10^{-17}$
Karbon Konduktif	$10^2 - 10^5$
Logam	$10^6$

Gambar 2.26 berikut menggambarkan kecenderungan kurva konduktivitas komposit dengan tiga fraksi volume berbeda; A, B, dan C. Pada muatan pengisi yang rendah (A), nilai konduktivitas komposit masih mendekati nilai konduktivitas matriks polimer. Akan tetapi, pada beberapa muatan yang kritis (C), konduktivitas meningkat teratur dengan peningkatan yang sangat sedikit.



**Gambar 2.26** Ketergantungan nilai konduktivitas pada fraksi volume pengisi. [2]

Konduktivitas komposit berpengisi tergantung pada jenis bahan pengisi, jumlah muatan pengisi, dan kualitas dispersi bahan pengisinya. Berbagai jenis partikel logam, partikel non-logam yang dilapisi logam, grafit, serat karbon, dan karbon hitam dapat digunakan sebagai bahan pengisi dengan tujuan untuk meningkatkan konduktivitas listrik dan konduktivitas panas [33].

Karbon banyak digunakan sebagai penguat pada material komposit selain untuk meningkatkan konduktivitas, juga untuk memperbaiki sifat mekanik komposit. Secara signifikan serat karbon atau grafit mampu meningkatkan kekuatan dan kekakuan plastik [36]. Pada penelitian ini, material yang dipilih sebagai bahan pengisi adalah karbon dalam tiga bentuk berbeda, yaitu karbon

hitam, serat karbon, dan grafit sintetik. Berdasarkan kombinasi, gaya, orientasi, dan bentuk dari ketiga jenis pengisi tersebut, terbentuklah suatu komposit hibrida serat-partikulat.



**Gambar 2.27** Komposit hibrida serat-partikulat (*fiber-particulate hybrids*).<sup>[20]</sup>

### 2.7.2 Karbon Hitam

Karbon hitam adalah padatan karbon amorf yang dibentuk dengan proses deposisi dari partikel padat dalam fasa gas. Karbon hitam memiliki ukuran partikel yang sangat halus. Sifat-sifat karbon hitam adalah suatu fungsi dari sumber “bahan bakar” manufaktur dan jenis proses pembakaran yang digunakan. Karbon hitam digolongkan berdasarkan kemampuan mewarnai suatu luas permukaan, ukuran partikel utama, “struktur” (jumlah partikel utama yang menyatu membentuk partikel sekunder), dan konduktivitasnya. Aplikasi karbon hitam dalam dunia polimer antara lain digunakan untuk zat pewarna, proteksi ultra violet, campuran pada plastik konduktif, campuran pada karet, peningkat aliran elektron, penghilang listrik statik dalam partikel non-konduktif, dan sebagai bahan penguat polimer.<sup>[37]</sup>

### 2.7.3 Grafit Sintetik

Grafit digolongkan menjadi dua jenis, yaitu alami dan sintetik. Grafit sintetik lebih murni dibandingkan grafit alami. Grafit sintetik merupakan produk yang dibuat dari material karbon amorf melalui proses perlakuan temperatur-tinggi. Grafit digunakan sebagai bahan pengisi khususnya dalam matriks polimer karena memiliki konduktivitas listrik dan panas yang baik, serta memiliki sifat-sifat pelumasan (*lubricant*). Karena strukturnya yang berlapis, grafit memberi sifat kekakuan dan dimensi yang stabil terhadap polimer<sup>[33]</sup>.



Grafit sintetis digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti; pengecoran logam, karbon elektrik, pelat bipolar *fuel cell*, pelapisan, proses elektrolitik, sebagai bahan pengisi konduktif, campuran karet dan plastik, serta untuk aplikasi pemboran. Partikel grafit sintetis berukuran 2  $\mu\text{m}$  (bubuk) sampai 2 cm (potongan-potongan) dengan kandungan 99% karbon. <sup>[52]</sup> Tabel di bawah ini menunjukkan sifat-sifat umum grafit.

**Tabel 2.9** Sifat-sifat umum grafit <sup>[33]</sup>.

Sifat-Sifat	Keterangan
Komposisi Kimia	C (80-99,7%), Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < 0,2%
Kerapatan	2- 2,25 gr/cm <sup>3</sup>
Titik lebur	4027 - 4427 °C
Kapasitas Panas	8,517 (25 °C) J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Konduktivitas Panas	200 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Kekerasan	1 - 2 Mohs scale
Hambatan Volume	800 – 2500 $\Omega\text{cm}$
Warna	Hitam keabu-abuan
Struktur Kristal	Hexagonal

#### 2.7.4 Serat Karbon

Serat karbon disintesis dari rayon, poliakrilonitril (PAN), dan pitch dengan menghilangkan hidrogen dan nitrogen dalam kondisi atmosfer inert. Serat karbon yang diproduksi dari poliakrilonitril (PAN) melalui tiga tahap proses, yaitu; stabilisasi (peregangan dan oksidasi), karbonisasi (pemanasan untuk mengurangi O, H, N), dan grafitisasi (meningkatkan modulus elastisitas).

**Tabel 2.10** Perbandingan sifat serat karbon berdasarkan bahan dasarnya.<sup>[20]</sup>

Sifat-Sifat	Pitch	Rayon	PAN
Kekuatan Tarik (Gpa)	1,55	2,06-2,75	2,5-3,2
Modulus Tarik (Gpa)	370	380-550	210-400
<i>Short Beam Shear</i> (Mpa)			
- <i>untreated</i>	41	28	28-68
- <i>treated</i>	68	56	56-120
Berat Spesifik	2,0	1,7	1,8
Elongasi (%)	1	-	1,2-0,6
Diameter Serat ( $\mu\text{m}$ )	-	6,5	7,5

Berdasarkan pada bahan baku dan kondisi pemrosesan, dihasilkan empat jenis kualitas serat karbon, biasanya dibedakan berdasarkan kekuatannya. Biasanya permukaan serat dioksigenasi sebagian dan diperkecil untuk meningkatkan dispersi dan pembasahan (*wetting*) pada proses lebih lanjut. Potongan serat karbon tersedia dalam ukuran 0,5 - 6 mm. Serat karbon memiliki kekuatan, ketahanan kimia, dan konduktivitas listrik serta konduktivitas panas yang sangat baik. Nilai koefisien muai panas linier dalam arah serat adalah negatif, sehingga efek ini dapat digunakan untuk mencegah penyusutan material komposit. Sistem komposit serat karbon menunjukkan performa yang bagus, sehingga secara luas digunakan dalam berbagai aplikasi<sup>[33]</sup>

**Tabel 2.11** Sifat-sifat serat karbon <sup>[33]</sup>

Sifat-Sifat	Low “M” HT Pitch	Intermedia te “M” PAN	High “M” Pitch, PAN	Ultra High “M” Pitch, PAN
Kerapatan (g/cm <sup>3</sup> )	1,78	1,76 – 1,80	1,79 – 1,90	1,90 – 2,0
Kekerasan (Mohs)	1	1	1	1
Modulus (Mpa)	240	325	400	450
Kekuatan Tarik (Mpa)	4300	5000	2400	3500
Konduktivitas Panas (W/mK)	17	17	115	-
Koefisien Muai panas	-0,1	-0,1	-0,5	-
Panas Spesifik	710	710	710	-
Hambatan Volume	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$0,9 \times 10^{-3}$	-
“M” = Modulus				

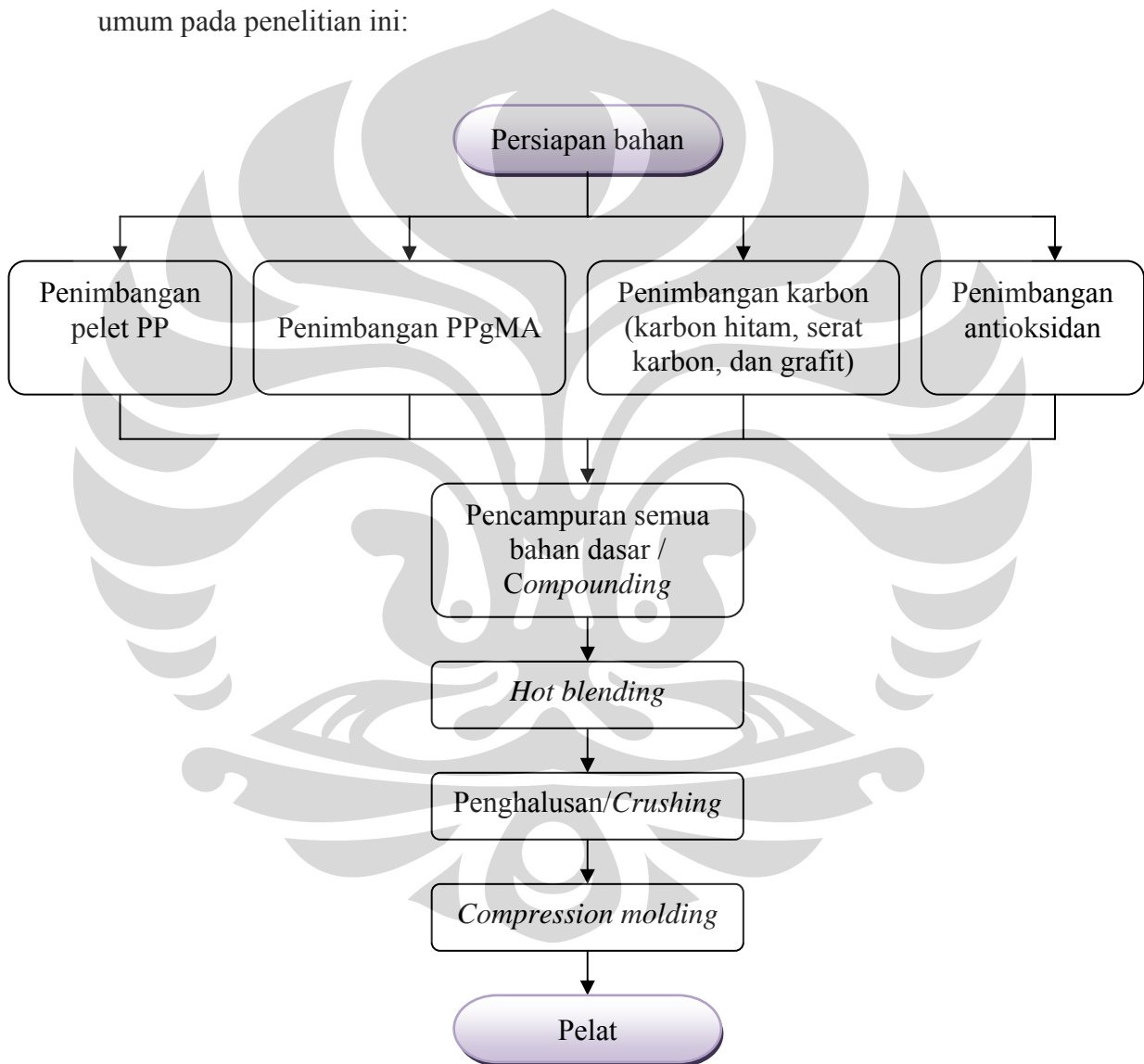
# BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

#### 3.1.1 Diagram Alir Preparasi dan Fabrikasi Sampel

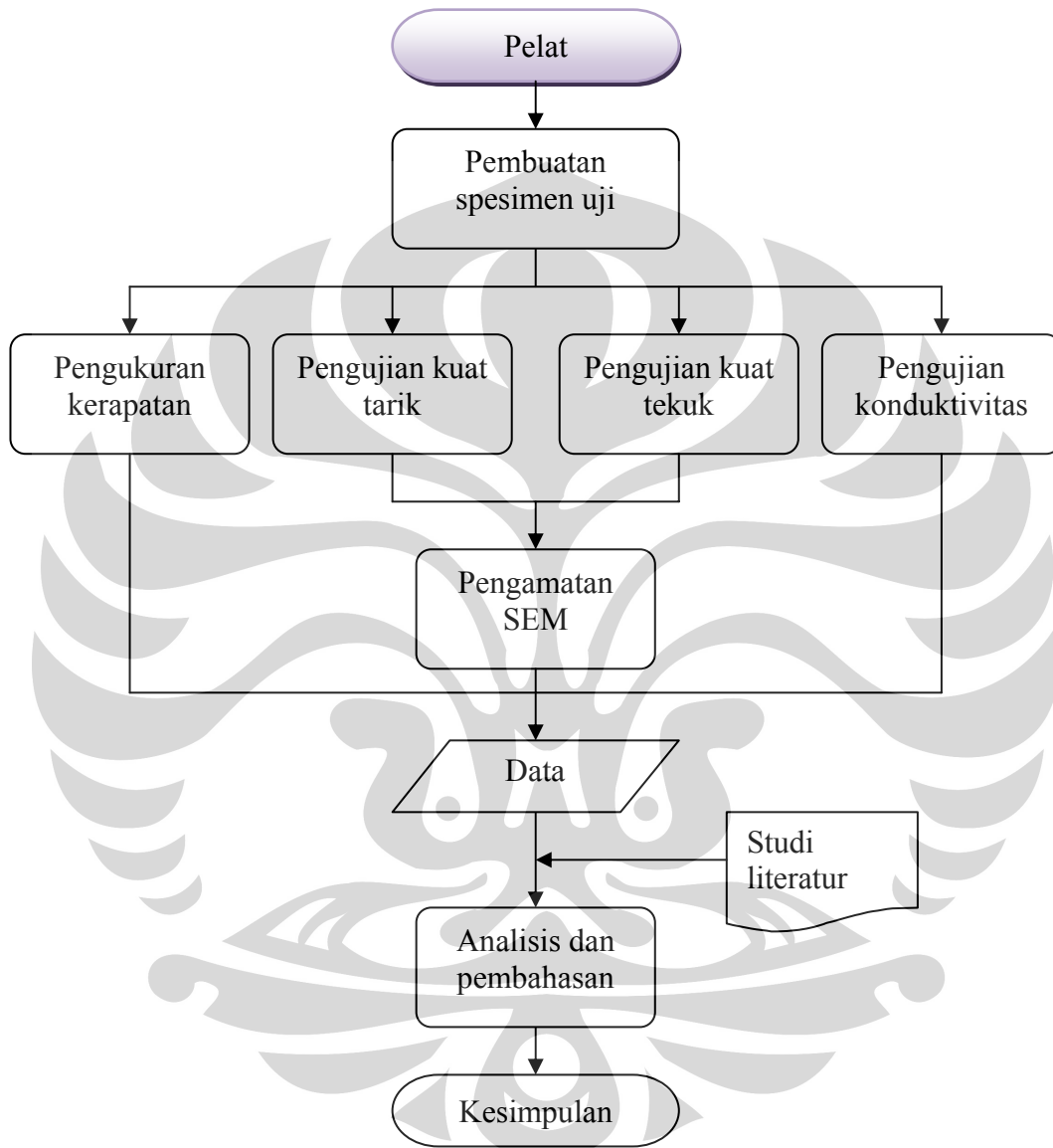
Gambar di bawah menunjukkan diagram alir preparasi sampel secara umum pada penelitian ini:



**Gambar 3.1** Diagram alir preparasi dan fabrikasi sampel.

### 3.1.2 Diagram Alir Pengujian

Gambar di bawah ini menunjukkan diagram alir pengujian karakterisasi secara umum pada penelitian ini:



**Gambar 3.2** Diagram alir pengujian karakterisasi.

### 3.2 KOMPOSISI BAHAN

Berikut ini tabel yang menunjukkan komposisi dan pengkodean seluruh sampel yang diteliti:

**Tabel 3.1** Komposisi dan pengkodean formulasi sampel.

Bahan	Satuan	Kode Formulasi				
		F1	F2	F3	F4	F5
Polipropilena	%wt	100	50	50	14	14
	g	500	250	250	70	70
Karbon	%wt	0	44	44	80	80
	g	0	220	220	400	400
PP-g-MA	%wt	0	5	5	5	5
	g	0	25	25	25	25
Antioksidan	%wt	0	1	1	1	1
	g	0	5	5	5	5
<b>Total</b>	<b>G</b>	<b>500</b>	<b>500</b>	<b>500</b>	<b>500</b>	<b>500</b>

Sedangkan perbandingan fraksi massa ketiga jenis karbon disajikan dalam tabel berikut:

**Table 3.2** Perbandingan fraksi massa ketiga jenis karbon.

Jenis Karbon	Satuan	F1	F2	F3	F4	F5
Karbon Hitam	wt%	0	50	34	37,5	50
	g	0	110	75	150	200
Serat Karbon	wt%	0	50	45,45	31,25	25
	g	0	110	100	125	100
Grafit Sintetik	wt%	0	0	20,45	25	25
	g	0	0	45	125	100
<b>Total</b>	<b>g</b>	<b>0</b>	<b>220</b>	<b>220</b>	<b>400</b>	<b>400</b>

### 3.3 ALAT DAN BAHAN

#### 3.3.1 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Timbangan digital Mettler PM600 dan Sartorius.
2. *Hot blender* Rheomix Haake Rheocord 90 kapasitas 250 g.
3. Mesin *Crusher* Kpi tipe KF-808-B.
4. Mesin COLLIN P300P *Hydraulic Hot Press* dan  *mold*.
5. TOYOSEIKI *Mini Test Press* dan *Specimens Puncher*.
6. Mesin pemotong spesimen GÖLZ BS 350.
7. Mesin abrasif.
8. Lemari pengkondisian.
9. SHIMADZU *Universal Testing Machine* tipe AGS-10kNG.
10. SEM (*Scanning Electron Microscope*) LEO 420i dan *Sputter Coater*.
11. *Conductivity measurement apparatus*.

#### 3.3.2 Bahan-Bahan

##### 3.3.2.1 Polipropilena (PP)

Polimer termoplastik yang digunakan sebagai matriks adalah kopolimer blok polipropilena COSMOPLENE<sup>®</sup> yang diproduksi oleh The Polyolefine Company (TPC) Singapore. Berikut ini adalah tabel spesifikasi dari polipropilena yang digunakan dalam penelitian.

**Tabel 3.3** Spesifikasi kopolimer blok polipropilena COSMOPLENE® [38]

<b>Kode</b>	AH561		
<b>Nama Produk</b>	Kopolimer Blok Polipropilena COSMOPLENE®		
<b>Aplikasi</b>	Komoditas, Baterai, Wadah, Kursi, Tempat Duduk		
<b>Karakteristik</b>	Sifat Alir Sedang-Tinggi, Tahan Impak, Kaku		
	<b>Sifat-Sifat</b>	<b>Satuan</b>	<b>Metode Uji</b>
Laju Aliran Leleh (MFR)	3	g/10 min	ASTM D1238
Kerapatan Massa	0.9	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D1505
Kekuatan Impak Izod	23°C: 24,5; -20 °C: 4,7	KJ/m <sup>2</sup>	ASTM D256
Modulus Tekuk	1080	MPa	ASTM D790
Kekuatan Tarik <i>Yield</i>	24.5	MPa	ASTM D638
Kekuatan Tarik <i>Ultimate</i>	30.4	MPa	ASTM D638
Elongasi	680	%	ASTM D638
Kekerasan Rockwell	85	R Scale	ASTM D785
HDT	112	°C	ASTM D648
Penyusutan MD-TD	15/15	1/1000	-

### 3.3.2.2 Karbon

Bahan pengisi karbon digunakan untuk meningkatkan sifat konduktivitas listrik dari komposit. Karbon hitam, serat karbon, dan grafit sintetik adalah jenis-jenis karbon yang digunakan dalam penelitian ini. Sifat-sifat dari ketiga jenis karbon tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.4** Spesifikasi karbon [2].

<b>Jenis Karbon</b>	<b>Nama</b>	<b>Ukuran Partikel</b>	<b>Penyuplai</b>
Karbon Hitam	<i>Vulcan XC72</i>	<i>30 nm</i>	<i>Cabot Corp.</i>
Serat Karbon	<i>Fortafil 243</i>	<i>7 microns</i>	<i>Fortafil Fibers</i>
Grafit Sintetik	<i>4012</i>	<i>60 x 325 mesh</i>	<i>Asbury Carbon</i>



Karbon hitam *Cabot Vulcan XC72* yang dipakai sebagai bahan pengisi adalah produk dari Cabot Corporation. Karakteristik utama karbon hitam *Cabot Vulcan XC72* yang berhubungan dengan kemampuan proses dan konduktivitas meliputi luas permukaan spesifik, kimia permukaan, dan sifat pembasahan (*wetting*). Karena material ini memiliki luas permukaan yang besar, maka dispersi partikel kedalam matriks pun meningkat, sehingga karbon hitam banyak digunakan sebagai bahan campuran komposit konduktif<sup>[39]</sup>. Sifat fisik dan kimia dari *Cabot Vulcan XC72* ditunjukkan pada tabel berikut ini.

