



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS SIFAT MEKANIK DAN KONDUKTIVITAS
KOMPOSIT POLIPROPILENA/ POLYPHENYLENE
SULFIDE/KARBON (PP/PPS/C) UNTUK APLIKASI PELAT
BIPOLAR PADA *POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE*
(PEM) *FUEL CELL***

SKRIPSI

**RICKY ARDHI WIBOWO
0405040627**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS SIFAT MEKANIK DAN KONDUKTIVITAS
KOMPOSIT POLIPROPILENA/ POLYPHENYLENE
SULFIDE/KARBON (PP/PPS/C) UNTUK APLIKASI PELAT
BIPOLAR PADA *POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE*
(PEM) *FUEL CELL***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**RICKY ARDHI WIBOWO
0405040627**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2008**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Ricky Ardhi Wibowo

NPM : 0405040627

Tanda Tangan :

Tanggal : 22 Juni 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Ricky Ardhi Wibowo

NPM : 0405040627

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul Skripsi :

**Analisis Sifat Mekanik dan Konduktivitas Komposit Polipropilena/
Polyphenylene Sulfide /Karbon (PP/PPS/C) untuk Aplikasi Pelat Bipolar
pada *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 atas berkat dan rahmat-Nya sehingga 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. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral
4. Kekasihku Eliza Zahra yang telah banyak memberi dukungan semangat dan bantuan
5. Sentra Teknologi Polimer (STP) dan BATAN di PUSPIPTEK Serpong yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data;
6. Teman-teman kelompok studi yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini; dan
7. Seluruh pihak yang telah membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 22 Juni 2009

Penulis

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

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

Nama : Ricky Ardhi Wibowo
NPM : 0405040627
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 :

**Analisis Sifat Mekanik dan Konduktivitas Komposit Polipropilena/
Polyphenylene Sulfide /Karbon (PP/PPS/C) untuk Aplikasi Pelat Bipolar
pada *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 : 22 Juni 2009

Yang menyatakan

(Ricky Ardhi Wibowo)

ABSTRAK

Nama : Ricky Ardhi Wibowo
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul :

**Analisis Sifat Mekanik dan Konduktivitas Komposit Polipropilena/
Polyphenylene Sulfide /Karbon (PP/PPS/C) untuk Aplikasi Pelat Bipolar
pada *Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cell***

Fuel Cell merupakan sumber energi alternatif yang mengkonversi hidrogen menjadi energi listrik. Salah satu jenis *fuel cell* yang potensial dikembangkan adalah *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)* berbahan dasar komposit. Namun, pengembangan PEMFC masih terkendala oleh material penyusun pelat bipolar yang hanya memiliki kemampuan konduktivitas rendah. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan komposisi ideal material komposit bermatriks polimer yang akan digunakan sebagai pelat bipolar pada PEM *fuel cell*.

Pelat bipolar yang diharapkan mempunyai sifat konduktivitas tinggi, ringan, dan murah. Pada penelitian ini, formulasi yang digunakan antara lain polipropilena (PP), *Polyphenylene Sulfide* (PPS), material pengisi konduktif (karbon hitam, serat karbon, grafit sintetik), dan antioksidan. Semua bahan dicampur dalam *hot blender* dan dicetak menjadi sampel. Setiap formulasi diukur kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan konduktivitas listrik. Pengaruh dari penambahan aditif PPS dan karbon ini menunjukkan bahwa kekuatan tarik dan kekuatan tekuk dipengaruhi oleh konsentrasi pengisi dan penambahan PPS dalam matriks PP. Konduktivitas tertinggi yang diperoleh adalah 0,847 S/cm.

Kata kunci:

Sel tunam, pelat bipolar, konduktivitas listrik, sifat mekanik, komposit bermatriks polipropilena, karbon, PP.

ABSTRACT

Name : Ricky Ardhi Wibowo
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title :

Analysis of Mechanical and Conductivity Properties of Composite Polypropylene/Polyphenylene Sulfide/Carbon (PP/PPS/C) for Bipolar Plates in Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cell

Fuel Cell is an alternative energy source that converting hydrogen into electric energy. One of potential developed fuel cell is Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) composite material-based. However, its bipolar plate's low conductivity become obstacle in its development. This research aimed to find ideal composition of polymer matrix composite materials for PEMFC's bipolar plate which is having high conductivity, light weight, and low cost.

The formulation in this research are polypropylene (PP), Polyphenylene Sulfide (PPS), conductive filler materials (synthetic graphite, carbon black, carbon fibers), and antioxidant. All materials mixed in a hot blender and molded as testing samples. Each formulation were measured to find its tensile-strenght, flexural-strenght, and conductivity value. The influence of the addition additive PPS and Carbon showed that tensile strength and flexural strength influenced by the concentration of PPS in PP matrix. The highest conductivity value in this research is 0,847 S/cm.

Keywords:

Fuel cell, PEM fuel cell, bipolar plates, electrical conductivity, mechanical properties, polypropylene matrix composite, PPS, carbon, PP.

ABSTRAK

Nama : Ricky Ardhi Wibowo
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul :

**Analisis Sifat Mekanik dan Konduktivitas Komposit Polipropilena/
Polyphenylene Sulfide /Karbon (PP/PPS/C) untuk Aplikasi Pelat Bipolar
pada *Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cell***

Fuel Cell merupakan sumber energi alternatif yang mengkonversi hidrogen menjadi energi listrik. Salah satu jenis *fuel cell* yang potensial dikembangkan adalah *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)* berbahan dasar komposit. Namun, pengembangan PEMFC masih terkendala oleh material penyusun pelat bipolar yang hanya memiliki kemampuan konduktivitas rendah. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan komposisi ideal material komposit bermatriks polimer yang akan digunakan sebagai pelat bipolar pada PEM *fuel cell*.

Pelat bipolar yang diharapkan mempunyai sifat konduktivitas tinggi, ringan, dan murah. Pada penelitian ini, formulasi yang digunakan antara lain polipropilena (PP), *Polyphenylene Sulfide* (PPS), material pengisi konduktif (karbon hitam, serat karbon, grafit sintetik), dan antioksidan. Semua bahan dicampur dalam *hot blender* dan dicetak menjadi sampel. Setiap formulasi diukur kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan konduktivitas listrik. Pengaruh dari penambahan aditif PPS dan karbon ini menunjukkan bahwa kekuatan tarik dan kekuatan tekuk dipengaruhi oleh konsentrasi pengisi dan penambahan PPS dalam matriks PP. Konduktivitas tertinggi yang diperoleh adalah 0,847 S/cm.

Kata kunci:

Sel tunam, pelat bipolar, konduktivitas listrik, sifat mekanik, komposit bermatriks polipropilena, karbon, PP.

ABSTRACT

Name : Ricky Ardhi Wibowo
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title :

Analysis of Mechanical and Conductivity Properties of Composite Polypropylene/Polyphenylene Sulfide/Carbon (PP/PPS/C) for Bipolar Plates in Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cell

Fuel Cell is an alternative energy source that converting hydrogen into electric energy. One of potential developed fuel cell is Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) composite material-based. However, its bipolar plate's low conductivity become obstacle in its development. This research aimed to find ideal composition of polymer matrix composite materials for PEMFC's bipolar plate which is having high conductivity, light weight, and low cost.

The formulation in this research are polypropylene (PP), Polyphenylene Sulfide (PPS), conductive filler materials (synthetic graphite, carbon black, carbon fibers), and antioxidant. All materials mixed in a hot blender and molded as testing samples. Each formulation were measured to find its tensile-strength, flexural-strength, and conductivity value. The influence of the addition additive PPS and Carbon showed that tensile strength and flexural strength influenced by the concentration of PPS in PP matrix. The highest conductivity value in this research is 0,847 S/cm.

Keywords:

Fuel cell, PEM fuel cell, bipolar plates, electrical conductivity, mechanical properties, polypropylene matrix composite, PPS, carbon, PP.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR SINGKATAN	xvi
DAFTAR SIMBOL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Ruang Lingkup & Batasan Masalah.....	3
BAB 2 LANDASAN TEORI	4
2.1 Teknologi PEM <i>Fuel Cell</i>	4
2.1.1 Struktur PEMFC	4
2.1.2 Sifat Elektrokimia PEMFC.....	6
2.2 Pelat Bipolar	7
2.2.1 Fungsi Pelat Bipolar	8
2.3 Komposit	9
2.3.1 Sifat Komposit.....	10
2.3.2 Komposit Bermatriks Polimer	12
2.4 Matriks Polimer	13
2.4.1 Polipropilena (PP)	13