**Tabel 3.5** Sifat-sifat karbon hitam *Cabot Vulcan XC-72*<sup>[2]</sup>.

Sifat-Sifat	Keterangan
Bentuk	Bubuk hitam
Bau	Tidak
Kerapatan Massa	1,7-1,9 g/cm <sup>3</sup> @ 20 °C
Kerapatan Massa Ruah	20-550 kg/m <sup>3</sup>
Ukuran Partikel	60 x 325 mesh

Serat karbon yang digunakan dalam penelitian ini disuplai dari Fortail Carbons dan data spesifikasinya dapat dilihat pada lampiran. Penggunaan serat karbon dalam material komposit konduktif berfungsi sebagai jalur aliran elektron. Sifat-sifat umum dari serat karbon *Fortail 243* dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

**Tabel 3.6** Sifat-sifat serat karbon *Fortail 243*<sup>[2]</sup>.

Spesifikasi	Keterangan
Kekuatan Tarik	> 3450 Mpa
Modulus Tarik	> 207 Gpa
Elongasi	1,70 %
Kerapatan Massa	1,8 g/cm <sup>3</sup>
<i>Cross-sectional Area</i>	3,3 x 10 <sup>-5</sup> mm <sup>2</sup>
Diameter Filamen	6 mikron
Hambatan Listrik	1,67 mOhm-cm
Panjang Serat	3 mm

### 3.3.2.3 Maleated-anhydride-grafted-polypropylene (PP-g-MA)

Pada penelitian ini PPgMA digunakan sebagai bahan aditif dalam komposit konduktif polipropilena-karbon dengan tujuan untuk meningkatkan ketangguhan komposit. PPgMA juga dapat bersifat konduktif apabila ditambahkan karbon hitam ke dalam campuran. Spesifikasi PPgMA ditunjukkan dalam tabel berikut ini

**Tabel 3.7.** Sifat-sifat PP-g-MA

<i>Sifat</i>	<i>Nilai</i>
Berat Molekul	98,06 gr/mol
Struktur Molekul	C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Wujud serpihan	Putih
Sifat	Higroskopis
Berat jenis	1,480 Kg/dm <sup>3</sup>
Titik leleh	52,8°C
Titik didih	202°C

### 3.3.2.4 Antioksidan

Dalam penelitian ini menggunakan aditif antioksidan produk dari China Catalyst Ltd dengan nama merek dagang CN-CAT B215 yang merupakan hasil penggabungan antioksidan utama A1010 dengan antioksidan pembantu A168 dan *chelant* stabil. Tabel dibawah ini menunjukkan sifat-sifat dari antioksidan CN-CAT B215.

**Tabel 3.8** Sifat-sifat CN-CAT B215<sup>[35]</sup>

<b>Sifat-Sifat</b>	<b>Keterangan</b>
Bentuk	Bubuk putih
Warna Larutan	Bening
Komposisi	A 168: 61,5-71,5% A 1010: sisanya
TGA (100 °C, 2 jam)	0,5% (max)
<i>Transmittance:</i>	
425 nm	96% (min)
500 nm	98% (min)

### **3.4 PROSEDUR PENELITIAN**

#### **3.4.1 Preparasi dan Fabrikasi Sampel**

##### **3.4.1.1 Penimbangan**

Pertama bahan-bahan ditimbang untuk mendapatkan takaran sesuai formulasi pada Tabel 3.1. Penimbangan pelet polipropilena, PP-g-MA, tiga jenis karbon (karbon hitam, serat karbon, grafit sintetik), dan antioksidan dilakukan dengan timbangan digital Mettler PM600. Hasil takaran ditempatkan pada wadah kantong plastik.

##### **3.4.1.2 Pencampuran (*Compounding*)**

Proses pencampuran bahan-bahan dilakukan dengan metode *hot blending* (pencampuran secara mekanik melalui proses pemanasan) menggunakan Rheomix Haake Rheocord 90 berkapasitas 250 g. Proses ini dilakukan sebagai pencampuran awal sebelum dilakukan proses berikutnya, yaitu *crushing* dan *hot pressing*. Formula yang dicampur dalam adalah F2, F3, F4, dan F5. Sedangkan formula F1 (PP 100wt%) tidak dicampur tetapi langsung dicetak menjadi pelat. Rheocord 90 berkapasitas maksimal 250 g, maka bahan-bahan formulasi yang sudah dicampur dengan total berat masing-masing 500 g dibagi menjadi dua bagian untuk dua kali proses pada setiap formula. Pencampuran dilakukan pada temperatur 180 °C selama  $\pm 6$  menit. Setelah proses pencampuran selesai, hasil percampuran yang berbentuk bongkahan didiamkan hingga dingin kemudian dimasukkan ke dalam wadah plastik.

##### **3.4.1.3 Penghalusan (*Crushing*)**

Hasil pencampuran yang berbentuk bongkahan harus dihaluskan terlebih dahulu sebelum dilakukan proses pencetakan (*compression molding*). Alat yang digunakan dalam proses penghalusan bahan komposit adalah mesin *Crusher Kpi* tipe KF-808-B. Pada proses *crushing*, selain bertujuan untuk menghaluskan bongkahan juga bertujuan untuk menjadikan campuran komposit lebih homogen. Dengan demikian, bahan komposit lebih mudah dicetak dan partikel-partikel karbon lebih terdispersi merata ke seluruh matriks polimer. Bentuk bahan hasil *crushing* berbentuk granula dengan berbagai variasi ukuran.

#### **3.4.1.4 Pencetakan Pelat (Compression Molding)**

Sampel pelat bipolar untuk pengujian karakterisasi dicetak dengan metode *hot pressing*. Alat yang digunakan adalah COLLIN P300P *Hydraulic Hot Press*. *Hot pressing* dilakukan dengan memasukkan granula komposit hasil *crushing* ke dalam cetakan logam ( *mold*). Pemanasan dilakukan selama 14 menit pada temperatur 230 °C dan tekanan 1 bar untuk formulasi F1, F2, dan F3. Sedangkan untuk F4 dan F5 dipanaskan selama 14 menit pada temperatur 240 °C dan tekanan 200 bar. Lama pendinginan untuk semua formulasi adalah 12 menit pada temperatur 40 °C.

Masing-masing formula dicetak menjadi dua tipe pelat lingkaran. Pelat tipe I (tensile test) berdiameter 20 cm dengan ketebalan  $\pm 2$  mm. Sedangkan pelat tipe II (flexural test) berdiameter 14 cm dengan ketebalan  $\pm 4$  mm.

#### **3.4.1.5 Pembuatan Spesimen Uji**

Pelat bipolar hasil *hot pressing* diukur kerapatan massanya, kemudian pelat tersebut dibuat menjadi spesimen uji tarik, uji tekuk, dan uji konduktivitas. Spesimen uji tarik dicetak dari pelat tipe I menggunakan *puncher* berbentuk *dog-bone* tipe IV sesuai standar ASTM D 638. Sedangkan pelat tipe II dipotong-potong menjadi spesimen uji tekuk sesuai standar ASTM D 790<sup>[40]</sup>.

Spesimen uji tarik dan uji tekuk yang telah dibuat harus disimpan pada lemari pengkondisian pada temperatur  $23 \pm 2$  °C dan kelembaban relatif  $50 \pm 5\%$  selama  $\geq 40$  jam sebelum dilakukan pengujian tarik dan tekuk. Hal ini dilakukan agar molekul polipropilena mengalami relaksasi tegangan karena adanya kristalisasi sekunder setelah pemanasan.

### **3.4.2 Pengujian Karakterisasi Material**

#### **3.4.2.1 Pengukuran Kerapatan Massa (Density)**

Kerapatan massa komposit dan fraksi volume pengisi dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.1. Akan tetapi, masih ada beberapa keraguan dalam kasus perhitungan kerapatan untuk bahan pengisi campuran (*filler blends*). Dalam kasus seperti itu, sangat banyak ketidakcocokan antara nilai spesifikasi dan nilai aktualnya. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah penentuan yang akurat.

Berdasarkan pengetahuan terhadap kerapatan massa komposit dan kerapatan massa gabungan pengisi/aditif, memungkinkan kita untuk dapat menghitung kandungan pengisi dari formula pencampuran. Akan tetapi nilai validitasnya terbatas, disebabkan kerapatan massa matriks dapat berubah mendekati konsentrasi kritis volume pigmen (*critical pigment volume concentration*) pada perhitungan perubahan kecocokan. Selain itu, ketidakvalidan disebabkan adanya rongga-rongga mikro (*micro-voids*) lebih dari 0,2 g/cm<sup>3</sup>. [33]

$$\rho_c = \frac{\rho_f \rho_m}{\rho_m m_f + \rho_f (1 - m_f)}$$

$$v_f = \frac{m_f}{\rho_f} \rho_c \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana:  $\rho_c$  = kerapatan massa komposit (g/cm<sup>3</sup>)  
 $\rho_f$  = kerapatan massa pengisi (g/cm<sup>3</sup>)  
 $\rho_m$  = kerapatan massa matriks (g/cm<sup>3</sup>)  
 $m_f$  = fraksi massa pengisi  
 $v_f$  = fraksi volume pengisi

Pengukuran kerapatan massa dapat pula dilakukan dengan prinsip perbandingan massa material di udara dengan massa material di dalam air. Massa material di dalam air akan berbeda dengan massanya di udara akibat adanya gaya ke atas (gaya Archimedes). Alatnya ukurnya disebut densitometer.

Densitometer telah dilengkapi dengan timbangan digital analitik yang presisi dengan 5 angka dibelakang koma. Penggunaan densitometer pada pengukuran massa material di air, haruslah air yang digunakan bebas dari gelembung udara (biasanya dipanaskan dahulu) agar pengukuran tersebut akurat.

Langkah-langkah pengukurannya adalah sebagai berikut:

1. Menimbang massa sampel di udara;
2. Menimbang massa penjepit pada air sampai berada dalam keadaan setimbang dan angka tidak berubah-ubah;
3. Menimbang massa sampel beserta penjepit pada air sampai berada dalam keadaan setimbang.

Dari hasil penimbangan tersebut, maka massa sampel di air dapat dihitung dari selisih penimbangan (3) dengan penimbangan (2). Berdasarkan selisih tersebut, maka kerapatan massa sampel bisa diperoleh dari persamaan:

$$\frac{\text{massa sampel di udara}}{\text{massa sampel di air}}$$

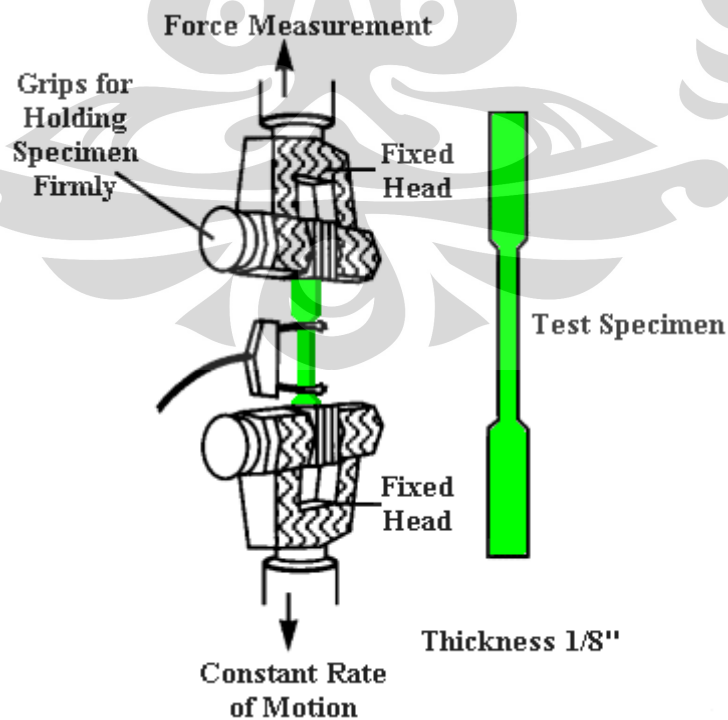
$\rho_{\text{sampel}} =$

$\rho_{\text{air}} \dots\dots\dots (3.4)$

### 3.4.2.2 Pengujian Tarik (Tensile)

Metode pengujian tarik mengacu pada standar ASTM D 638: “*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*” [40]. Sampel yang digunakan adalah spesimen *dog-bone* tipe IV. Kondisi dan hasil pengujian masing-masing sampel dapat dilihat pada Lampiran 3.

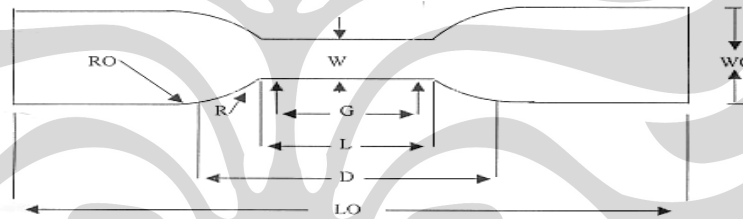
Kemampuan suatu material untuk menahan beban tarik merupakan salah satu sifat yang paling penting dan secara luas dilakukan pengukuran untuk aplikasi struktural. Gaya per satuan luas (MPa atau psi) yang dibutuhkan untuk memustuskan material tersebut yang disebut dengan *ultimate tensile strength* atau *tensile strength at break*. Laju dimana sample ditarik dalam suatu pengujian dapat berkisar antara 0.2 sampai 20 inchi per minute dan akan berpengaruh terhadap hasil. Analogi untuk mengukur sifat kekuatan tarik pada system ISO adalah ISO 527. Tujuan dari Tensile testing adalah mengukur benda uji dan perpanjangannya dimana benda uji mengalami peregangan atau perpanjangan sampai pada titik dimana material mengalami perpatahan. Tensile tests menghasilkan stress-strain diagram, yang digunakan untuk menunjukkan tensile modulus.



**Gambar 3.1** Skema Pengujian Tarik pada plastik

**Tabel 3.9** Dimensi spesimen uji tarik tipe IV.

Dimensi	Tipe IV, mm (in)	Toleransi, mm (in)
W ( <i>width of narrow section</i> )	6 / 0,25	$\pm 0,5$ ( $\pm 0,02$ )
L ( <i>length of narrow section</i> )	33 / 1,30	$\pm 0,5$ ( $\pm 0,02$ )
WO ( <i>width over all, min</i> )	19 / 0,75	+ 6,4 (+ 0,25)
LO ( <i>length over all, min</i> )	115 / 4,50	<i>no max</i>
G ( <i>gage length</i> )	25 / 1,00	$\pm 0,13$ ( $\pm 0,005$ )
D ( <i>distance between grip</i> )	65 / 2,5	$\pm 5$ ( $\pm 0,2$ )
R ( <i>radius of fillet</i> )	14 / 0,56	$\pm 1$ ( $\pm 0,04$ )
RO ( <i>outer radius</i> )	25 / 1,00	$\pm 1$ ( $\pm 0,4$ )



**Gambar 3.2.** Bentuk spesimen uji tarik.

#### Tensile Elongation

*Ultimate elongation* dari *engineering material* merupakan prosentase perpanjangan material yang terjadi sebelum patah akibat tarikan. Nilai ultimate elongation dari beberapa ratus persen adalah umum untuk elastomers dan film/packaging polyolefins. Rigid plastics, khususnya fiber reinforced, memiliki nilai dibawah 5%.

#### 3.4.2.3 Pengujian Tekuk (*Flexural*)

Pengujian tekuk mengacu pada standar ASTM D 790: “*Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*” [40]. Pengujian dilakukan dengan melakukan pembebanan pada 3-titik. Kondisi dan hasil pengujian masing-masing sampel dapat dilihat pada Lampiran 4.

**Tujuan Pengujian :** Untuk mengetahui kekuatan tekuk atau fleksural dari WPC dan menentukan nilai 1%secant Modulusnya.

**Alat :**

1. Zwick/Roell Z005 yang dilengkapi dengan Compression Load Cell & Support Span.
2. Mikrometer dengan ketelitian  $\pm 0.01$  mm

**Standar Pengujian :** ASTM D 790

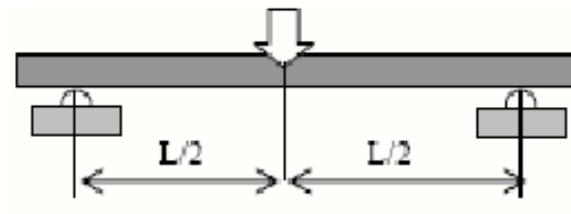
**Sampel**

: Spesimen berbentuk slab

**Gambar 3.3** Skematis pengujian fleksural [41].

**Gambar 3.4** Sampel Pengujian Fleksural

**Kondisi**



**Operasi**

*Grip to grip  
separation*

: 5.4 mm

*Speed Flexural*

*Modulus* : 1.3 mm/min

*Test Speed* : 1.3 mm/min



<i>Force Shutdown Threshold</i>	: 80% F max
<i>Max. Deformation</i>	: 12 mm
Kelembaban	: 50±5% humidity
Temperatur Pengujian	: Temperatur kamar

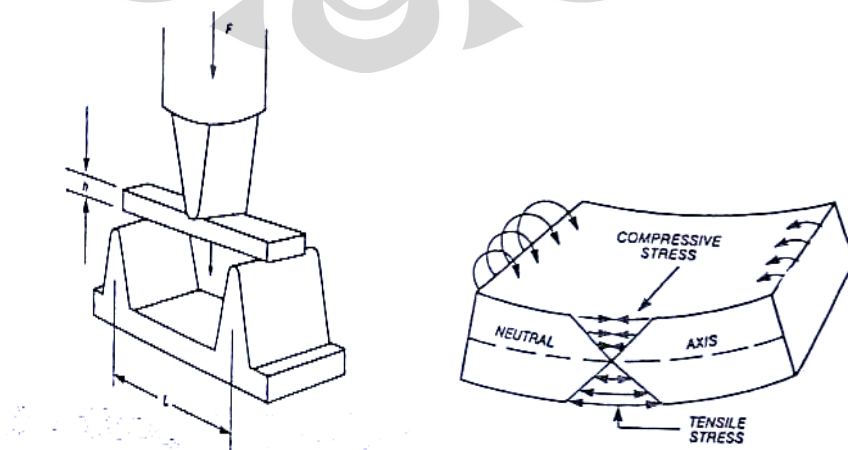
## Prosedur Pengujian

### *Persiapan alat :*

Untuk pengujian fleksural, *Tension Load Cell* dipasang pada sisi bagian atas dan bawah (*Movable and Fix Cross Head*). Berbeda dengan pengujian tarik, *Tension Load Cell* bukan berupa grip penjepit. Kemudian buka *file open program flexure test II ASTM D790.Zp2* dan pilih icon *Startpos* untuk menurunkan *Movable Cross Head* sehingga *Load Cell Hamper* atas mendekati *Fix Cross Head*. Baru selanjutnya pengujian fleksural dapat dilakukan.

### *Pengujian :*

Pada pengujian fleksural, tebal dan lebar juga harus diukur dari tiap 5 spesimen pada 3 titik yang berbeda dan diambil nilai minimumnya sebagai data input komputer dengan ketelitian 0.01 mm. Kemudian tempatkan spesimen pada *Fix Cross Head*. Peletakan spesimen ini harus dilakukan dengan cermat agar penempatannya simetris dan pembebanannya tepat berada di tengah spesimen slap. Kemudian klik *Force 0* dan *Start* pada monitor komputer untuk memulai pengujian. Tunggu beberapa menit lalu catat pembacaan data dan *save* sesuai folder dan nama *sample*. Catat suhu ruang pada saat pengukuran di *log book*.<sup>[43]</sup> Lakukan langkah dan pengaturan yang sama untuk setiap formulasi.



(a)

(b)

**Gambar 3.4** (a) Skematis pengujian tekuk 3-titik, (b) Pembebanan tarik-tekan yang dialami spesimen [22].

#### 3.4.2.4 Pengujian Konduktivitas Listrik

Pengujian konduktivitas listrik komposit pelat bipolar menggunakan standar ASTM D 991 untuk menghitung konduktivitas dalam bidang (*in-plane*) sampel. Rumus untuk menghitung nilai konduktivitas: [2]

$$EC = IL / V w t k \dots\dots\dots (3.5)$$

Dimana:

EC = konduktivitas listrik (S/m)

I = arus listrik (Amps)

L = jarak antara 2 titik tumpu (26 mm)

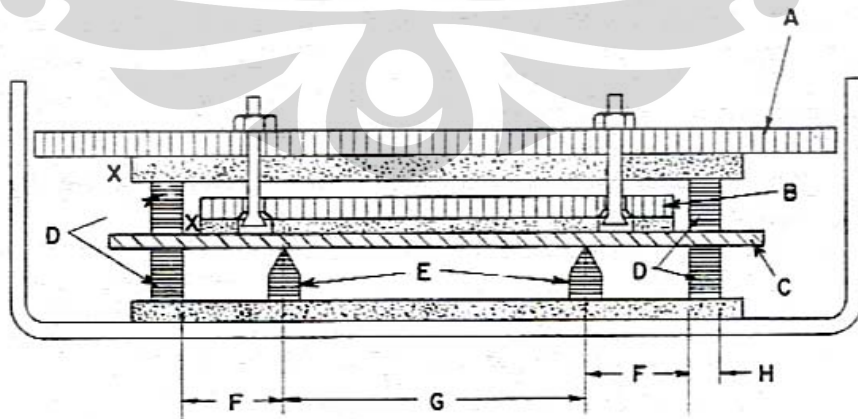
V = tegangan (volt)

w = lebar sampel (mm)

t = ketebalan sampel (mm)

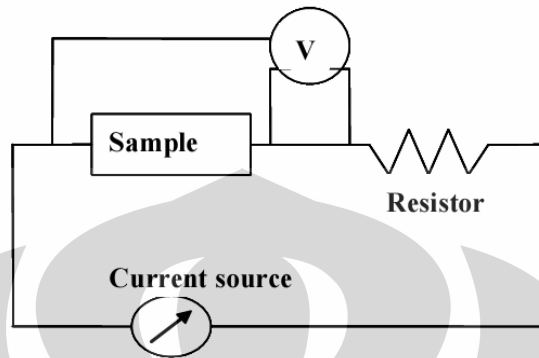
k = 0,001

Gambar 3.6 di bawah ini adalah foto dan diagram alat uji konduktivitas dalam bidang (*in-plane*) sampel. Pada gambar, tanda C adalah spesimen uji, sedangkan tanda D dan E menunjukkan elektroda arus dan tegangan.



**Gambar 3.6** Diagram alat uji konduktivitas dalam bidang (*in-plane*) sampel berdasarkan ASTM D-991 [2].

Gambar di bawah ini mengilustrasikan sirkuit listrik untuk menghitung konduktivitas dalam bidang (*in-plane*) sampel.



**Gambar 3.7** Diagram sirkuit pengukuran konduktivitas listrik <sup>[2]</sup>.

#### **3.4.2.5 Pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM)**

Pengamatan morfologi pada permukaan sampel dilakukan dengan menggunakan SEM. Sampel terlebih dahulu dilapisi dengan emas (Au) agar bersifat konduktif sehingga dapat menghantarkan elektron. Detektor yang digunakan pada SEM adalah detektor elektron sekunder. Tujuan pengamatan adalah untuk mengetahui dispersi bahan pengisi pada matriks dan daya pembasahan matriks terhadap serat karbon. Bagian sampel yang diamati adalah pada permukaan perpatahan uji tarik dan uji tekuk.

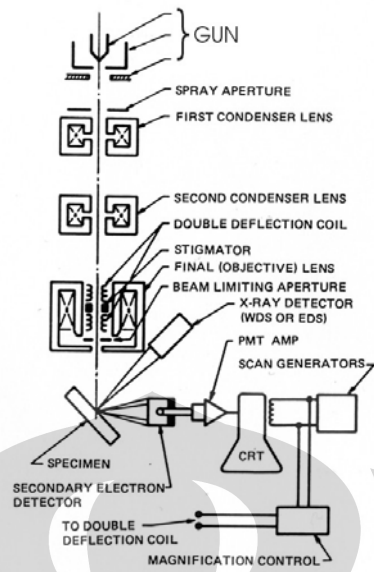


Figure 1.11. Schematic drawing of the electron and x-ray optics of a combined SEM-EPMA.

Gambar 3.8 Diagram alat Scanning Electron Microscope (SEM)

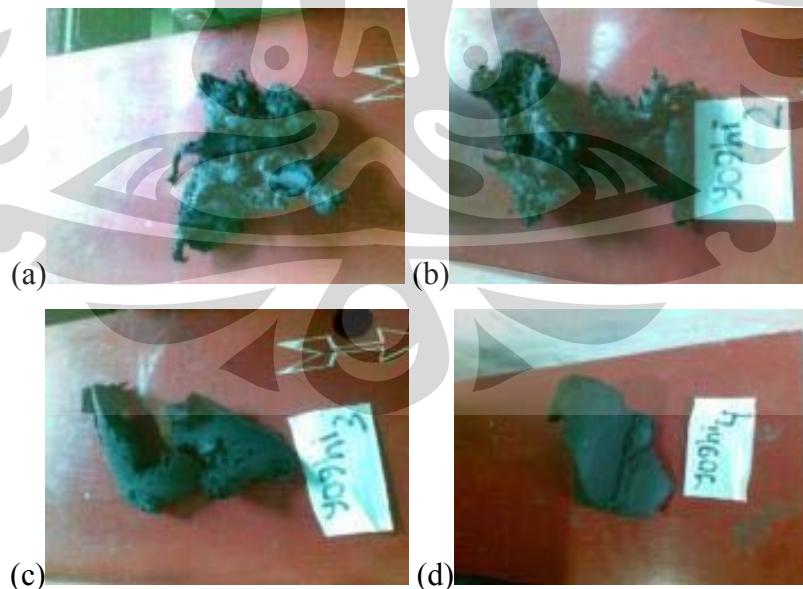
## BAB IV

### HASIL PENELITIAN

#### 4.1 PENGAMATAN VISUAL

##### 4.1.1 Sampel Hasil Pencampuran (*Compounding*)

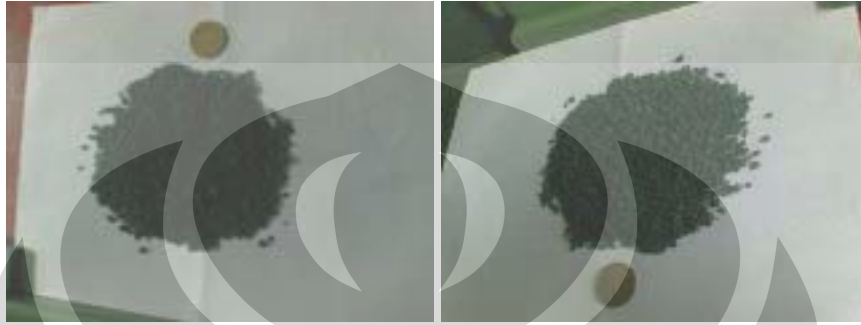
Setelah semua bahan dicampur di *raw mix*, kemudian dilakukan proses *hot blending*. Komposit hasil *hot blending* berbentuk bongkahan padat tidak beraturan, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1. Berdasarkan hasil pengamatan, dua buah formulasi komposit PP-karbon (F2 dan F3) dengan kandungan PP 50 wt% terasa lebih lengket dan ulet. Karena mengandung *polypropylene* yang cukup banyak, lelehan komposit menempel pada ulir (*screw*) mesin Rheocord 90 sehingga sulit diambil hasilnya. Sebaliknya, dua buah formulasi komposit PP-karbon (F4 dan F5) dengan kandungan PP 14 wt% terasa lebih kasar dan rapuh, proses pengambilannya pun mudah. Secara visual dapat diamati pada F2 dan F3 terjadi proses pembasahan (*wetting*) yang lebih sempurna dibandingkan pada F4 dan F5.



**Gambar 4.1** Komposit PP-karbon hasil *hot blending*: (a) F2, (b) F3, (c) F4, dan (d) F5.

#### 4.1.2 Sampel Hasil Penghalusan (*Crushing*)

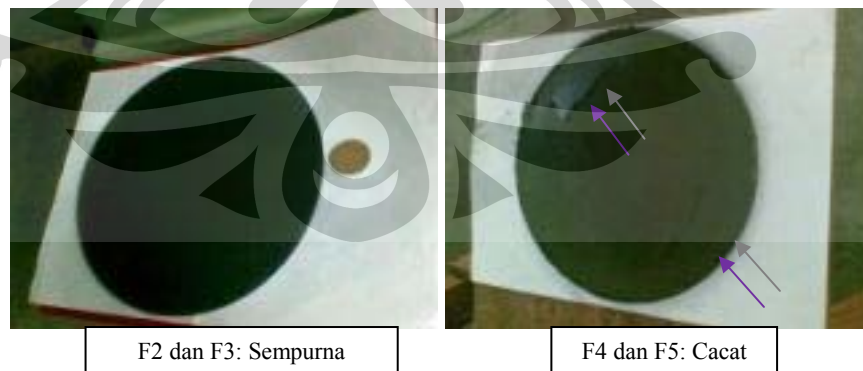
Komposit PP-karbon hasil *crushing* berbentuk butiran dengan berbagai variasi ukuran. Melalui pengamatan visual bentuk fisik formula F2, F3, F4, dan F5 hasil *crushing* adalah sama, tidak ada perbedaan yang signifikan. Yang sedikit berbeda ialah, butiran formula F4 dan F5 banyak yang hancur karena sifatnya lebih getas dari F2 dan F3.



**Gambar 4.2** Bahan komposit PP-karbon berbentuk granula hasil *crushing*.

#### 4.1.3 Sampel Hasil Pencetakan (*Compression Molding*)

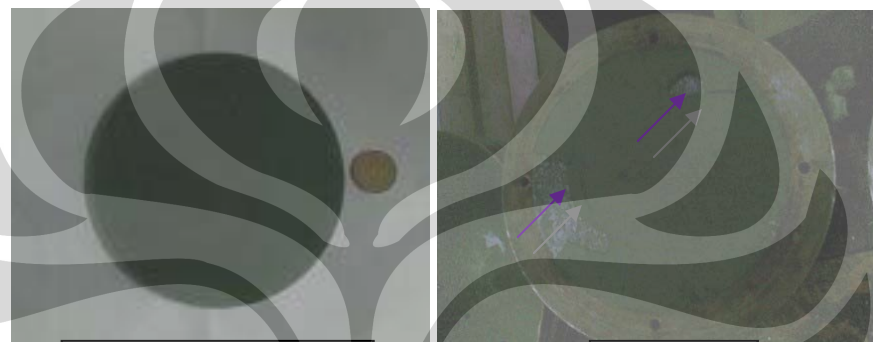
Masing-masing formula komposit dilakukan proses *compression molding* dengan suhu 180<sup>0</sup> selama 45 menit kemudian hasilnya berupa dua buah tipe pelat lingkaran. Pelat tipe I berdiameter 20 cm dengan ketebalan ± 2 mm digunakan untuk uji tarik, sedangkan pelat tipe II berdiameter 14 cm dengan ketebalan ± 4 mm digunakan untuk uji tekuk.





F1: PP murni

**Gambar 4.3** Pelat tipe I hasil *hot press*.



F2, F3, F4: Sempurna

F5: Pecah

**Gambar 4.4** Pelat tipe II hasil *hot press*.

Pelat tipe I dari formula F1, F2, dan F3 berhasil dicetak dengan sempurna, formula F4 masih bisa dibilang cukup baik, sedangkan pelat komposit F5 mengalami keretakan. Pelat hasil *hot press* ada yang sempurna, adapula yang retak dan pecah. Penyebab utama retaknya pelat adalah masih belum ditemukannya *variable* proses mesin (*temperature*, *tekanan*, dan *waktu*) yang tepat, karena butuh *trial and error* yang memerlukan waktu lama dengan bahan yang lebih banyak. Selain itu pelumas (*wax*) dan minyak untuk melumasi cetakan ( *mold*) jenisnya terbatas, bukan spesifik untuk jenis komposit karbon. Penyebab yang ketiga, proses pembukaan  *mold* oleh operator kurang hati-hati. Karena karbon mudah terbakar sehingga menempel erat dengan cetakan, sulit untuk melepaskannya. Pada pencetakan pelat tipe II untuk formula F5, hasil cetakan menempel pada  *mold* sehingga sulit diambil dan akibatnya pelat menjadi pecah berkeping-keping. Secara visual, permukaan pelat komposit dengan kandungan

PP 50 wt% terasa lebih halus dan sempurna, sedangkan permukaan pelat komposit dengan kandungan PP 14 wt% terasa lebih kasar.

#### 4.1.4 Sampel Hasil Pembuatan Spesimen Uji

Hasil pencetakan spesimen uji tarik berbentuk *dog-bone* tipe IV sesuai standar ASTM D 638. Sedangkan spesimen uji tekuk berbentuk persegi panjang sesuai standar ASTM D 790 dengan ketebalan 4 mm.



Gambar 4.5 Spesimen uji tarik tipe IV.



Gambar 4.6 Spesimen uji tekuk.

#### 4.2 PENGUKURAN KERAPATAN MASSA (*DENSITY*)

Salah satu tujuan dari penelitian ini ialah kerapatan massa pelat bipolar komposit harus lebih kecil dari kerapatan massa pelat bipolar grafit murni, agar didapat komponen komposit pelat bipolar yang ringan. Tabel 4.1 dibawah ini menunjukkan hasil pengukuran kerapatan massa komposit berdasarkan Persamaan 3.4, sedangkan pengolahan data secara keseluruhan dapat dilihat pada Lampiran. Kerapatan massa komposit (F2 – F5) berada dalam rentang 0,8867 – 1,1645 g/cm<sup>3</sup>. Dari hasil literature, kerapatan massa dari grafit murni sebesar 2- 2,25



$\text{g/cm}^3$ . Sehingga hasil penelitian ini sesuai target karena didapat nilai kerapatan massa komposit yang jauh lebih kecil dari grafit murni tersebut.

**Tabel 4.1** Nilai kerapatan massa.

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
$\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )	0,901	0,918	0,931	1,165	1,053

#### 4.3 PENGUJIAN TARIK (*TENSILE*)

Pelat bipolar harus mampu menjaga stabilitas mekanik agar dapat mencegah rangkaian *fuel cell* dari kebocoran dan pelat tidak merusak membran. Untuk itu perlu diuji sifat mekaniknya terlebih dahulu. Dari pengujian kuat tarik, didapatkan hasil berupa kuat tarik (*tensile strength*), *elongasi*, dan *modulus elastisitas*. Data yang diperoleh dari pengujian mekanik adalah kurva tegangan-regangan. Dari kurva tegangan-regangan dapat dihitung nilai kekuatan tarik dan modulus tarik. Pengujian tarik mengacu pada standard ASTM D 638. Sampel yang digunakan adalah sampel hasil dari pencetakan injeksi yang berbentuk tulang anjing (*dog-bone*) type I. Sebelum dilakukan pengujian, sampel ini didiamkan sekurangnya 24 jam setelah dicetak.

Kondisi pengujian adalah sebagai berikut.

<i>Pre-load</i>	: 0.1 Mpa
<i>Speed Tensile Modulus</i>	: 50 mm/min
<i>Test Speed</i>	: 50 mm/min
<i>Force Shutdown Threshold</i>	: 80% <i>F max</i>
<i>Grip to grip separation at the start position</i>	: 100 mm

Hasil pengujian tarik setiap komposit disajikan dalam Tabel 4.2 dan 4.3

**Tabel 4.2** Nilai kekuatan tarik (*tensile strength*).

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
$\sigma_T$ (MPa)	25,21	19,08	17,80	14,23	13,81

**Tabel 4.3** Nilai modulus tarik (*tensile modulus*).

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
$E_T$ (GPa)	0,823	2,201	1,712	3,325	3,148

#### 4.3 PENGUJIAN TEKUK (*FLEXURAL*)

Dari pengujian fleksural didapat hasil modulus fleksural yang merupakan parameter ketahanan material terhadap kondisi penekukan. Penekukan dilakukan sampai sampel berdeformasi sebesar 1% dari ketebalannya. Sama seperti pengujian tarik, data yang diambil adalah yang tercatat secara komputerisasi. Berikut ini data hasil pengujian fleksural Pengujian fleksural mengacu pada standard ASTM D 790. Pengujian fleksural yang dilakukan adalah pengujian dengan melakukan pembebanan pada 3 titik. Sampel pada pengujian ini adalah sampel berbentuk balok hasil pencetakan injeksi. Sama seperti pada pengujian kuat tarik, sampel untuk pengujian fleksural ini telah didiamkan selama sekurangnya 24 jam setelah dicetak.

Kondisi pengujian ini adalah sebagai berikut.

*Grip to grip separation* : 54 mm  
*Speed Flexural Modulus* : 1.3 mm/min  
*Test Speed* : 1.3 mm/min  
*Force Shutdown Threshold* : 80%  $F_{max}$   
*Max. Deformation* : 12 mm

**Tabel 4.4** Nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*).

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
$\sigma_F$ (MPa)	41,24	35,12	31,09	30,11	29,69

**Tabel 4.5** Nilai modulus tekuk (*flexural modulus*).

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
$E_F$ (GPa)	1,158	2,800	2,550	6,010	5,103

#### 4.4 PENGUJIAN KONDUKTIVITAS LISTRIK (*CONDUCTIVITY*)

Syarat utama komposit pelat bipolar dapat diaplikasikan pada *fuel cell* ialah terpenuhinya sifat konduktivitas listrik. Untuk mengetahui nilai konduktivitas listrik penelitian ini, maka dilakukan pengujian konduktivitas listrik dengan hasil Tabel 4.6 sebagai berikut.

**Tabel 4.6** Nilai konduktivitas listrik.

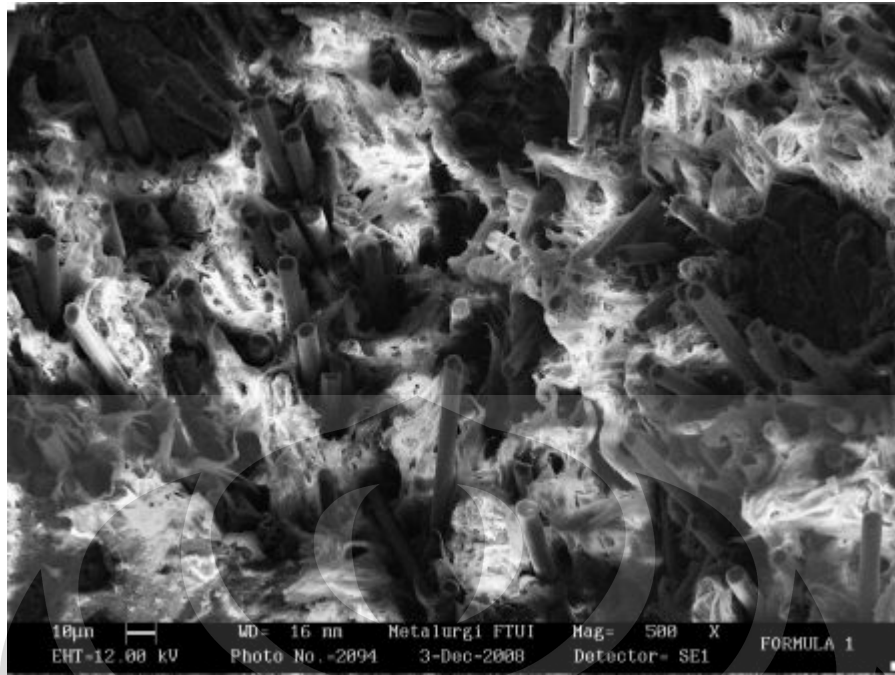
Kode Sampel	Konduktivitas (S/cm)
F1	$1,00 \times 10^{-14}$
F2	$1,1 \times 10^{-3}$
F3	$5,2 \times 10^{-6}$
F4	1,304
F5	8,547

#### 4.5 PENGAMATAN SEM (*SCANNING ELECTRON MICROSCOPE*)

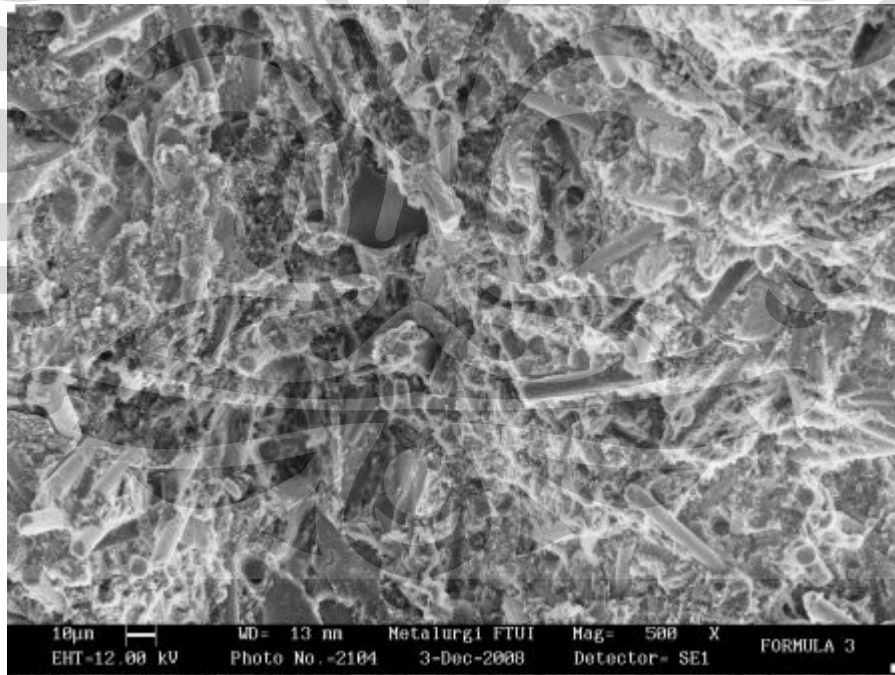
Pengamatan permukaan patahan sampel dilakukan dengan menggunakan SEM pada Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Patahan sampel yang diamati adalah sampel dari hasil uji tarik dan uji tekuk yang diberi perlakuan pelapisan tipis dengan emas (Au) dan palladium (Pd) agar menjadi konduktif sehingga dapat menghantarkan elektron. Detektor yang digunakan pada SEM adalah detektor elektron sekunder. Tujuan pengamatan patahan tersebut adalah untuk melihat ikatan antarmuka yang terjadi pada beberapa sampel komposit karbon.