2.4.2 Polyphenylene Sulfide (PPS)	16
2.5 Bahan Pengisi Konduktif.....	21
2.5.1 Karbon Hitam.....	21
2.5.2 Grafit Sintetik.....	21
2.5.3 Serat Karbon.....	23
2.6 Anti-oksidan	24
2.7 Kemampubasahan (<i>wettability</i>)	26
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	28
3.1 Diagram Alir Penelitian	28
3.2 Komposisi Bahan	30
3.3 Peralatan dan Bahan	31
3.3.1 Peralatan	31
3.3.2 Bahan-Bahan	33
3.3.2.1 Polipropilena (PP)	33
3.3.2.2 Karbon	34
3.3.2.3 Polyphenylene Sulfide (PPS)	36
3.3.2.4 Antioksidan	36
3.4 Prosedur Penelitian	37
3.4.1 Preparasi dan Fabrikasi Sampel	37
3.4.1.1 Penimbangan	37
3.4.1.2 Mixing	37
3.4.1.3 Penghalusan (<i>Crushing</i>)	38
3.4.1.4 Pencetakan Pelat (<i>Compression Molding</i>)	38
3.4.1.5 Pembuatan Spesimen Uji	39
3.4.2 Pengujian Karakterisasi Material	40
3.4.2.1 Pengujian Tarik (<i>Tensile</i>)	40
3.4.2.2 Pengujian kelenturan (<i>Flexural</i>)	41
3.4.2.3 Pengujian Konduktivitas Listrik	41
3.4.2.4 Pengamatan SEM	42

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1 Hasil Preparasi Sampel	44
4.1.1 Hasil Pencampuran (<i>Compounding</i>)	44
4.1.2 Hasil Penghalusan (<i>Crushing</i>)	45
4.1.3 Hasil Pencetakan (<i>Compression Molding</i>)	46
4.1.4 Hasil Pembuatan Spesimen Uji	47
4.2 Hasil Pengujian Karakterisasi	48
4.2.1 Hasil Pengujian Tarik (<i>Tensile</i>)	48
4.2.2 Hasil Pengujian kelenturan (<i>Flexural</i>)	51
4.2.3 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik	54
4.2.4 Perbandingan Sifat Komposit	55
4.2.5 Hasil Pengamatan SEM	55
4.2.5.1 Analisis Permukaan Patahan Spesimen F2	56
4.2.5.2 Analisis Permukaan Patahan Spesimen F3	58
4.2.5.3 Analisis Permukaan Patahan Spesimen F4	60
4.2.5.4 Analisis Permukaan Patahan Spesimen F5	62
BAB 5 KESIMPULAN	64
DAFTAR REFERENSI	65
LAMPIRAN	69

DAFTAR GAMBAR

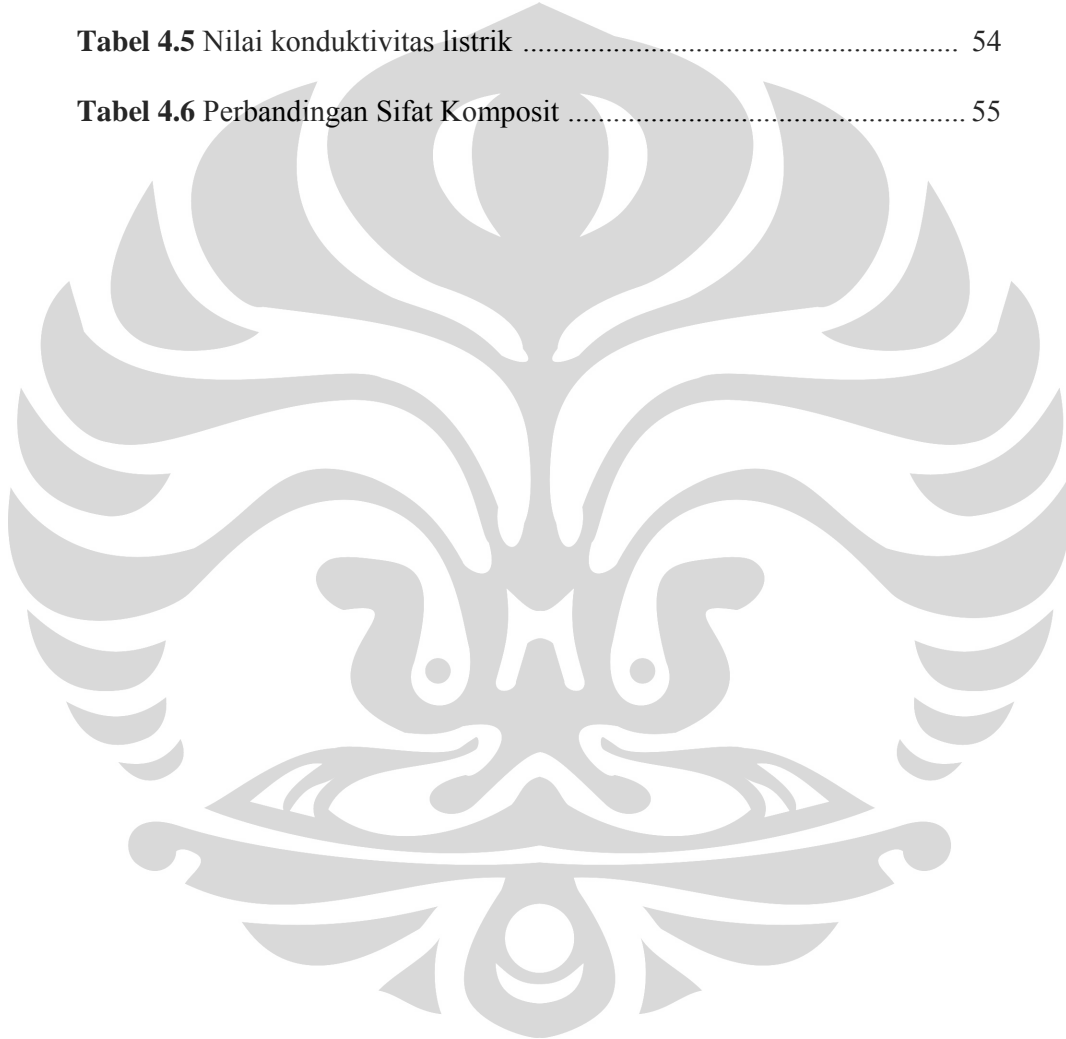
	Halaman
Gambar 2.1 Diagram Struktur PMFC	5
Gambar 2.2 Skema PMFC.....	7
Gambar 2.3 Pelat bipolar dengan saluran alir	7
Gambar 2.4 Letak pelat bipolar (<i>field flow plate</i>) pada PEM <i>fuel cell</i>	9
Gambar 2.5 Skema Fenomena Antarmuka.....	11
Gambar 2.6 Sudut Kontak. (a) $>90^\circ$, (b) $<90^\circ$	11
Gambar 2.7 Skema Fenomena Interfasa.....	12
Gambar 2.8 Polimerisasi propilena menjadi polipropilena	14
Gambar 2.9 Susunan stereoregular polipropilena: (a) isotaktik, (b) sindiotaktik, (c) ataktik	15
Gambar 2.10 Struktur kimia PPS	17
Gambar 2.11 Ikatan Antar Atom Grafit	23
Gambar 2.12 Siklus auto-oksidasi	25
Gambar 2.13 Tiga tegangan permukaan dalam kondisi <i>wetting</i> tetes cairan pada permukaan padat. Skema sudut kontak θ dan energi permukaan γ_{SL} , γ_{SV} , γ_{LV}	25
Gambar 2.14 Daya pembasahan berdasarkan besar sudut kontak (ϕ)	27
Gambar 3.1 Diagram alir preparasi dan fabrikasi sampel	28
Gambar 3.2 Diagram alir pengujian karakterisasi sampel	29
Gambar 3.3 Diagram skematik alat <i>compression molding</i>	38
Gambar 3.4 Skema bentuk spesimen uji tarik	40
Gambar 3.5 Skema pengujian tekuk 3-titik	41
Gambar 3.6 (a) Tempat penyimpanan sampel, (b) alat LCR-meter.	42
Gambar 3.7 Diagram sirkuit pengukuran konduktivitas listrik	42
Gambar 4.1 <i>Master batch</i> formula 2 dan 3 hasil <i>hot blending</i>	44
Gambar 4.2 <i>Master batch</i> formula 4 dan 5 hasil <i>hot blending</i>	45
Gambar 4.3 <i>Master batch</i> hasil <i>crushing</i> berbentuk granula	45
Gambar 4.4 Pelat tipe I	46
Gambar 4.5 Pelat tipe II	46

Gambar 4.6 Pelat tipe I mengalami retak akibat lengket dengan cetakan.....	47
Gambar 4.7 Spesimen uji tarik tipe IV dan spesimen uji tekuk	48
Gambar 4.8 Grafik perbandingan kekuatan tarik sampel.....	49
Gambar 4.9 Grafik perbandingan modulus tarik setiap formulasi sampel	51
Gambar 4.10 Grafik perbandingan kekuatan tekuk setiap formulasi komposit PP/PPS	52
Gambar 4.11 Grafik perbandingan modulus tekuk setiap formulasi komposit PP/PPS	53
Gambar 4.12 Grafik perbandingan nilai konduktivitas setiap formulasi komposit PP/PPS/C	54
Gambar 4.13 Permukaan patahan sample F2: (a) Perbesaran 50X, (b) Perbesaran 250X.....	56
Gambar 4.14 Permukaan patahan sample F3: (a) Perbesaran 50X, (b) Perbesaran 500X.....	58
Gambar 4.15 Permukaan patahan sample F4: (a) Perbesaran 50X, (b) Perbesaran 500X.....	60
Gambar 4.16 Permukaan patahan sample F5: (a) Perbesaran 250X, (b) Perbesaran 500X.....	62