Dari hasil seluruh pengujian mekanik, terlihat penambahan PP-g-MA pada sistem komposit karbon mempengaruhi beberapa sifat mekanik secara signifikan dan beberapa sifat tidak terlihat mengalami perubahan yang berarti. Untuk membuktikan hasil pengujian mekanik, maka dilakukan pengamatan SEM pada permukaan patahan pengujian tarik dan pengujian tekuk. Berikut ini gambar permukaan patahan sampel hasil uji tekuk.

##### 4.5.1 Pengamatan SEM pada perbesaran 500x patahan akibat beban tarik

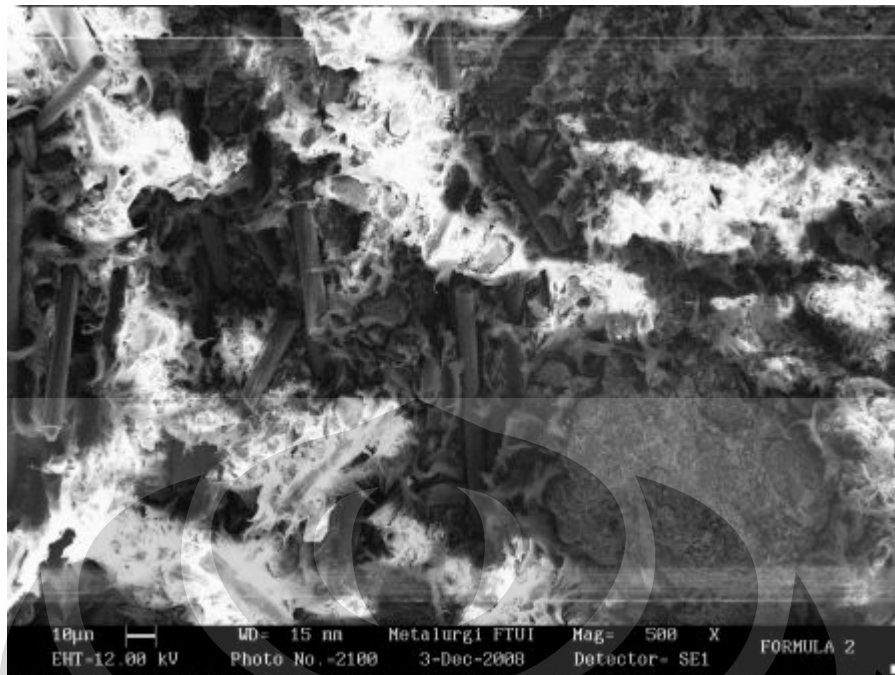


**Gambar 4.7** Pengamatan SEM Formula 2 (44 wt%C)

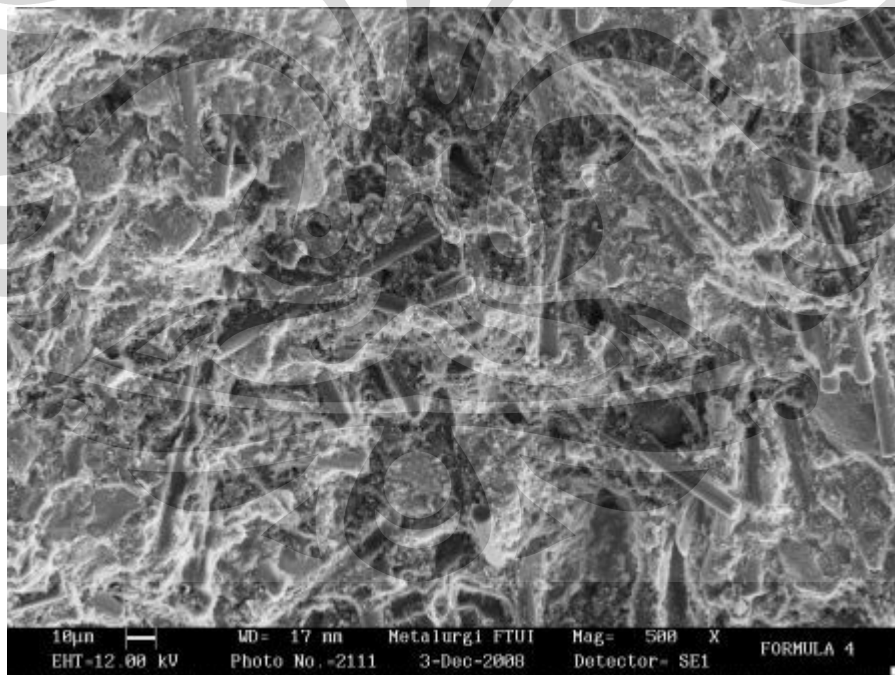


**Gambar 4.9** Pengamatan SEM Formula 4 (80 wt%C)

#### ***4.5.2 Pengamatan SEM pada perbesaran 500x patahan akibat beban tekuk***



**Gambar 4.8** Pengamatan SEM Formula 3 (44 wt%C)



**Gambar 4.10** Pengamatan SEM Formula 5 (80 wt%C)

## BAB V

# PEMBAHASAN

## 5.1 PENGUJIAN KERAPATAN MASSA

### 5.1.1 Hasil Pengukuran Kerapatan Massa (*Density*)

Tabel 5.1 Nilai Kerapatan Massa masing-masing formula.

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,901	0,918	0,931	1,165	1,053

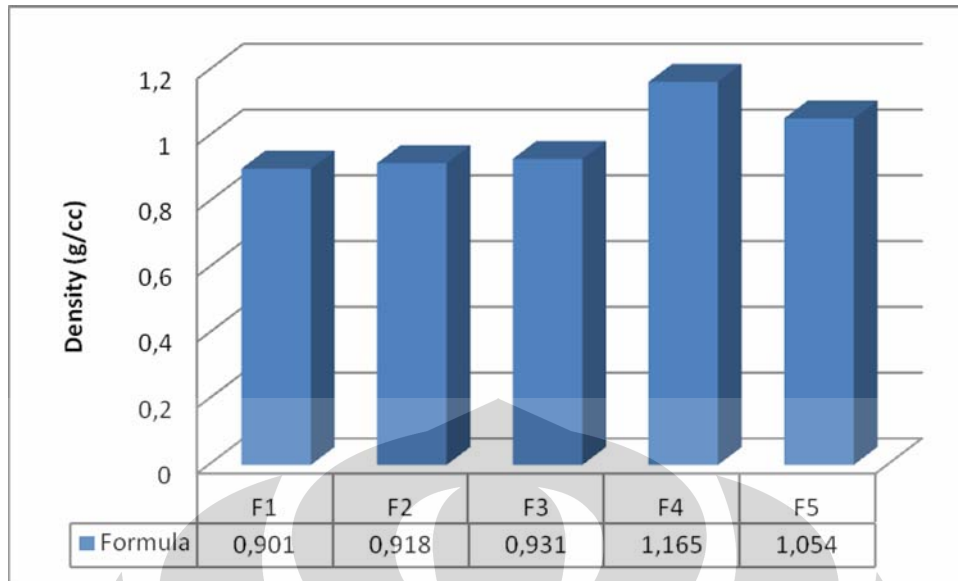
Tabel 5.2 Nilai Kerapatan Massa Literature.

Material	Kerapatan (gr/cm <sup>3</sup> )
Polypropylene	0,9
Karbon hitam	1,7 – 1,9
Grafit	2 – 2,5
Serat karbon	1,8
PP-g-MA	1,48
Komposit PP-karbon	1,13 – 1,17

Reduksi berat dari pelat bipolar merupakan salah satu kunci utama dari keberhasilan penelitian ini. Perbedaan nilai kerapatan massa bergantung dari tipe *filler* dan konsentrasinya didalam komposit.

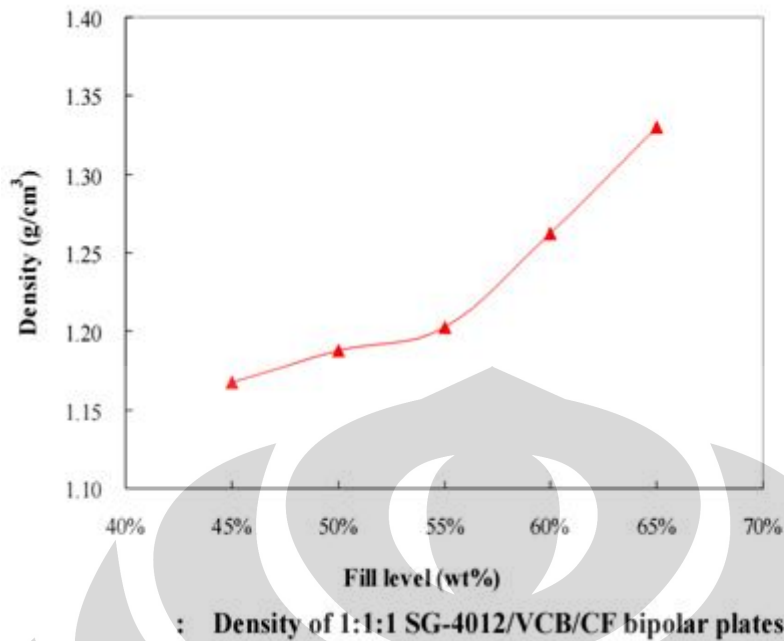
Dengan komposisi *filler* karbon sebagai berikut:

- Formula F1: 0 wt%C
- Formula F2: 44 wt%C
- Formula F3: 44 wt%C
- Formula F4: 80 wt%C
- Formula F5: 80 wt%C



**Gambar 5.1** Grafik perbandingan kerapatan massa setiap formulasi komposit.

Bila dilihat dari grafik gambar 5.1, semakin banyak *filler* maka semakin bertambah pula nilai kerapatan massanya. Dimana kandungan *filler* formula F2 dan F3 ialah 44 wt%C, dan formula F4 dan F5 ialah 80 wt%C. Nilai kerapatan massa terkecil ialah pada formula F2 dimana komposisi *filler* karbon: serat karbon 22%, karbon hitam 22% yaitu sebesar 0,918 g/cm<sup>3</sup>. Sedangkan nilai terbesar pada formula F4 dengan komposisi *filler* karbon: serat karbon 15%, karbon hitam 20%, grafit 9% yaitu sebesar 1,165 g/cm<sup>3</sup>. Bila dibandingkan dengan literature komposit PP-karbon 1,13 – 1,17 g/cm<sup>3</sup>,<sup>[2]</sup> hasil ini memperlihatkan bahwa termoplastik konduktif dari penelitian ini memenuhi target untuk aplikasi pelat bipolar karena nilai kerapatan massanya yang rendah.



**Gambar 5.2** Grafik linier kerapatan massa literatur komposit PP-karbon. [2]

## 5.2 Hasil Pengujian Tarik (*Tensile*)

Tujuan pengujian tarik ini ialah untuk mengetahui seberapa besar kekuatan komposit dapat menerima beban minimal hingga terjadi deformasi plastis. Selain itu juga untuk mengetahui seberapa baiknya ikatan antarmuka dan antarfasa antara matriks polypropylene dengan *filler* karbon yang dipengaruhi oleh *compatibilizer* PP-g-MA dimana kemampuan pembasahan sangat berperan penting [21]. Umumnya penambahan pengisi bertujuan untuk meningkatkan kekuatan. Semakin banyak fraksi volume pengisi yang ditambahkan kedalam matriks komposit, maka kekuatan komposit akan semakin bertambah.

Data yang diperoleh dari pengujian tarik adalah kurva tegangan-regangan, dimana dari kurva tersebut dapat dihitung nilai kekuatan tarik, ketangguhan, keuletan, dan kekakuan. Berdasarkan literature pengujian tarik seharusnya penambahan komposisi pengisi karbon membuat nilai kekakuan komposit karbon semakin meningkat dan dibutuhkan tegangan yang lebih besar untuk mencapai titik luluhnya. Pertambahan panjang yang terjadi, menunjukkan kecenderungan yang semakin kecil, hingga titik luluh, walaupun perubahan nilainya tidak berpola.

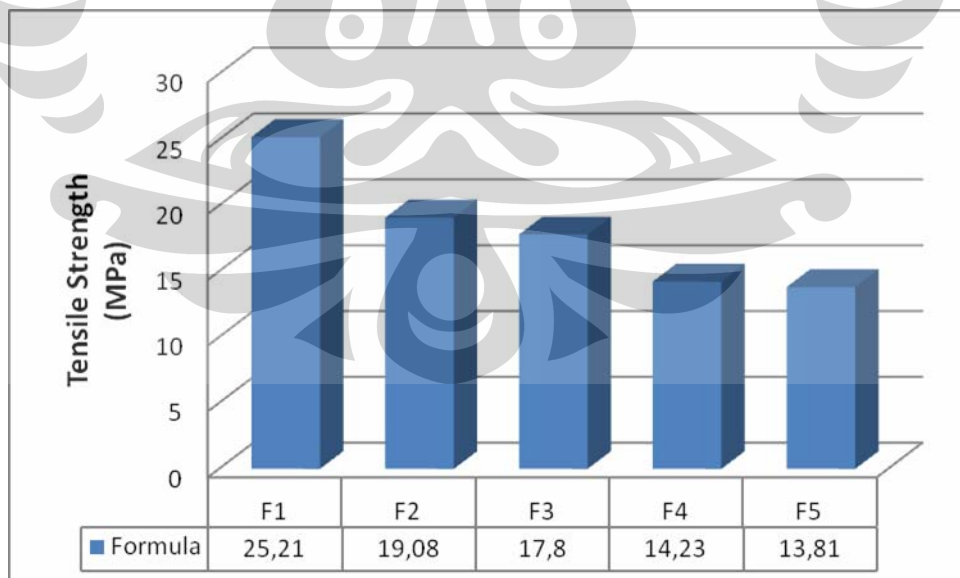


Matriks polypropylene bersifat nonpolar. *Compatibilizer* PP-g-MA bekerja dengan cara yaitu maleic anhydrite (-MA) yang bersifat polar mengikat gugus –OH atau –ester dari *filler*, sedangkan PP-g mengikat dengan polipropylene. Karbon bersifat nonpolar. Selain itu, karena karbon tidak mempunyai gugus –OH maupun –ester, maka ikatan yang terjadi dengan polypropylene hanyalah menempel antarmuka saja (terperangkap) tidak sampai mengikat secara kimiawi. Peran PP-g-MA disini hanya bersifat merekatkan tanpa meningkatkan kemampuan *wetability* antara matriks polypropylene dengan *filler* karbon. Pengaturan kecepatan penarikan pada pengujian tarik ini yaitu 5 mm/menit. Dikarenakan sifat komposit yang getas, proses pemuluran tidak jelas terlihat pada kurva tegangan regangan dan spesimen langsung patah setelah beberapa saat melewati titik luluhnya. Berikut ialah tabel hasil pengujian tarik:

**Tabel 5.3** Nilai kekuatan tarik (*tensile strength*).

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
$\sigma_T$ (MPa)	25,21	19,08	17,80	14,23	13,81

Dari gambar 5.3 bisa dilihat semakin bertambahnya fraksi volume karbon, kekuatan tarik justru menurun.



**Gambar 5.3** Grafik perbandingan kekuatan tarik setiap formulasi komposit.

Keterangan:

F1. Komposisi *filler* karbon: 0%.

F2. Komposisi *filler* karbon: serat karbon 22%, karbon hitam 22%.

F3. Komposisi *filler* karbon: serat karbon 15%, karbon hitam 20%, grafit 9%.

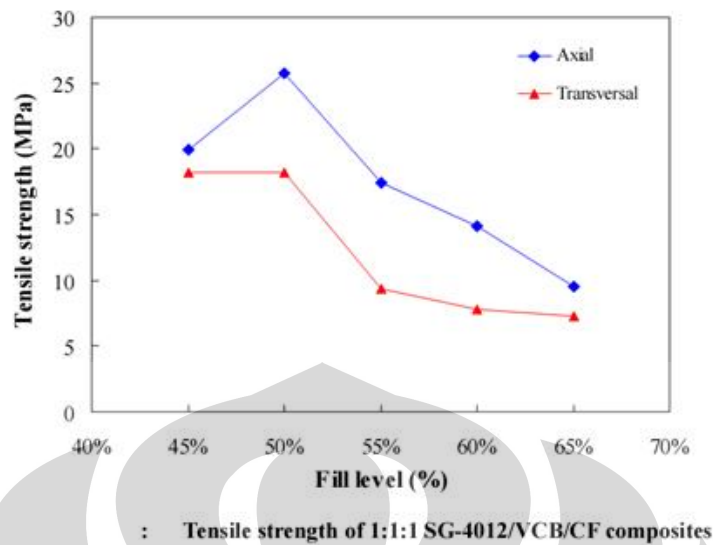
F4. Komposisi *filler* karbon: serat karbon 25%, karbon hitam 30%, grafit 25%.

F5. Komposisi *filler* karbon: serat karbon 20%, karbon hitam 40%, grafit 20%.

Nilai yang diinginkan untuk kemudian diolah dari pengujian ini adalah data *Tensile Strength* (TS) dan *Modulus of Elasticity* (MOE). Kesimpulan hasil pengujian kuat tarik pada sampel PP-murni, PP-karbon 14 wt%C, dan PP-karbon 80 wt%C ditunjukkan pada tabel 5.3. Data dan grafik 5.3 pengujian kuat tarik dari PP-murni (F1) akan menjadi pembanding bagi keempat formula lainnya (F2, F3, F4, dan F5) yaitu sejauh mana keberhasilan proses penelitian ini diantara keempat formula tersebut dalam memberikan sifat mekanis yang diinginkan untuk membuat pelat bipolar pada aplikasi *fuel cell*.

Hasil pengujian tarik diperoleh nilai kuat tarik semua formula komposit karbon lebih rendah daripada kuat tarik PP murni, yaitu 25,1 MPa. Hal ini disebabkan ikatan antarmuka yang tidak baik, sehingga keberadaan pengisi karbon tidak bersifat menguatkan, melainkan melemahkan.

Pada komposit karbon formula F2 dan F3 (konsentrasi pengisi 44 wt% karbon), kekuatan tariknya masih lebih tinggi bila dibandingkan formula F4 dan F5 (konsentrasi pengisi 80 wt% karbon). Sedangkan kekuatan tarik yang paling tinggi ialah formula F3, yaitu 19,08 MPa dimana komposisi pengisi karbonnya terdiri dari: serat karbon 15%, karbon hitam 20%, grafit 9%.