DAFTAR TABEL

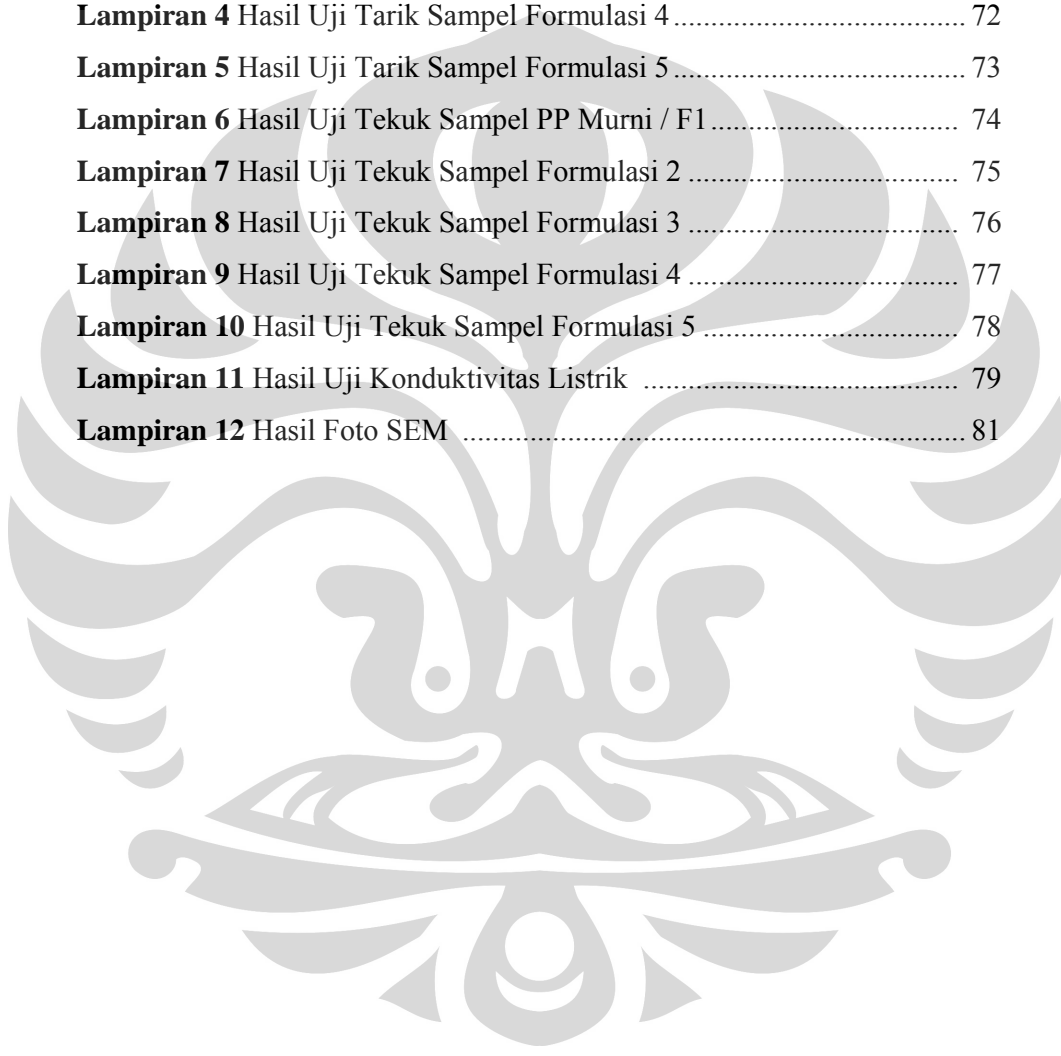
	Halaman
Tabel 2.1 Komponen-komponen utama PEM <i>fuel cell</i>	5
Tabel 2.2 Sifat material yang dibutuhkan untuk pelat bipolar ideal	9
Tabel 2.3 Sifat-sifat PP	14
Tabel 2.4 Jenis-jenis polipropilena	16
Tabel 2.5 Sifat-sifat grade termoplastik injection moulding PPS, PAS-1 dan PAS-217.....	19
Tabel 2.6 sifat-sifat PPS dan <i>Glass-fibre</i> PPS.....	20
Tabel 2.7 perbandingan sifat-sifat polimer thermoplastic.....	20
Table 2.8 Sifat-sifat umum grafit	22
Tabel 2.9 Sifat serat karbon berdasarkan bahan dasarnya	23
Tabel 2.10 Jenis-jenis serat karbon	24
Tabel 3.1 Komposisi dan pengkodean formulasi sampel	30
Table 3.2 Perbandingan fraksi massa ketiga jenis karbon	30
Tabel 3.3 Peralatan dan spesifikasinya	31
Tabel 3.4 Spesifikasi kopolimer blok polipropilena COSMOPLENE®	34
Tabel 3.5 Spesifikasi karbon	35
Tabel 3.6 Sifat-sifat karbon hitam <i>Cabot Vulcan XC-72</i>	35
Tabel 3.7 Sifat-sifat serat karbon <i>Fortail 243</i>	36
Tabel 3.8 sifat-sifat PPS dan <i>Glass-fibre</i> PPS.....	36
Tabel 3.9 Sifat-sifat CN-CAT B215	37
Tabel 3.10 Fase pencetakan untuk sampel F1, F2, dan F3	39
Tabel 3.11 Fase pencetakan untuk sampel F4 dan F5	39