**Gambar 5.4** Grafik linier kekuatan tarik literatur komposit PP-karbon. [2]

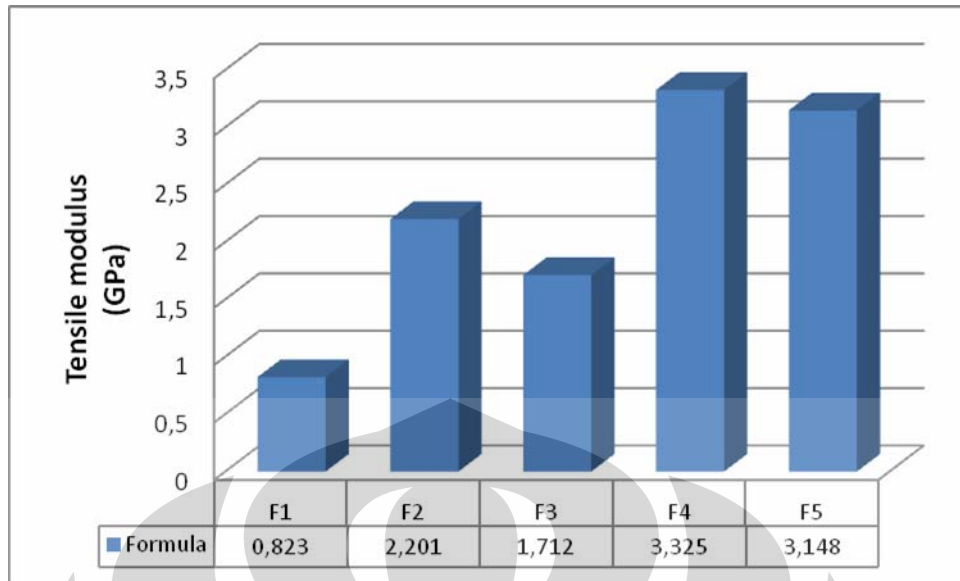
Secara keseluruhan dapat dilihat bahwa penambahan konsentrasi karbon cenderung menurunkan kekuatan tarik komposit. Kekuatan tarik komposit jauh lebih kecil dari kekuatan tarik polipropilena (F1). Dampak dari semakin banyaknya persentase pengisi karbon yang dipakai dalam komposit karbon adalah semakin berkurangnya kemampuan matriks untuk mentransfer tegangan hasil pembebanan dari luar ke pengisi [25]. Dengan demikian, derajat kekuatan akan menurun. Semakin banyaknya campuran antara matriks PP dengan pengisi karbon yang tidak sempurna terbentuk, menyebabkan jarak antara satu gumpalan dengan yang lainnya tidak beraturan, sehingga terlihat transfer tegangan yang seharusnya terjadi menjadi terkumpul dititik-titik tertentu menyebabkan *stress concentration*. Aditif PP-g-MA kurang optimum sebagai *compatibilizer*, ini mempengaruhi karakteristik mekanik komposit karbon. Selain itu proses *rheomix* yang kurang sempurna juga bisa menjadi salah satu penyebabnya. Kontak yang baik terjadi apabila seluruh bagian serat terbasahi oleh matriks. Pembasahan dapat terjadi apabila perbedaan energi permukaan antara pengisi dan matriks relatif kecil. Besar energi permukaan itu sendiri dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya kepolaran.

Seperti poliolefin pada umumnya, polipropilena (PP) yang belum mengalami perlakuan tertentu memiliki energi permukaan yang relatif rendah

karena sifatnya yang nonpolar. Sedangkan gugus –MA pada PP-g-MA yang digunakan sebagai *compatibilizer* komposit, memiliki kepolaran yang tinggi, sehingga tegangan permukaannya tinggi. Apabila PP akan dijadikan komposit dengan bahan penguat karbon yang bersifat nonpolar, tentunya tidak akan terbentuk komposit yang baik karena tidak dapat terjadi pembasahan yang baik. Tujuan awal matriks polipropilen yang non-polar membutuhkan *compatibilizer* ialah guna memungkinkan terjadinya kontak antara PP dengan lapisan karbon. Maka dilakukan penambahan kopolimer PP *grafted Maleic Anhydride* (PP-g-MA) sebesar 5%. Namun karena gugus –MA yg polar, justru melemahkan pembasahan antara PP dengan karbon yang mengakibatkan menurunnya nilai kekuatan tariknya <sup>[20]</sup>. Perlu adanya satu lagi sampel komposit PP-karbon tanpa aditif PP-g-MA agar dapat dibandingkan hasilnya. Selain itu juga diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai parameter penambahan % aditif PP-g-MA yang tepat (untuk kadar *filler* karbon tetap). Salah satu solusi untuk mengatasi masalah ini ialah dengan mencari aditif lain yang lebih sesuai dengan *filler* karbon, dengan cara memperkecil ukuran pengisi karbon menjadi skala nano agar penyebarannya didalam matriks lebih merata, perlakuan fluorinasi karbon untuk mengurangi sifat inert terhadap matriks PP, dan *vacuum* pada proses *hot blending* untuk menghindari terjebaknya udara yang dapat menyebabkan *void*. Secara teori, peningkatan konsentrasi pengisi seharusnya meningkatkan sifat mekanik dari komposit. Karbon dapat menyerap energi pembebanan, sehingga ketika diberi pembebanan diperlukan energi lebih banyak untuk memulai terjadinya retak pada komposit <sup>[24]</sup>.

**Tabel 5.4** Nilai modulus tarik (*tensile modulus*).

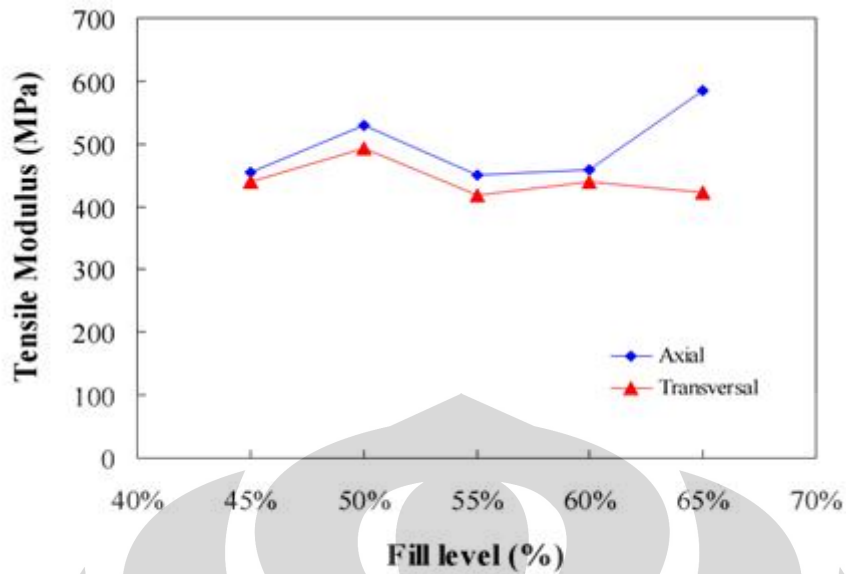
Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
<b>E<sub>T</sub> (GPa)</b>	2,201	1,712	3,325	3,148	0,823



**Gambar 5.5** Grafik perbandingan modulus tarik setiap formulasi komposit.

Dari gambar 5.5 Terlihat bahwa komposit karbon formula F4 dan F5 dengan penambahan pengisi 80%wt karbon mengalami peningkatan kekakuan yang signifikan karena memang sifat *filler* karbon yang kaku sangat mempengaruhi kekakuan komposit secara linier. Sampel formula F4 dimana komposisi *filler* karbon: serat karbon 25%, karbon hitam 30%, grafit 25% memiliki modulus elastisitas tertinggi sebesar 3,325 GPa, jauh lebih besar daripada sampel PP, yaitu 0,823 GPa. Hasil ini sangatlah baik karena memang dibutuhkan kekakuan yang tinggi agar pelat bipolar dapat diaplikasikan pada *fuel cell* tujuannya agar sirkulasi elektron tetap berjalan dengan baik walaupun terjadi benturan pada mesin <sup>[2]</sup>.

Seperti dijelaskan sebelumnya, bahwa antarmuka pada komposit serat berfungsi sebagai penerus beban antara matriks dan serat. Oleh karena itu, maka matriks dan penguat harus dalam keadaan kontak yang baik sekali. Kontak yang baik terjadi apabila seluruh bagian serat terbasahi dengan oleh matriks. Pembasahan dapat terjadi apabila perbedaan energi permukaan antara pengisi dan matriks relatif kecil <sup>[23]</sup>.



: Tensile modulus of 1:1:1 SG-4012/VCB/CF composites

**Gambar 5.6** Grafik linier modulus tarik literatur komposit PP-karbon. <sup>[2]</sup>

Namun, nilai kekakuan yang terlalu tinggi menjadi tidak baik bila menyebabkan komposit menjadi getas. Dari grafik gambar 5.5 terlihat data modulus tarik bahwa penambahan karbon cenderung meningkatkan kekakuan, sehingga data tersebut seolah-olah menunjukkan penambahan karbon menyebabkan kegetasan pada komposit. Ketika energi yang diterima matriks PP telah memungkinkan terjadinya retak, maka retak dengan cepat akan merambat sampai terjadi failure <sup>[21]</sup>. Hal ini dikarenakan PP bersifat cukup getas. Jika terdapat retak maka perambatannya akan terjadi dengan sangat mudah. Penyebab getasnya komposit ini juga disebabkan karena di dalam komposit terdapat banyak rongga-rongga mikro (*micro-voids*), sehingga komposit menjadi rapuh. *Micro-voids* dalam komposit dapat dilihat langsung secara visual. Rongga-rongga mikro tersebut dapat menjadi titik konsentrasi tegangan (*stress concentration*) ketika spesimen uji dikenakan pembebanan sehingga perpatahan mudah terjadi.

Adhesi yang kurang baik menjadikan matriks PP tidak membasahi permukaan pengisi karbon dengan sempurna, sehingga memungkinkan terdapat celah-celah mikro pada antarmuka. Adanya celah-celah mikro pada antarmuka menjadikan material kehilangan kekakuannya karena mudah terdeformasi, yang mana terlihat dari nilai modulus elastisitas. Pada umumnya

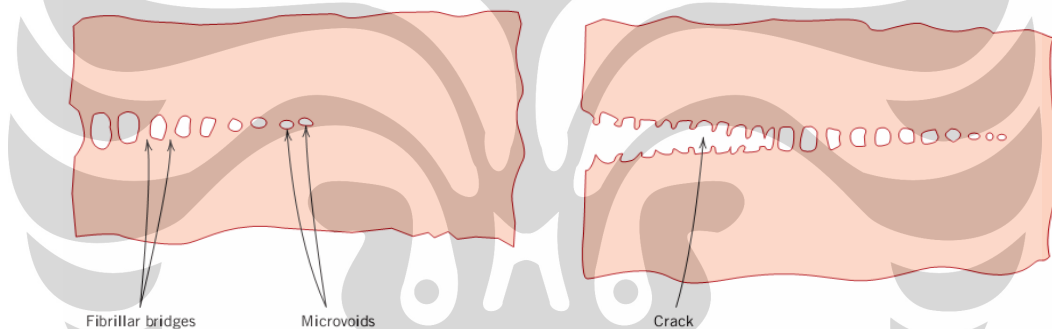
elongasi berkebalikan dengan modulus elastisitas, semakin rendah modulus elastisitas maka semakin tinggi elongasi. Sebagaimana hukum Hooke yang biasanya ditulis dengan rumus sebagai berikut:

$$\sigma = E \varepsilon$$

sehingga, besar elongasi ialah:

$$\varepsilon = E / \sigma$$

Suatu fenomena yang mendahului perpatahan pada beberapa polimer termoplastik adalah terbentuknya *craze*. Kegagalan pada polimer terjadi melalui tahap *crazing*. Pada tahap ini terjadi pengembangan rongga-rongga mikro dan terhubung menjadi satu. Rongga-rongga mikro yang tergabung mulai membentuk retak yang akhirnya menyebabkan perpatahan [27]. Gambar 5.7 berikut ini menunjukkan gambaran skematik dari fenomena *craze*.



**Gambar 5.7** Gambaran skematik dari *craze* yang menunjukkan rongga-rongga mikro dan jembatan *fibrillar* kemudian diikuti oleh retak (*crack*) [27].

Terbentuknya rongga-rongga mikro dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya karena tingginya viskositas campuran sehingga kemampuan alirnya rendah dan ketika dicetak kepadatannya tidak merata, granula komposit hasil *crushing* menyerap *moistur* karena bersifat higroskopis. *Moistur* yang terperangkap ketika sampel dicetak membentuk *bubble* (gelembung-gelembung udara), gelembung-gelembung inilah yang menjadi awal terbentuknya rongga-rongga mikro. Solusi untuk mencegah terbentuknya rongga adalah granula harus dikeringkan terlebih dahulu di dalam oven pada suhu 110 °C selama 24 jam sebelum dicetak agar kandungan *moisturnya* hilang.

Modulus elastisitas berhubungan dengan kekakuan atau kekerasan material. Kekerasan yang tinggi akan mengakibatkan material menjadi getas. Umumnya, polimer akan menjadi *brittle* (getas) dengan adanya penambahan *filler* atau aditif anorganik. Suatu jurnal menyatakan bahwa modulus elastisitas cenderung naik dengan penambahan berapa pun inklusi.

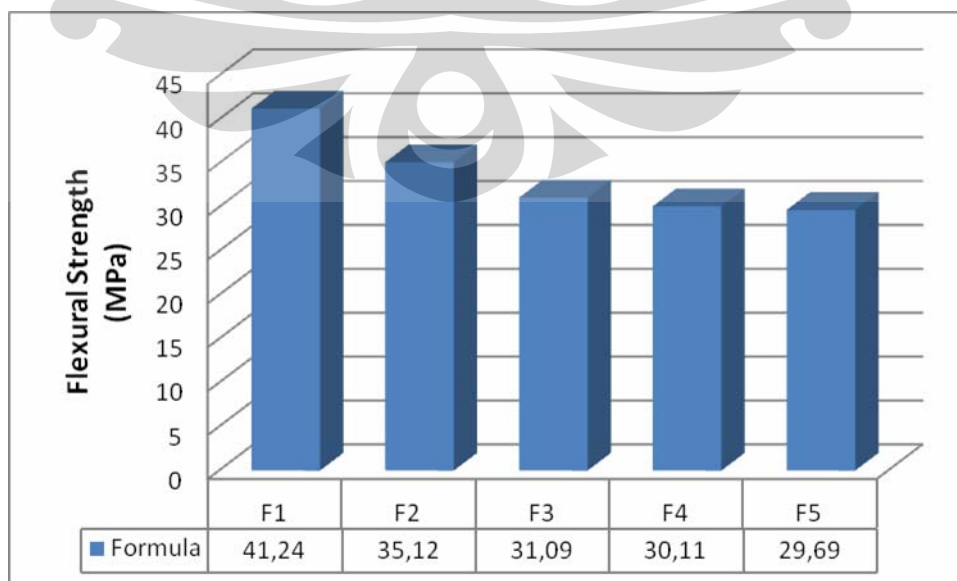
Sebagai nilai intrinsik material, modulus elastisitas hanya dipengaruhi jika struktur molekulnya berubah. Berapapun penambahan pengisi karbon tidak akan merubah struktur molekul tetapi akan memberikan *interface* antara pengisi karbon dengan matriks PP. Pada sebagian besar sistem umumnya, daerah sekitar inklusi (*interface*) akan menjadi daerah dengan modulus yang tinggi.

### 5.3 Hasil Pengujian Tekuk

**Tabel 5.5** Nilai kekuatan tekuk (*flexural strength*).

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
$\sigma_F$ (MPa)	41,24	35,12	31,09	30,11	29,69

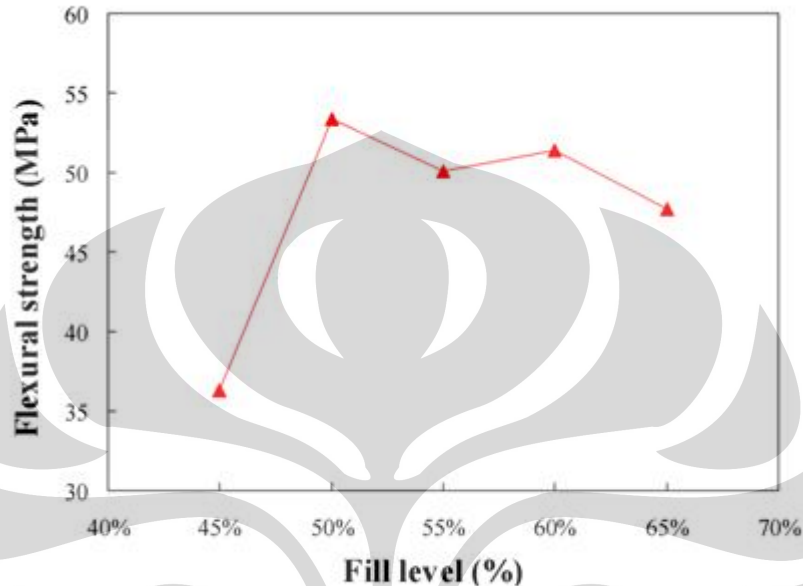
Dari table 5.5 di atas, terlihat bahwa formula F2 dengan komposisi *filler* karbon: serat karbon 22%, karbon hitam 22% memiliki nilai kekuatan tekuk paling besar, yaitu 35,12 MPa hampir sama dengan PP-murni 41,24 MPa. Sedangkan nilai kekuatan tekuk ketiga formula lainnya (F3, F4, dan F5) hanya sedikit sekali perbedaannya. Semakin besar nilai kekuatan tekuk maka komposit karbon akan semakin kaku.





**Gambar 5.8** Grafik perbandingan kekuatan tekuk setiap formulasi komposit.

Gambar 5.8 menunjukkan dengan penambahan pengisi karbon menyebabkan kekuatan fleksural rata-rata berkurang sedikit menjadi 31,09 MPa; 30,11 MPa; dan 29,69 Mpa.



: Flexural strength of 1:1:1 SG-4012/VCB/CF composites

**Gambar 5.9** Grafik linier kekuatan tekuk literatur komposit PP-karbon. <sup>[2]</sup>

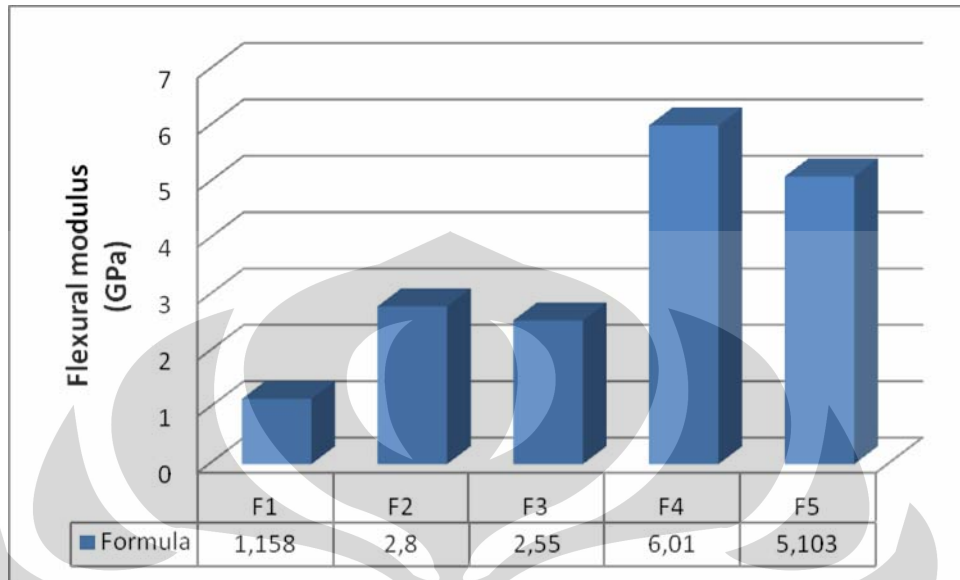
Penambahan pengisi karbon terutama grafit telah menyebabkan komposit karbon mengalami penurunan nilai kekuatan tekuk, karena adhesi yang kurang baik menyebabkan terjadinya celah-celah mikro pada antarmuka sehingga mudah terdeformasi dengan beban yang lebih rendah, akibatnya nilai kuat tekuk menjadi turun.