Tabel 3.12 Dimensi spesimen uji tarik tipe IV	40
Tabel 4.1 Nilai kekuatan tarik (<i>tensile strength</i>)	48
Tabel 4.2 Nilai modulus tarik	50
Tabel 4.3 Nilai kekuatan kelenturan (<i>flexural strength</i>)	51
Tabel 4.4 Nilai modulus kelenturan (<i>flexural modulus of elasticity</i>)	53
Tabel 4.5 Nilai konduktivitas listrik	54
Tabel 4.6 Perbandingan Sifat Komposit	55



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Hasil Uji Tarik Sampel PP Murni / F1	69
Lampiran 2 Hasil Uji Tarik Sampel Formulasi 2	70
Lampiran 3 Hasil Uji Tarik Sampel Formulasi 3	71
Lampiran 4 Hasil Uji Tarik Sampel Formulasi 4	72
Lampiran 5 Hasil Uji Tarik Sampel Formulasi 5	73
Lampiran 6 Hasil Uji Tekuk Sampel PP Murni / F1	74
Lampiran 7 Hasil Uji Tekuk Sampel Formulasi 2	75
Lampiran 8 Hasil Uji Tekuk Sampel Formulasi 3	76
Lampiran 9 Hasil Uji Tekuk Sampel Formulasi 4	77
Lampiran 10 Hasil Uji Tekuk Sampel Formulasi 5	78
Lampiran 11 Hasil Uji Konduktivitas Listrik	79
Lampiran 12 Hasil Foto SEM	81



DAFTAR SINGKATAN

C	<i>Carbon</i>
DOE	<i>Department of energy</i>
EPDM	<i>Ethylene-propylene-diene terpolymer</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>
PPS	<i>Polyphenylene Sulfide</i>
SEM	<i>Scanning electron microscopy</i>

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
$wt\%$	Persen berat	
σ_c	Tegangan/kekuatan tarik komposit	N/m ²
σ_m	Tegangan/kekuatan tarik matriks	N/m ²
σ_f	Tegangan/kekuatan tarik pengisi/serat	N/m ²
V_m	Fraksi volume matriks	
V_f	Fraksi volume pengisi/serat	
E_m	Modulus elastisitas matriks	N/m ²
E_f	Modulus elastisitas pengisi/serat	N/m ²
E_{cl}	Modulus elastisitas komposit serat panjang lurus	N/m ²
E_{cd}	Modulus elastisitas komposit serat pendek acak	N/m ²
K	Parameter efisiensi serat	
ε_c	Regangan komposit	m/m
ε_m	Regangan matriks	m/m
ε_f	Regangan pengisi/serat	m/m
γ_{SL}	Tegangan permukaan antara padatan dan cairan	N/m
γ_{SV}	Tegangan permukaan antara padatan dan uap	N/m
γ_{LV}	Tegangan permukaan antara cairan dan uap	N/m
θ	Sudut kontak antara cairan dan permukaan padat	
ρ_c	Kerapatan massa komposit	g/cm ³
ρ_f	Kerapatan massa pengisi/serat	g/cm ³
ρ_m	Kerapatan massa matriks	g/cm ³
M_f	Fraksi massa pengisi/serat	
ρ_{sampel}	Kerapatan massa sampel	g/cm ³
ρ_{air}	Kerapatan massa air	g/cm ³
M_u	Massa sampel di udara	gram
M_a	Massa sampel di air	gram