**Tabel 5.6** Nilai modulus tekuk (*flexural modulus*).

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
$E_F$ (GPa)	1,158	2,800	2,550	6,010	5,103

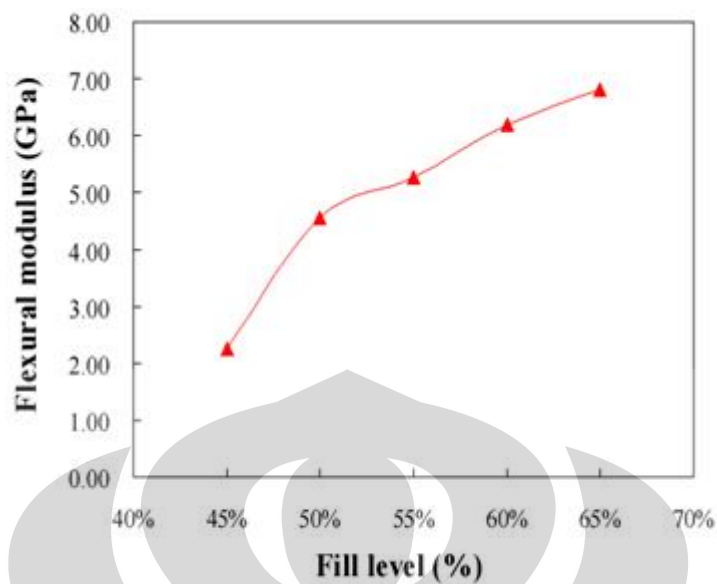
Dari table 5.6 bisa dilihat bahwa nilai modulus tekuk terbesar ialah formula F4 dengan komposisi *filler* karbon: serat karbon 25%, karbon hitam 30%, grafit 25% yaitu sebesar 6,010 GPa. Formula F4 ini memiliki kandungan pengisi

serat karbon dan grafit yang paling banyak dibandingkan formula lain, inilah yang menyebabkan nilai modulus tekuknya paling besar.



**Gambar 5.10** Grafik perbandingan modulus tekuk setiap formulasi komposit.

Seperti diketahui, grafit sintetik memiliki partikel yang lebih besar dibanding karbon hitam dan serat karbon. Sehingga kemungkinan terjadinya celah-celah mikro tersebut menjadi lebih besar. Hal yang bisa dilihat dari grafik modulus ialah lebih memperhatikan kekakuannya, semakin besar modulus berarti komposit semakin kaku. Yaitu suatu nilai yang menunjukkan seberapa besar kemampuan komposit bila diaplikasikan untuk pelat bipolar dalam mempertahankan bentuk hingga beban tertentu. Sifat kelenturan komposit menerima beban yg menimbulkan deformasi tegangan, dimana penyebaran arah tegangan diteruskan ke *filler*.



: Flexural modulus of 1:1:1 SG-4012/VCB/CF composites

**Gambar 5.11** Grafik linier modulus tekuk literatur komposit PP-karbon. <sup>[2]</sup>

#### 5.4 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik

Tujuan utama dari penelitian ini ialah mencari efek sinergis terbaik komposisi *filler* karbon (karbon hitam, serat karbon, dan grafit sintetik) dari masing-masing formula terhadap nilai konduktivitas listrik untuk aplikasi pelat bipolar pada *polymer electrolyte membrane fuel cells* (PEM-Fuel Cell). Tabel 5.7 menunjukkan komposit PP-Karbon dengan variasi *filler* karbon berhubungan erat dengan nilai konduktivitas listrik. Formula F2 dan F3 yang hanya mengandung 44 wt% karbon mempunyai nilai konduktivitas listrik yang sangat kecil ( $F2 = 1,1 \times 10^{-3}$  dan  $F3 = 5,2 \times 10^{-6}$ ) tidak jauh berbeda dengan polypropylene murni dimana nilai konduktivitas listriknya sekitar  $10^{-4} - 10^{-17}$  S/cm. Sedangkan Formula F4 dan F5 dengan kandungan *filler* 80 wt% karbon baru dapat memperlihatkan adanya kemampuan komposit PP-karbon untuk mengaliri listrik.

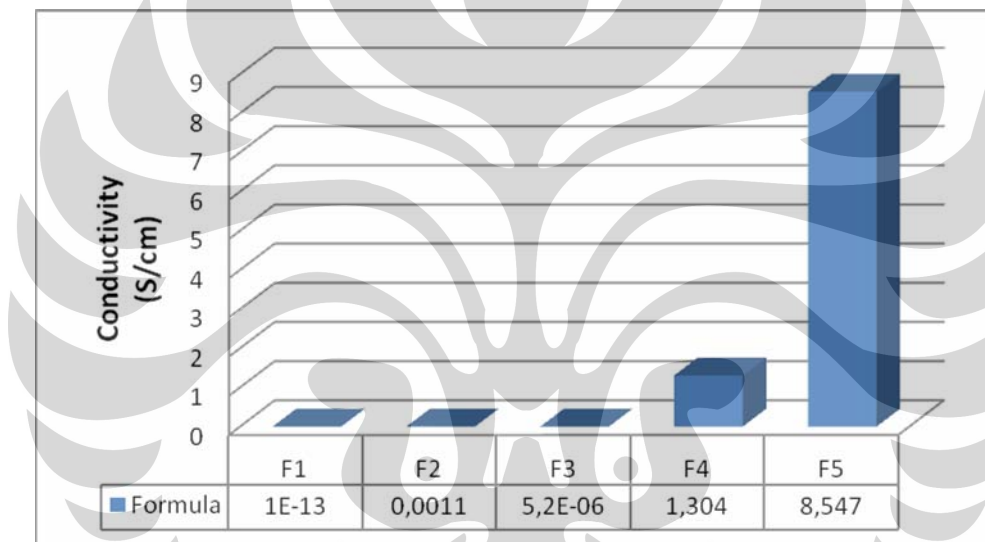
**Tabel 5.7** Nilai konduktivitas listrik.

Kode Sampel	Konduktivitas (S/cm)
F1	$1,00 \times 10^{-14}$

<b>F2</b>	$1,1 \times 10^{-3}$
<b>F3</b>	$5,2 \times 10^{-6}$
<b>F4</b>	1,304
<b>F5</b>	8,547

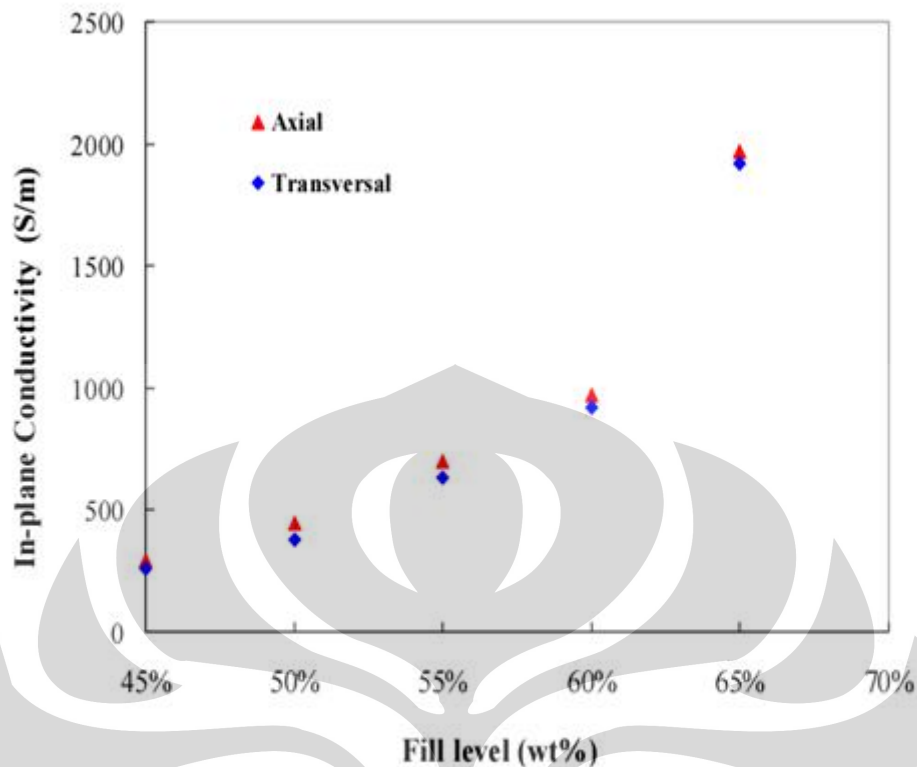
**Tabel 5.8** Nilai konduktivitas listrik literature.

<b>Material</b>	<b>Konduktivitas (S/cm)</b>
Polimer	$10^{-4} - 10^{-17}$
Karbon Konduktif	$10^2 - 10^5$
Logam	$10^6$



**Gambar 5.12** Grafik perbandingan nilai konduktivitas setiap formulasi komposit.

Dari gambar 5.11 seperti yang sudah diperkirakan, konsentrasi karbon hitam berpengaruh besar pada nilai konduktivitas listrik komposit. Bisa dikatakan nilai konduktivitas dari komposisi *filler* karbon yang berbeda dari masing-masing formula semakin bertambah seiring dengan bertambahnya konsentrasi karbon hitam. Nilai konduktivitas listrik terbesar yaitu 8,546 S/cm ada pada formula F5 dengan kandungan karbon hitam terbanyak dibandingkan formula lainnya. Dimana komposisi *filler* karbon F5: serat karbon 20%, karbon hitam 40%, grafit 20%.



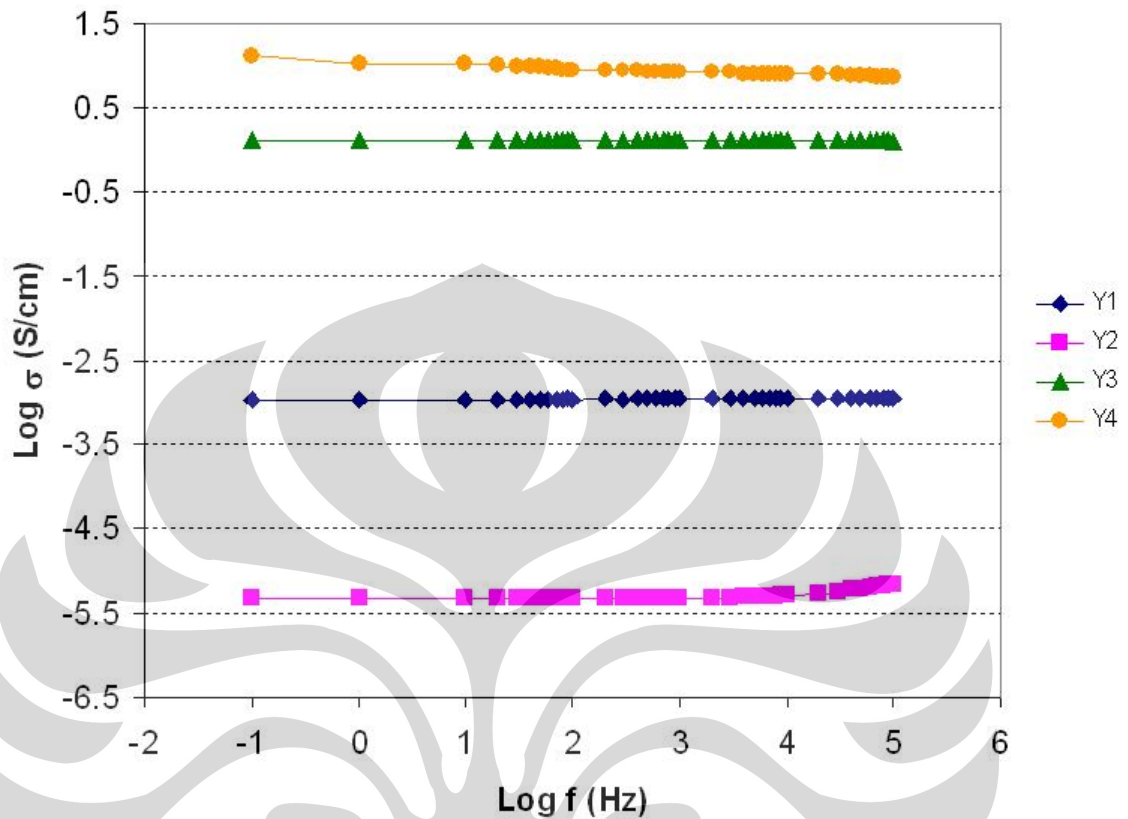
: In-plane conductivity of 1:1:1 SG-4012/VCB/CF composite measured in two directions (Injection molding direction and Perpendicular to injection molding direction)

**Gambar 5.13** Grafik linier nilai konduktivitas literatur komposit PP-karbon. <sup>[2]</sup>

Namun, nilai konduktivitas listrik antara formula F4 (1,304 S/cm) dengan F5 (8,547 S/cm) berbeda cukup jauh. Dengan perbedaan kandungan karbon hitam yang tidak begitu besar (F4 = 30 wt%CB dan F5 = 40 wt%CB) maka seharusnya nilai konduktivitasnya juga tidak berbeda jauh. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada pembahasan pengujian tarik dan fleksural, hal ini terjadi akibat proses *hot blending* dan *compression molding* yang kurang sempurna. Terutama variable mesin proses (Temperatur, Tekanan, dan Waktu) yang masih belum optimum dapat menyebabkan degradasi material. Atau bisa juga ketidakmerataan penyebaran karbon hitam didalam matriks polypropylene. Pengamatan secara visual pada SEM juga memperlihatkan adanya retakan dan *voids*. Hal ini dapat menghambat sifat konduktivitas dari polimer PP-karbon <sup>[37]</sup>.

Gambar 5.14 memperlihatkan Grafik hubungan frekuensi terhadap nilai konduktivitas. Dimana dengan sedikit perbedaan frekuensi yang diberikan pada pengujian konduktivitas, didapat hasil nilai konduktivitas listrik yang linier secara

logaritma. Hal ini menunjukkan bahwa nilai yang didapat adalah benar dan tidak menyimpang walaupun frekuensi yang diberikan divariasikan.



**Gambar 5.14** Grafik hubungan frekuensi terhadap nilai konduktivitas.

Sebagai perbandingan hasil pengujian yang didapat, nilai karakteristik keseluruhan formula bisa dilihat pada table 5.9

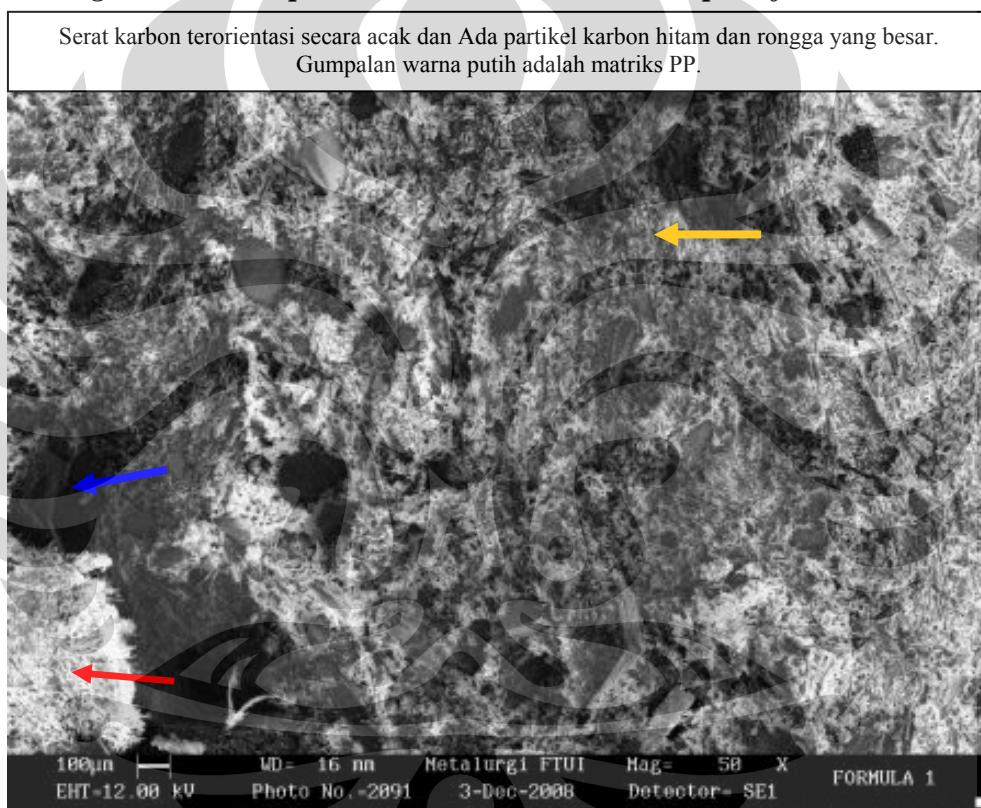
**Tabel 5.9** Nilai karakteristik keseluruhan formula.

Karakteristik	F1	F2	F3	F4	F5
Density (g/cc)	0,901	0,917	0,931	1,165	1,054
Tensile Strength (Mpa)	25,21	19,08	17,8	14,23	13,81
Tensile Modulus (Gpa)	0,823	2,201	1,7122	3,325	3,148
Flexural Strength (Mpa)	41,24	35,12	31,09	30,11	29,69
Flexural Modulus (Gpa)	1,158	2,8	2,55	6,01	5,103
Conductivity (S/Cm)	1,00E-13	0,0011	5,2E-06	1,304	8,547

### 5.5 Hasil Pengamatan SEM

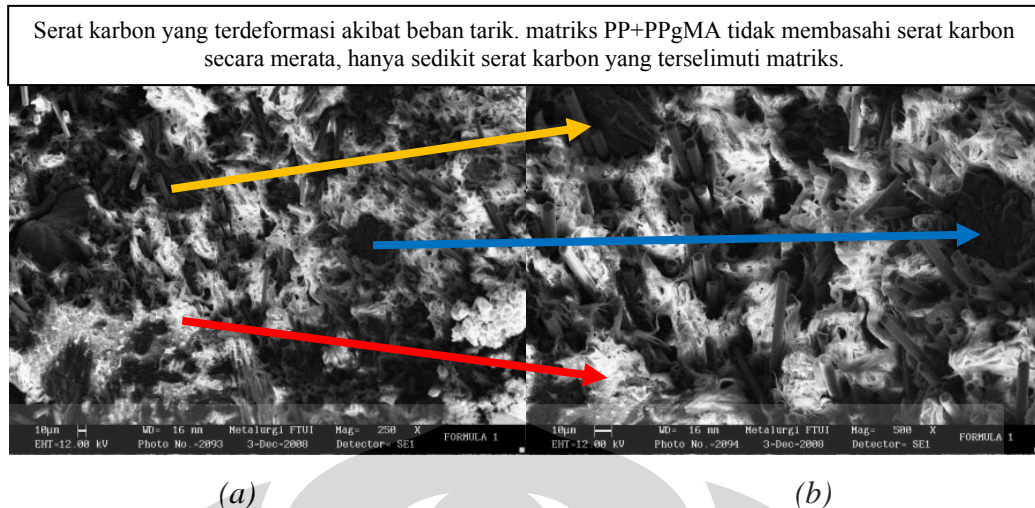
Dari hasil seluruh pengujian mekanik, terlihat perbedaan komposisi *filler* pada sistem komposit PP-karbon mempengaruhi beberapa sifat mekanik secara signifikan. Untuk kadar *filler* karbon yang sama (formula F2 dan F3 = 14 wt%C, formula F4 dan F5 = 80 wt%C) beberapa sifat tidak terlihat mengalami perubahan yang berarti. Untuk membuktikan hasil pengujian mekanik, maka dilakukan pengamatan SEM pada permukaan patahan tarik dan tekuk dengan menggunakan detektor SE.

#### 5.5.1 Pengamatan SEM pada Permukaan Patahan Sampel Uji Tarik



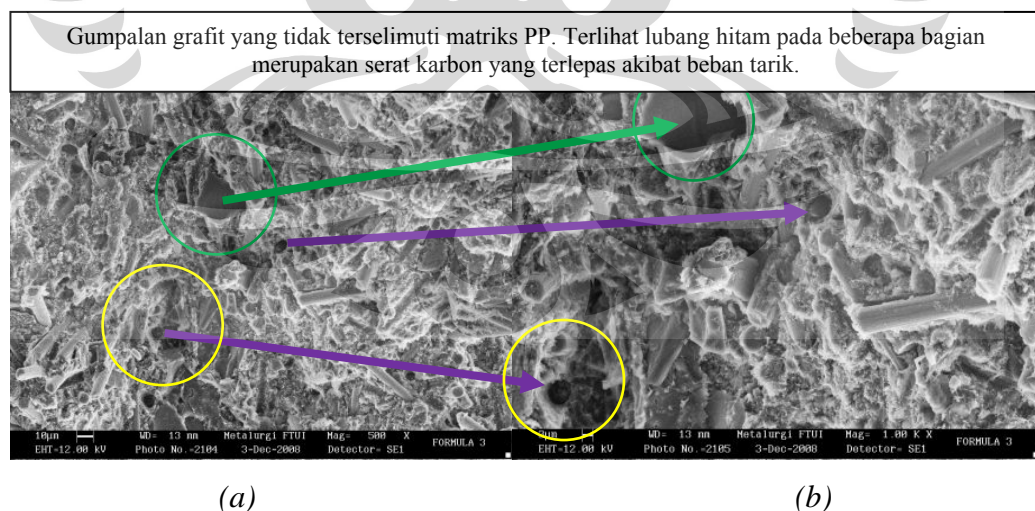
**Gambar 5.15** Permukaan patahan tarik sampel F2 dengan perbesaran 50x.