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Perkembangan modernisasi dalam kehidupan manusia menimbulkan peningkatan kebutuhan terhadap sumber energi. Sumber energi berasal dari alam yang tidak dapat diperbaharui hingga saat ini masih menjadi sumber energi utama yang tinggi tingkat konsumsinya. Karena sifatnya yang tidak dapat diperbaharui, maka peningkatan konsumsi sumber energi dapat mengakibatkan kelangkaan sumber energi itu sendiri[1]. Oleh karena itu, diperlukan adanya substitusi sumber energi yang tidak dapat diperbaharui, yaitu sumber energi alternatif yang dapat diperbaharui.

Fuel cell (sel tunam) merupakan salah satu sumber energi alternatif yang sedang dikembangkan. *Fuel cell* bekerja untuk mengkonversi hidrogen menjadi listrik. Pada awalnya, *fuel cell* menggunakan logam sebagai material utamanya. Namun penggunaan material logam ini mempunyai kelemahan pada minimnya daya tahan (*lifetime*) akibat terjadi proses korosi yang dapat mempengaruhi tingginya biaya pemakaian. Selain itu, *fuel cell* logam menjadi kurang portabel karena cukup berat. Atas dasar faktor-faktor tersebut, maka dikembangkanlah *Polymer Electrolyte Membran Fuel Cell* (PEMFC) yang menggunakan bahan dasar komposit.

PEM *fuel cell* dapat menjadi sumber energi listrik yang menjanjikan dimasa depan untuk aplikasi stasioner, transportasi, dan peralatan elektronik portabel dengan berbagai keunggulan yang tidak dimiliki oleh sumber energi listrik lain, seperti efisiensi dan kerapatan arus yang tinggi, temperatur operasi yang rendah, ketersediaan suplai bahan bakar, dan umur pakai yang lama [1]. Namun keunggulan PEM *fuel cell* tersebut masih terkendala dalam proses produksinya. Pada proses produksi PEM *fuel cell*, terdapat beberapa kendala antara lain yaitu, daya hantar listrik yang masih rendah, biaya produksi yang masih tinggi, penyimpanan dan pendistribusian gas hidrogen. Hal ini menjadi

faktor yang menyebabkan PEM *fuel cell* belum cukup ekonomis untuk diproduksi secara massal sehingga belum mampu dikomersialisasikan.

Komponen utama yang terdapat pada *fuel cell* adalah *Membrane electrolyte assembly* (MEA), lapisan difusi gas (GDL), pelat bipolar, penyimpan arus, dan pelat penutup. Pelat bipolar merupakan komponen paling vital dalam *fuel cell* yang berfungsi sebagai penghantar arus listrik. Selain itu, pelat bipolar mencegah perpindahan gas dan air yang terdapat pada katoda dan anoda. Pelat bipolar juga merupakan komponen dominan pada *fuel cell* karena mempengaruhi 80% volume, 70% bobot, dan 60% dari biaya produksi *fuel cell* [1]. Hal ini menunjukkan bahwa pelat bipolar memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap proses dan hasil produksi PEM *fuel cell*. Oleh karena itu, untuk mengurangi biaya produksi, ukuran, dan bobot PEM *fuel cell* perlu dilakukan modifikasi terhadap pelat bipolar dengan menggunakan material baru, misalnya komposit bermatriks polimer. Komposit bermatriks polimer dipilih karena alasan manufaktur, yaitu biaya produksi yang relatif rendah, dapat diproduksi secara massal, mudah dibentuk, dan memiliki kemampumesinan yang baik. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan komposit bermatriks polimer sebagai material pelat bipolar dapat memberikan alternatif solusi terhadap kendala proses produksi. Dengan menggunakan komposit bermatriks polimer sebagai bahan baku, maka ukuran, berat dan biaya produksi pelat bipolar dapat berkurang menjadi 15%-29% dari biaya produksi PEM *fuel cell*.

1.2 TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Memformulasi komposit yang efektif dengan berbagai variasi komposisi berdasarkan parameter konduktivitas dan kekuatan mekanik.
2. Membandingkan sifat konduktivitas dan sifat mekanik komposit dari pengaruh penambahan bahan pengisi gabungan tiga jenis karbon yang berbeda-beda.
3. Mengetahui pengaruh penambahan *Polyphenylene Sulphides* (PPS).
4. Membuat pelat bipolar berbahan dasar dari komposit bermatriks polimer dengan konduktivitas yang tinggi, bobot yang ringan, serta biaya bahan baku dan proses produksinya yang ekonomis.