Gambar 5.15 memperlihatkan morfologi penyebaran *filler* karbon yang tidak merata, membentuk gumpalan/ kumpulan di lokasi tertentu akibat proses *hot blend* yang kurang baik dan peran *compatibilizer* PP-g-MA yang tidak maksimal. Gumpalan matriks PP berwarna putih ditandai oleh panah merah, tidak terikat sempurna dengan gumpalan karbon hitam (panah biru). Sedangkan di lokasi lain terlihat kumpulan serat karbon (panah kuning) yang sebagian besar terlepas dari matriksnya akibat beban tarik.



**Gambar 5.16** Permukaan patahan tarik sampel F2: (a) Perbesaran 250x, (b) Perbesaran 500x.

Pada komposit dengan interaksi yang baik antara *filler* dengan matriks, *yield stress* akan cenderung naik seiring kenaikan jumlah volum fraksi dan turunnya ukuran partikel dimana hal ini sama dengan kenaikan modulus pada kondisi yang sama. Pola tersebut akan berubah ketika terjadi interaksi yang buruk antara *filler* dengan matriksnya. Nilai TS yang menurun pada sistem komposit PP-karbon yang dihasilkan diperkirakan akibat dari interaksi yang buruk antara karbon dengan polipropilen dimana terjadi kegagalan dalam mempertahankan struktur morfologinya yang dapat terlihat jelas melalui SEM pada gambar 5.15.

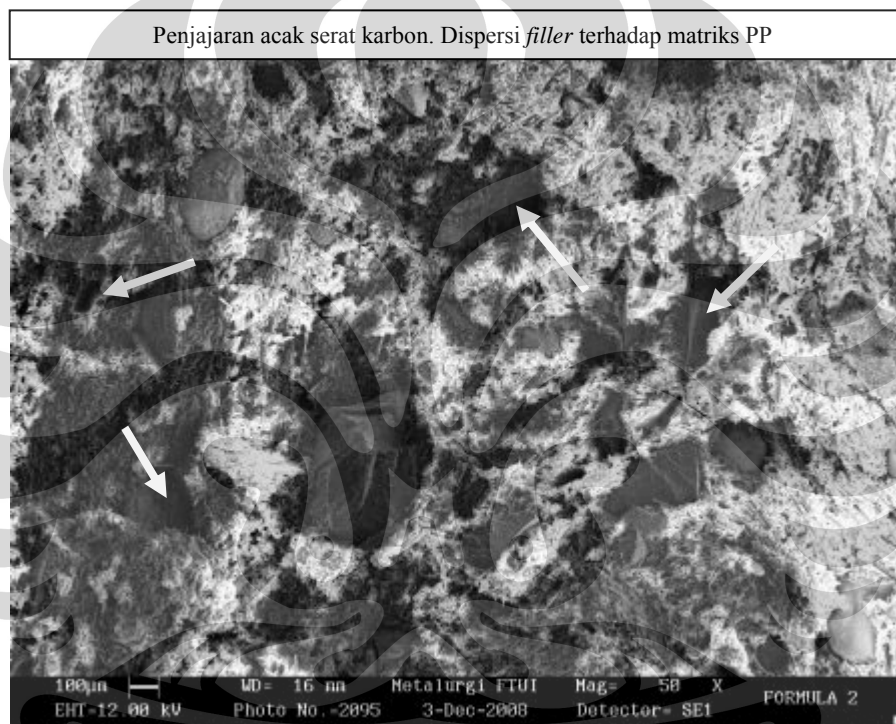


**Gambar 5.17** Permukaan patahan tarik sampel F4: (a) Perbesaran 500x, (b) Perbesaran 1000x.



Komposit yang baik ialah bila patahan akibat beban tarik terjadi pada ikatan antarmuka antara matriks dengan *fillernya*. Sebaliknya, bila patahan terjadi hanya pada matriksnya atau *fillernya* saja, maka ikatan antarmuka komposit tersebut kurang baik. Gambar 5.16 terlihat jelas bahwa banyak lubang-lubang hitam akibat lepasnya (*pulled-out*) serat karbon. Hal ini berarti pembasahan yang terjadi pada komposit PP-karbon ini kurang sempurna. Patahan grafit yang datar menandakan formula F4 (80 wt%C) bersifat getas.

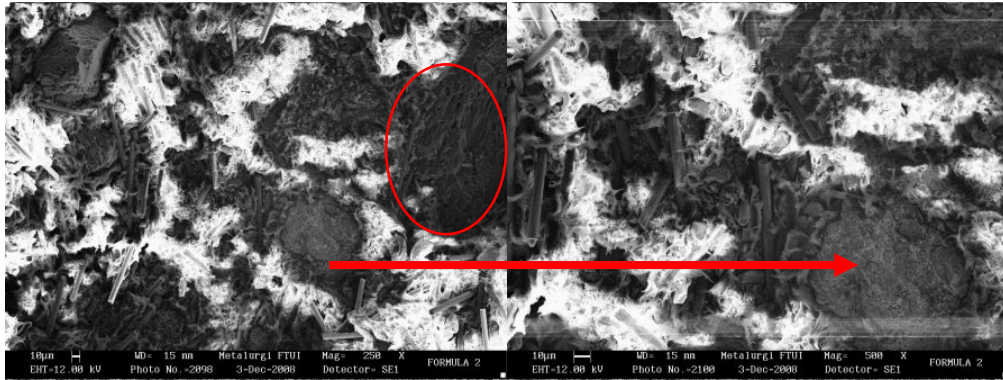
### 5.5.2 Pengamatan SEM pada Permukaan Patahan Sampel Uji Tekuk



**Gambar 5.18** Permukaan patahan tekuk sampel F3 dengan perbesaran 50x.

Salah satu cara yang paling efektif untuk melihat secara jelas struktur mikro dari material komposit PP-karbon ialah dengan menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM). Gambar 5.18 memperlihatkan porositas komposit, dan penjajaran serat karbon dari patahan akibat beban tekuk. Porositas komposit dapat menurunkan konduktifitas komposit dan berpengaruh pada inkonsisten sifat mekanik <sup>[37]</sup>.

Patahan datar akibat pembebanan tekuk menandakan komposit bersifat getas.



**Gambar 5.19** Permukaan patahan tekuk sampel F3: (a) Perbesaran 250x, (b) Perbesaran 500x.

Gambar 5.19 memperlihatkan patahan datar akibat pembebanan tekuk yang menandakan komposit bersifat getas.

Turunnya nilai kekuatan tekuk pada komposit PP-karbon membuktikan bahwa ada kesalahan/kegagalan dari sistem ini karena tujuan sebenarnya dari sistem adalah memberikan peningkatan terutama kekuatan dibandingkan PP murni maupun sistem komposit konvensional.

Nilai kekuatan tekuk material komposit PP-karbon dipengaruhi banyak hal, diantaranya:

□ Temperatur.

Pada temperatur yang tinggi akan meningkatkan elongasi, tetapi menurunkan kuat tekuknya. Polimer akan berubah struktur molekulnya dari sifatnya yang kaku dan getas menjadi lunak dan *ductile* (*softening*).

□ Orientasi molekul.

Hasil dari proses tertentu akan menentukan orientasi molekul. Proses *hot blending* dan *compression molding* akan memberikan orientasi molekul searah mesin (*machine direction*) yang sifatnya anisotropik dimana pada arah tersebut akan meningkatkan kuat tekuk dan menurunkan elongasinya.

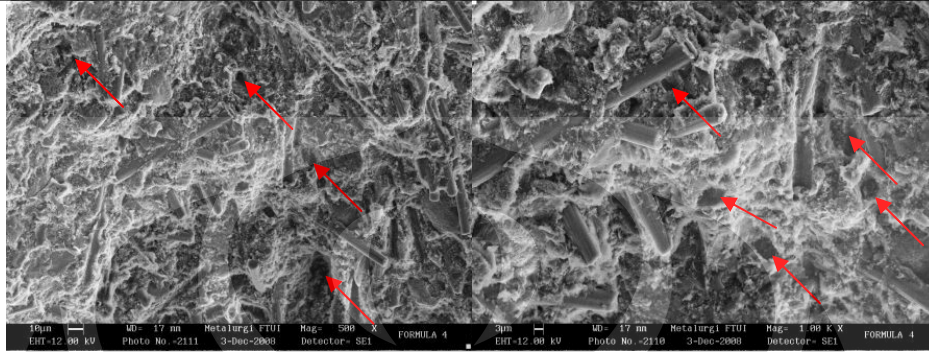
Pertimbangan aditif juga berpengaruh terhadap dispersi *filler* karbon.

□ Derajat kristalisasi.

Umumnya, semakin tinggi derajat kristalisasi akan meningkatkan kekuatannya karena keteraturan yang dimiliki memudahkan proses transfer

tegangannya [28]. Derajat kristalinasinya dapat diketahui melalui pengujian DSC (*Differential Scanning Calorimetry*), tetapi tidak dilakukan pada penelitian ini.

Kadar PP yang sedikit menyebabkan *filler* semakin tidak terbasahi dengan baik. Banyak serat karbon yang mengalami *pulled out*.



(a)

(b)

**Gambar 5.20** Permukaan patahan tekuk sampel F5: (a) Perbesaran 500x, (b) Perbesaran 1000x.

Dari gambar 5.20 permukaan patahan tekuk sampel F5 memperlihatkan banyaknya lubang akibat terlepasnya serat karbon (*pulled-out*) yang merupakan salah satu indikasi kurang sempurnanya pembasahan antara matriks dengan *filler* pada komposit tersebut.

## BAB VI

## KESIMPULAN

Dari hasil eksperimen yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan:

1. Secara visual melalui hasil SEM, dapat diketahui bahwa komposit PP-karbon yang dihasilkan memiliki penyebaran *filler* yang kurang merata.
2. Secara umum, terlihat adanya pengaruh yang signifikan dari variabel variasi fraksi massa bahan pengisi karbon hitam, serat karbon, dan grafit sintetik yang berbeda-beda terhadap nilai kerapatan massa, sifat mekanik, dan konduktivitas dari komposit.
3. Formula F4 adalah komposit dengan kerapatan massa tertinggi sebesar  $1,165 \text{ g/cm}^3$ , nilainya lebih rendah bila dibandingkan dengan kerapatan massa pelat bipolar grafit, hasil ini memperlihatkan bahwa termoplastik konduktif dari penelitian ini memenuhi target untuk aplikasi pelat bipolar.
4. Formula F2 adalah komposit dengan kekuatan tarik tertinggi sebesar 19,08 MPa, tetapi nilainya masih dibawah kekuatan tarik PP 100%*wt* (formula F5). Sedangkan formula F4 adalah komposit dengan modulus tarik tertinggi sebesar 3,325 GPa, menunjukkan F4 paling getas.
5. Formula F2 adalah komposit dengan kekuatan tekuk tertinggi sebesar 35,12 MPa. Sedangkan F4 komposit dengan modulus tekuk tertinggi sebesar 6,01 GPa, menunjukkan F4 paling kaku.
6. Formula F5 adalah komposit dengan nilai konduktivitas tertinggi sebesar 8,547 S/cm.
7. Kurang baiknya kompatibilitas PP-g-MA diperkirakan disebabkan karena gugus maleic anhidride yang kurang optimum dengan karbon (karbon tidak mengandung gugus -OH atau -ester). Tujuan untuk menjadi compatibilizer optimum belum tercapai.

## DAFTAR REFERENSI

[1] EG & G Services Parsons Inc, *Fuel Cell Handbook 5<sup>th</sup> Edition* (West Virginia: U.S. Department of Energy, October 2000)

[2] Y. Wang. “Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC).” *Thesis Master of Applied Science*, Chemical Engineering University of Waterloo, Ontario Canada, 2006, hlm. 1 – 4, 7 – 16, 21 – 27, 47 – 49, 60 – 63, 78.

<http://etd.uwaterloo.ca/etd/y74wang2006.pdf> diakses pada 18/5/09.

[3] U. S. Fuel Cell Council, *Fuel Cell Glossary 2<sup>nd</sup> Edition* (May 2000), hlm. 28.

<http://www.usfcc.com/Glossary2.pdf> diakses pada 27/4/09.

[4] Joel Fried R, *Polymer Science and Technology* (Prentice-Hall Inc., 1995)

[5] R. J. Crawford, *Plastics Engineering, Third Edition* (Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998), hlm. 8 – 9, 18 – 28, 245 – 351.

[6] [http://www.cleanfuelcellenergy.com/Materials\\_Fuel\\_Cells.pdf](http://www.cleanfuelcellenergy.com/Materials_Fuel_Cells.pdf) diakses pada 18/06/09.

[7] D. P. Davies, *et al.*, “Bipolar plate materials for solid polymer fuel cells”, *Journal of Applied Electrochemistry* (2000), 30, hlm. 101 – 105.

<http://www.springerlink.com/content/j38103237826366h/fulltext.pdf> diakses pada 27/1/09.

[8] <http://brucelin.ca/scooters/pdf/ch3c.pdf> diakses pada 18/06/09.

[9] <http://physics.nist.gov/MajResFac/NIF/pemFuelCells.html> diakses pada 23/04/09.

[10] J. M. King dan M. J. O’Day, “Applying fuel cell experience to sustainable power products”, *Journal of Power Sources* (2000), 86, 16 – 22. Abstract:

<http://www.sciencedirect.com/> diakses pada 26/1/09.

[11] J. Larminie dan A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained* (West Sussex: John Wiley & Sons, 2000).

[12] M. J. Ajersch dan M. W. Fowler, *Fuel Cell: Science, Engineering, and Technology* (2003).

[13] <http://www.sentrateknologipolimer.com>

[14] V. Mehta dan J. S. Cooper, "Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing," *Journal of Power Sources*, 2003, hlm. 114, 32 – 53.

[15] <http://www.eppo.go.th/encon/energyresearch/PDF/somruthai.pdf> diakses pada 18/05/09.

[16] A. Hermann, T. Chaudhuri, dan P. Spagnol, *International Journal of Hydrogen Energy* (2005), 30, 1297 – 1302.

[17] Somruthai Tunma, *Preparation of Electrical Conductive ABS Composit for Bipolar Plate in PEM Fuel Cell*

[18] D. Busick, *New Materials for Battery and Fuel Cells*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Pennsylvania, 2000. Hlm: 575, 247-293

[19] K. Roberg, *Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications*, Vol 3: 2003, hlm: 286-293

[20] Bor Z. Jang, *Advanced Polymer Composites* (USA: ASM International, 1994), hlm. 3 – 4, 38.

[21] F. L. Matthew dan R. D. Rawlings, *Composite Materials: Engineering and Science* (London: Chapman and Hall, 1994), hlm. 5, 12 – 14, 59 – 64, 118 – 119, 125 – 133.

[22] D. V. Rosato, *Plastic Engineered Product Design* (Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2003) hlm. 81 – 82.

[23] D. Hull dan T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials 2<sup>nd</sup> Edition* (Cambridge: Cambridge University Press, 1996), hlm. 134 – 135, 154.

[24] V. V. Vasiliev dan E. V. Morozov, *Advanced Mechanics of Composite Materials* (Amsterdam: Elsevier Ltd, 2007), hlm. 18.

[25] ASM Handbook Vol. 21, *Composites* (USA: ASM International, 2001), hlm. 1, 247, 387 – 389, 427, 1356 – 1357.

[26] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction, 7<sup>th</sup> Edition* (New York: John Wiley & Sons, 2007), hlm. 504, 537, 566, 587 – 589, 593 – 594.

[27] D. Tripathi, *Practical Guide to Polypropylene* (Shawbury: Rapra Technology Ltd, 2002), hlm. 1, 9 – 10, 19 – 20.

[28] J. Brandrup et al, *Polymer Handbook 4<sup>eds</sup>*, (New York Park: Wiley, 1998), hlm: 543-570

[29] Kirk Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4<sup>th</sup> edition Vol 6 (New York: John Wiley 1995)

[30] <http://www.specialchem4polymers.com/tc/Adhesion> Promotor/ diakses pada 29/1/09.

- [31] <http://www.clariant.com>
- [32] <http://www.mineral.galleries.com>
- [33] H. Zweifel (Editor), *Plastics Additives Handbook 5<sup>th</sup> Edition* (Munich: Hanser Publishers, 2001), hlm. 4, 6, 903 – 905, 930, 933 – 934, 1004.
- [34] S.H.P Bettini, *Jornal of Applied Polymer Science*, 74(2) (1993) hlm: 247-255
- [35] <http://www.specialchem4polymers.com/tc/Antioxidants/> diakses pada 29/1/09.
- [37] <http://www.asbury.com/Carbons.html> diakses pada 22/1/09.
- [38] <http://www.tpc.com.sg/> diakses pada 22/1/09.
- [39] F. Mighri dan M.A. Huneault, “Electrically Conductive Thermoplastic Blends for Injection and Compression Molding of Bipolar Plates in the Fuel Cell Application”, *Polymer Engineering and Science*, 2004, 44 (9), hlm. 1755 – 765.
- [40] ASTM International, *Annual Book of ASTM Standards, Vol. 08.01*.
- [41] [http://www.ipruw.com/publications/2006/poster\\_pres/CathyWang.pdf](http://www.ipruw.com/publications/2006/poster_pres/CathyWang.pdf) diakses pada 18/2/09.
- [42] Anatole A. Klyosov, *Wood Plastic Composites* (New York: John Willey & Sons, 2007), hlm. 161 – 173.
- [43] I. Bar-On, R. Kirchain, dan R. Roth, “Technical cost of analysis for PEM fuel cells”, *Journal of Power Source* (2002), 109(1), 71 – 75.  
<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=13742357> diakses pada 26/1/09.



[44] A. Kumar dan R.G. Reddy, "Fundamentals of Advanced Materials for Energy Conversion," Eds. D. Chandra and R.G. Bautista (Warrendale: TMS, 2002), hlm. 41.

[45] T. Surdia dan Saito S., *Pengetahuan Bahan Teknik Cet. ke-2* (Jakarta: Pradnya Paramita, 1992), hlm. 173 – 213.

[46] A. Heinzl, *et al.*, "Injection molded low cost bipolar plates for PEM fuel cells".

[http://www.zbt-duisburg.de/\\_downloads/Grove2003-ZBT-Bipolar.pdf](http://www.zbt-duisburg.de/_downloads/Grove2003-ZBT-Bipolar.pdf) diakses pada 18/6/09.

[47] <http://www.pslc.ws/mactest/pp.htm> diakses pada 27/1/09.

[48] R. J. Hernandez, *et al.*, *Plastic Packaging: Properties, Processing, Applications, and Regulations* (Munich: Carl Hanser Verlag, 2000), hlm. 58, 134.

[49] H. Belofsky, *Plastics: Product Design and Process Engineering* (New York: Carl Hanser Verlag, 1995), hlm. 72.

[50] K. Oksman dan C. Clemons, "Effects of Elastomers and Coupling Agent on Impact Performance of Wood Flour-Filled Polypropylene", *The 4<sup>th</sup> International Conference on Wood fiber-Plastic Composites* (May 1997), hlm. 145.

<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1997/oksm97a.pdf> diakses pada 8/1/09.

[51]

<http://www.elastochemie.com/FAQs/Compound%20Properties/dispersion.pdf> diakses pada 21/1/09

[52] <http://www.asbury.com/Synthetic-Graphite.html> diakses pada 22/1/09.

[53] D. F. Caulfield *et al.*, *Wood Thermoplastic Composites Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite, Chap. 13* (Taylor and Francis, 2005), hlm. 4 – 5.

[54] J. K. Kim dan Y. W. Mai, *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites* (Elsevier Science Ltd, 1998, hlm. 1, 5 – 8.

[55] [http://www.hdm-stuttgart.de/projekte/printing-inks/b\\_selec0.htm](http://www.hdm-stuttgart.de/projekte/printing-inks/b_selec0.htm) diakses pada 23/04/09.

[56] V. Di Liello *et al.*, “Tensile properties and fracture behavior of polypropylene-nickel-coated carbon-fiber composite”, *Journal of Materials Science* 25 (1990), hlm. 706 – 712.

<http://www.springerlink.com/content/r056253362640118/fulltext.pdf> diakses pada 15/2/09.

## **LAMPIRAN**

### **Lampiran 1**

#### **Peralatan dan Mesin Penelitian**



1. Timbangan digital Mettler PM600 dan Sartorius



2. Rheomix Haake Rheocord 90.      3. *Crusher* Kpi tipe KF-808-B



4. COLLIN P300P *Hydraulic Hot Press + mold.*



5. TOYOSEIKI *Mini Test Press* dan *Specimens Puncher*.



6. Mesin pemotong GÖLZ BS 350.



7. Mesin Abrasif.



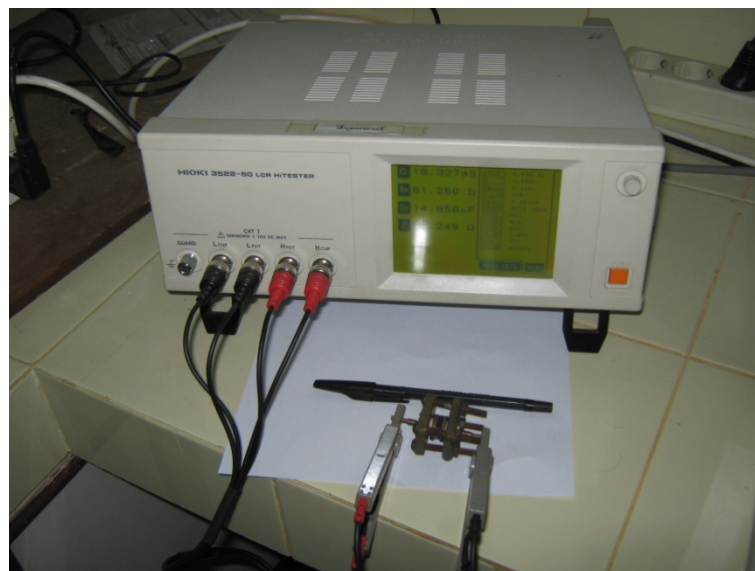
8. Lemari Pengkondisian



9. SHIMADZU *Universal Testing Machine* tipe AGS-10kNG



10. SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan *Sputter Coater*



11. *Conductivity measurement apparatus.*

**Lampiran 2**  
**Hasil Uji Tarik**

## Test Certificate

### Plastics Tensile Test

Order No.....J1080466  
Teststandard.....ASTM D638typeIV  
Tester.....abd

Material.....PP  
Tested on.....2008-12-10  
Kondisi Uji.....24.1oC , RH 56%

Testing machine.....AGS-G  
Pretension.....0.01 N  
Gripped length.....65 mm  
Test speed 1.....0 % -> 5 mm/min

Directory.....J1080466pttePP C pvdf  
Parameterset.....ASTM D638 IV

#### Legend

BNo.....Batch number  
a.....Thickness  
b.....Width  
E.....E-Modulus  
"M.....Tensile strength

"Y.....Yield stress  
"Y.....Yield strain  
"B.....Strain at Break  
Comment.....Comment

Test No	BNo	a mm	b mm	E GPa	"M MPa	"Y MPa	"Y %	"B %	Comment
34	PP - 1	3.090	5.940	0.767	23.44	23.44	7.680	568.1	
91	PP-3	2.900	5.800	0.825	25.16	25.16	7.735	476.9	
92	PP-4	2.860	5.800	0.862	25.67	25.67	7.246	587.8	
93	PP-5	2.870	5.800	0.837	26.57	25.71	7.476	697.3	
Mean:		2.930	5.835	0.823	25.21	24.99	7.534	582.5	
Minimum:		2.860	5.800	0.767	23.44	23.44	7.246	476.9	
Maximum:		3.090	5.940	0.862	26.57	25.71	7.735	697.3	
Std.dev.:		0.108	0.070	0.040	1.316	1.066	0.222	90.49	
W(0.95) %:		5.865	1.909	7.781	8.306	6.788	4.691	24.72	
Values:		4	4	4	4	4	4	4	

# Test Certificate

## Plastics Tensile Test

Order No.....J1080466  
 Teststandard.....ASTM D638typeIV  
 Tester.....abd

Material.....PP50%PPgMA C1  
 Tested on.....2008-12-01  
 Kondisi Uji.....24.2oC , RH 57%

Testing machine.....AGS-G  
 Pretension.....0.01 N  
 Gripped length.....65 mm  
 Test speed 1.....0 % -> 5 mm/min

Directory.....J1080466pttePP C pvdf  
 Parameterset.....ASTM D638 IV

### Legend

BNo.....Batch number  
 a.....Thickness  
 b.....Width  
 E.....E-Modulus

"M.....Tensile strength  
 "B.....Strain at Break  
 Comment.....Comment

Test No	BNo	a mm	b mm	E GPa	"M MPa	"B %	Comment
47	PP50PPgMAC1-1	1.890	6.020	1.999	17.80	1.341	
48	PP50PPgMAC1-2	1.880	6.030	2.314	17.96	1.105	
49	PP50PPgMAC1-3	1.890	6.080	2.032	18.75	1.535	
50	PP50PPgMAC1-4	1.770	6.040	2.287	19.76	1.446	
51	PP50PPgMAC1-5	1.830	6.080	2.374	21.11	1.472	
Mean:		1.852	6.050	2.201	19.08	1.380	
Minimum:		1.770	6.020	1.999	17.80	1.105	
Maximum:		1.890	6.080	2.374	21.11	1.535	
Std.dev.:		0.052	0.028	0.173	1.377	0.169	
W(0.95) %:		3.496	0.580	9.747	8.962	15.19	
Values:		5	5	5	5	5	

# Test Certificate

## Plastics Tensile Test

Order No.....J1080466  
 Teststandard.....ASTM D638typeIV  
 Tester.....abd

Material.....PP50%PPgMA C2  
 Tested on.....2008-12-01  
 Kondisi Uji.....24.2oC , RH 57%

Testing machine.....AGS-G  
 Pretension.....0.01 N  
 Gripped length.....65 mm  
 Test speed 1.....0 % -> 5 mm/min

Directory.....J1080466ptePP C pvdf  
 Parameterset.....ASTM D638 IV

### Legend

BNo.....Batch number  
 a.....Thickness  
 b.....Width  
 E.....E-Modulus

"M.....Tensile strength  
 "B.....Strain at Break  
 Comment.....Comment

Test No	BNo	a mm	b mm	E GPa	"M MPa	"B %	Comment
52	PP50PPgMAC2-1	1.860	6.070	1.645	17.57	1.791	
53	PP50PPgMAC2-2	1.960	6.090	1.693	17.73	1.893	
54	PP50PPgMAC2-3	1.900	6.130	1.955	19.50	1.695	
55	PP50PPgMAC2-4	1.920	6.120	1.661	17.53	1.750	
57	PP50PPgMAC2-6	1.740	6.070	1.605	16.69	1.767	
Mean:		1.876	6.096	1.712	17.80	1.779	
Minimum:		1.740	6.070	1.605	16.69	1.695	
Maximum:		1.960	6.130	1.955	19.50	1.893	
Std.dev.:		0.084	0.028	0.140	1.031	0.073	
W(0.95) %:		5.568	0.569	10.12	7.190	5.078	
Values:		5	5	5	5	5	



# Test Certificate

## Plastics Tensile Test

Order No.....J1080466  
 Teststandard.....ASTM D638typeIV  
 Tester.....abd

Material.....PP14%PPgMA C3  
 Tested on.....2008-12-01  
 Kondisi Uji.....24.2oC , RH 57%

Testing machine.....AGS-G  
 Pretension.....0.01 N  
 Gripped length.....65 mm  
 Test speed I.....0 % -> 5 mm/min

Directory.....J1080466pttePP C pvdf  
 Parameterset.....ASTM D638 IV

### Legend

BNo.....Batch number  
 a.....Thickness  
 b.....Width  
 E.....E-Modulus

"M.....Tensile strength  
 "B.....Strain at Break  
 Comment.....Comment

Test No	BNo	a mm	b mm	E GPa	"M MPa	"B %	Comment
58	PP14PPgMAC3-1	2.040	6.570	3.306	15.69	0.515	
59	PP14PPgMAC3-2	2.010	7.170	3.283	15.33	0.514	
60	PP14PPgMAC3-3	2.040	6.540	3.439	17.16	0.571	
61	PP14PPgMAC3-4	2.040	6.600	3.345	11.76	0.360	
62	PP14PPgMAC3-5	2.040	6.580	3.252	11.23	0.346	
Mean:		2.034	6.692	3.325	14.23	0.461	
Minimum:		2.010	6.540	3.252	11.23	0.346	
Maximum:		2.040	7.170	3.439	17.16	0.571	
Std.dev.:		0.013	0.268	0.072	2.599	0.102	
W(0.95) %:		0.819	4.973	2.696	22.67	27.34	
Values:		5	5	5	5	5	

# Test Certificate

## Plastics Tensile Test

Order No.....J1080466  
 Teststandard.....ASTM D638typeIV  
 Tester.....abd

Material.....PP14%PPgMA C4  
 Tested on.....2008-12-01  
 Kondisi Uji.....24.2oC , RH 57%

Testing machine.....AGS-G  
 Pretension.....0.01 N  
 Gripped length.....65 mm  
 Test speed 1.....0 % -> 5 mm/min

Directory.....J1080466pttePP C pvdf  
 Parameterset.....ASTM D638 IV

### Legend

BNo.....Batch number  
 a.....Thickness  
 b.....Width  
 E.....E-Modulus

"M.....Tensile strength  
 "B.....Strain at Break  
 Comment.....Comment

Test No	BNo	a mm	b mm	E GPa	"M MPa	"B %	Comment
67	PP14PPgMAC4-3	1.880	6.650	3.386	17.75	0.595	
68	PP14PPgMAC4-4	1.790	6.410	3.393	12.45	0.441	
69	PP14PPgMAC4-5	1.810	6.650	2.666	11.23	0.614	
Mean:		1.827	6.570	3.148	13.81	0.550	
Minimum:		1.790	6.410	2.666	11.23	0.441	
Maximum:		1.880	6.650	3.393	17.75	0.614	
Std.dev.:		0.047	0.139	0.418	3.466	0.095	
W(0.95) %:		6.427	5.240	32.96	62.36	42.85	
Values:		3	3	3	3	3	

**Lampiran 3**  
**Hasil Uji Tekuk**

# Test Certificate

## Flexural Test

Order No.....J1080466  
Test Standard.....ASTM D790  
Tester.....abd

Material.....PP  
Tested on.....2008-12-10  
Kondisi Uji.....24oC,RH56%

Testing machine.....AGS-G  
Test speed 1.....0 % -> 1.729 mm/min

Directory.....J1080466ftPP C pvdf  
Parameterset.....astm d790

**Legend**

BNo.....Batch number  
a.....Thickness  
b.....Width

Ls.....Support span  
Ef.....E-Modulus  
"fM.....Flexural strength

Test No	BNo	a mm	b mm	Ls mm	Ef GPa	"fM MPa
87	PP -1	4.070	12.23	65.12	1.126	40.33
88	PP -2	4.070	12.07	65.12	1.233	41.84
89	PP -3	4.050	11.72	64.80	1.131	40.45
90	PP -4	4.050	12.04	64.80	1.177	41.76
91	PP -5	4.050	11.86	64.80	1.123	41.80
Mean:		4.058	11.98	64.93	1.158	41.24
Minimum:		4.050	11.72	64.80	1.123	40.33
Maximum:		4.070	12.23	65.12	1.233	41.84
Std.dev.:		0.011	0.198	0.175	0.047	0.774
W(0.95) %:		0.335	2.047	0.335	5.075	2.330
Values:		5	5	5	5	5

# Test Certificate

## Flexural Test

Order No.....J1080466  
 Test Standard.....ASTM D790  
 Tester.....abd

Material.....PP50%PPgMA C1  
 Tested on.....2008-12-02  
 Kondisi Uji.....24oC,RH51%

Testing machine.....AGS-G  
 Test speed 1.....0 % -> 1.644 mm/min

Directory.....J1080466ftPP C pvdF  
 Parameterset.....astm d790

### Legend

BNo.....Batch number  
 a.....Thickness  
 b.....Width

Ls.....Support span  
 Ef.....E-Modulus  
 "fM.....Flexural strength

Test No	BNo	a mm	b mm	Ls mm	Ef GPa	"fM MPa
43	PP50PPgMA C1-2	3.870	11.86	61.92	2.943	34.28
44	PP50PPgMA C1-3	3.870	12.32	61.92	3.024	35.46
45	PP50PPgMA C1-4	3.870	12.06	61.92	2.838	36.95
46	PP50PPgMA C1-5	3.870	12.66	61.92	2.999	35.89
47	PP50PPgMA C1-6	3.850	12.35	61.60	2.198	33.01
Mean:		3.866	12.25	61.86	2.800	35.12
Minimum:		3.850	11.86	61.60	2.198	33.01
Maximum:		3.870	12.66	61.92	3.024	36.95
Std.dev.:		8.94E-3	0.305	0.143	0.344	1.518
W(0.95) %:		0.287	3.087	0.287	15.26	5.366
Values:		5	5	5	5	5

# Test Certificate

## Flexural Test

Order No.....J1080466  
 Test Standard.....ASTM D790  
 Tester.....abd

Material.....PP50%PPgMA C2  
 Tested on.....2008-12-02  
 Kondisi Uji.....24oC,RH51%

Testing machine.....AGS-G  
 Test speed 1.....0 % -> 1.635 mm/min

Directory.....J1080466ftPP C pvdf  
 Parameterset.....astm d790

### Legend

BNo.....Batch number  
 a.....Thickness  
 b.....Width

Ls.....Support span  
 Ef.....E-Modulus  
 $\sigma_{FM}$ .....Flexural strength

Test No	BNo	a mm	b mm	Ls mm	Ef GPa	$\sigma_{FM}$ MPa
48	PP50PPgMA C2-1	3.790	12.59	60.64	2.559	30.91
49	PP50PPgMA C2-2	3.900	12.82	62.40	2.974	32.70
50	PP50PPgMA C2-3	3.860	12.81	61.76	2.713	32.84
52	PP50PPgMA C2-4	3.820	12.26	61.12	2.464	29.76
53	PP50PPgMA C2-5	3.830	12.57	61.28	2.042	29.24
Mean:		3.840	12.61	61.44	2.550	31.09
Minimum:		3.790	12.26	60.64	2.042	29.24
Maximum:		3.900	12.82	62.40	2.974	32.84
Std.dev.:		0.042	0.228	0.669	0.343	1.649
W(0.95) %:		1.352	2.248	1.352	16.72	6.585
Values:		5	5	5	5	5

# Test Certificate

## Flexural Test

Order No.....J1080466  
 Test Standard.....ASTM D790  
 Tester.....abd

Material.....PP14%PPgMA C3  
 Tested on.....2008-12-02  
 Kondisi Uji.....24oC,RH51%

Testing machine.....AGS-G  
 Test speed 1.....0 % -> 1.571 mm/min

Directory.....J1080466ftPP C pvdf  
 Parameterset.....astm d790

### Legend

BNo.....Batch number  
 a.....Thickness  
 b.....Width

Ls.....Support span  
 Ef.....E-Modulus  
 $\sigma_{FM}$ .....Flexural strength

Test No	BNo	a mm	b mm	Ls mm	Ef GPa	$\sigma_{FM}$ MPa
54	PP14PPgMA C3-1	3.790	11.92	60.64	6.073	28.99
56	PP14PPgMA C3-2	3.730	12.42	59.68	6.485	31.51
57	PP14PPgMA C3-3	3.740	11.99	59.84	5.691	28.90
58	PP14PPgMA C3-4	3.720	11.53	59.52	5.761	31.00
59	PP14PPgMA C3-5	3.680	12.32	58.88	6.041	30.15
Mean:		3.732	12.04	59.71	6.010	30.11
Minimum:		3.680	11.53	58.88	5.691	28.90
Maximum:		3.790	12.42	60.64	6.485	31.51
Std.dev.:		0.040	0.353	0.634	0.314	1.170
W(0.95) %:		1.318	3.646	1.318	6.485	4.823
Values:		5	5	5	5	5

# Test Certificate

## Flexural Test

Order No.....J1080466  
 Test Standard.....ASTM D790  
 Tester.....abd

Material.....PP14%PPgMA C4  
 Tested on.....2008-12-02  
 Kondisi Uji.....24oC,RH51%

Testing machine.....AGS-G  
 Test speed 1.....0 % -> 1.503 mm/min

Directory.....J1080466ftPP C pvdf  
 Parameterset.....astm d790

### Legend

BNo.....Batch number  
 a.....Thickness  
 b.....Width

Ls.....Support span  
 Ef.....E-Modulus  
 $\sigma_{FM}$ .....Flexural strength

Test No	BNo	a mm	b mm	Ls mm	Ef GPa	$\sigma_{FM}$ MPa
60	PP14PPgMA C4-1	3.620	12.09	57.92	5.008	29.94
61	PP14PPgMA C4-2	3.620	12.38	57.92	6.082	26.91
63	PP14PPgMA C4-4	3.490	11.88	55.84	4.169	27.77
64	PP14PPgMA C4-5	3.480	11.87	55.68	6.120	30.81
65	PP14PPgMA C4-6	3.520	11.86	56.32	4.136	33.01
Mean:		3.546	12.02	56.74	5.103	29.69
Minimum:		3.480	11.86	55.68	4.136	26.91
Maximum:		3.620	12.38	57.92	6.120	33.01
Std.dev.:		0.069	0.225	1.106	0.976	2.437
W(0.95) %:		2.421	2.322	2.421	23.74	10.19
Values:		5	5	5	5	5

## Lampiran 4

### Hasil Uji Konduktivitas Listrik

Data konduktivitas sample Yogi  
*Conductivity data of sample Yogi*

f(Hz)	$\sigma(\text{S/cm})$ , S = Siemen = 1/Ohm			
	Y1	Y2	Y3	Y4
0.1	1.066E-03	4.697E-06	1.315E+00	1.299E+01
1	1.076E-03	4.681E-06	1.313E+00	1.061E+01
10	1.077E-03	4.769E-06	1.312E+00	1.020E+01
20	1.077E-03	4.719E-06	1.311E+00	9.850E+00
30	1.081E-03	4.779E-06	1.310E+00	9.701E+00
40	1.081E-03	4.846E-06	1.311E+00	9.372E+00
50	1.080E-03	4.814E-06	1.304E+00	9.391E+00
60	1.082E-03	4.772E-06	1.303E+00	8.980E+00
70	1.083E-03	4.770E-06	1.302E+00	9.227E+00
80	1.087E-03	4.792E-06	1.303E+00	8.874E+00
90	1.090E-03	4.783E-06	1.300E+00	8.895E+00
100	1.089E-03	4.740E-06	1.307E+00	8.881E+00
200	1.091E-03	4.757E-06	1.299E+00	8.796E+00
300	1.089E-03	4.711E-06	1.304E+00	8.590E+00
400	1.094E-03	4.734E-06	1.297E+00	8.618E+00
500	1.094E-03	4.740E-06	1.299E+00	8.441E+00
600	1.095E-03	4.714E-06	1.300E+00	8.315E+00
700	1.093E-03	4.776E-06	1.300E+00	8.225E+00
800	1.093E-03	4.750E-06	1.300E+00	8.270E+00
900	1.097E-03	4.754E-06	1.300E+00	8.283E+00
1000	1.099E-03	4.727E-06	1.300E+00	8.198E+00
2000	1.102E-03	4.806E-06	1.300E+00	8.221E+00
3000	1.105E-03	4.844E-06	1.314E+00	8.197E+00
4000	1.104E-03	4.849E-06	1.314E+00	8.158E+00
5000	1.102E-03	4.956E-06	1.316E+00	8.086E+00
6000	1.104E-03	5.000E-06	1.315E+00	8.093E+00
7000	1.105E-03	4.978E-06	1.316E+00	7.998E+00
8000	1.105E-03	5.067E-06	1.316E+00	8.028E+00
9000	1.105E-03	5.088E-06	1.317E+00	7.955E+00
10000	1.105E-03	5.103E-06	1.317E+00	7.913E+00
20000	1.107E-03	5.506E-06	1.319E+00	7.959E+00
30000	1.106E-03	5.768E-06	1.313E+00	7.845E+00
40000	1.108E-03	6.070E-06	1.310E+00	7.768E+00
50000	1.109E-03	6.178E-06	1.304E+00	7.512E+00
60000	1.110E-03	6.403E-06	1.297E+00	7.516E+00
70000	1.110E-03	6.659E-06	1.289E+00	7.453E+00
80000	1.112E-03	6.821E-06	1.280E+00	7.384E+00
90000	1.114E-03	6.957E-06	1.269E+00	7.268E+00
100000	1.114E-03	7.099E-06	1.257E+00	7.259E+00
$\sigma(\text{S/cm})$ rata-rata	1.096E-03	5.179E-06	1.304E+00	8.547E+00



Konduktivitas Listrik Rata-rata :

$\sigma(\text{S/cm})$ rata-rata			
Y1	Y2	Y3	Y4
0.001096	0.000005179	1.304	8.547

*Catatan : Simbol Y adalah sample Yogi*