1.3 RUANG LINGKUP & BATASAN MASALAH

Dalam studi ini, polimer termoplastik yang digunakan sebagai matriks campuran adalah polipropilena (PP) berjenis blok kopolimer dengan penambahan aditif *Polyphenylene Sulphides* (PPS) sebagai salah satu variabel material yang digunakan dalam memproduksi pelat bipolar. Pemilihan aditif PPS karena merupakan jenis aditif yang mempunyai nilai *ternsile strength* terbesar [2] dibandingkan jenis aditif lainnya sehingga diharapkan dapat memperoleh pelat bipolar yang memiliki kekuatan mekanik (*mechanical strength*) dan konduktivitas yang baik.

Komposit konduktif termoplastik dapat dihasilkan melalui pencampuran antara polimer termoplastik dengan bahan pengisi konduktif, seperti karbon hitam, serat karbon, dan grafit.. Penelitian ini juga memanfaatkan antioksidan sebagai campuran komposit untuk mencegah terjadinya degradasi selama proses pencampuran.

Penelitian ini terdiri dari 5 komposisi. Komposisi 1 terdiri dari PP 100 wt%. Komposisi 2 terdiri dari PP 50 wt%, karbon hitam 22 wt%, dan serat karbon 22 wt%. Komposisi 3 terdiri dari PP 50 wt%, karbon hitam 15 wt%, serat karbon 20 wt%, dan grafit 9 wt%. Komposisi 4 terdiri dari PP 14 wt%, karbon hitam 30 wt%, serat karbon 25 wt%, dan grafit 25 wt%. Komposisi 5 terdiri dari PP 14 wt%, karbon hitam 40 wt%, serat karbon 20 wt%, dan grafit 20 wt%. Untuk setiap komposisi ditambahkan PPS 5 wt% dan antioksidan 1 wt%.

Setiap komposisi diuji meliputi pengujian tarik (*tensile*), pengujian tekuk (*flexural*), dan pengujian konduktivitas listrik serta pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengamati morfologi material komposit pada bagian perpatahan sampel.

BAB 2

LANDASAN TEORI

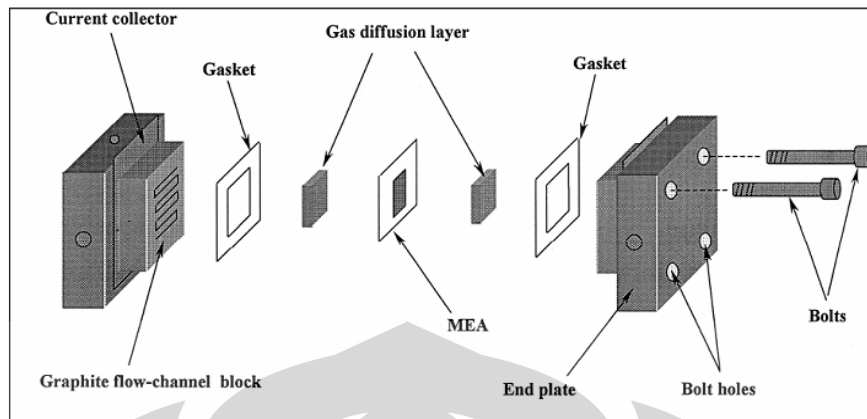
2.1 Teknologi PEM Fuel Cell

Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) merupakan hasil pengembangan *fuel cell* konvensional yang semula menggunakan material berbahan dasar logam, kemudian dikembangkan menggunakan material berbahan dasar polymer. PEMFC merupakan alat untuk mengkonversi energi kimia dari bahan bakar langsung menjadi energi listrik. Bahan bakar *fuel cell* ini umumnya hidrogen. Hidrogen bisa diperoleh dari hasil turunan zat-zat lain, misalnya air. PEMFC sangat menjanjikan untuk sumber energi transportasi dan peralatan elektronik portabel. PEMFC menawarkan sebuah sumber energi baru yang memiliki potensial yang baik, ringan, memiliki densitas energi yang tinggi, serta temperatur yang rendah.

Di sisi lain, ada berbagai hambatan dalam pengkomersialisasian PEM *fuel cell*, seperti biaya produksinya masih tinggi, kurangnya produksi hidrogen dan infrastruktur distribusi, rendahnya kerapatan/densitas wadah penyimpanan gas, masalah kekuatan susunan PEM *fuel cell*. 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* [1].

2.1.1 Struktur PMFC

PMFC memiliki beberapa komponen primer yang memegang peranan penting dalam menjalankan fungsi dari PMFC itu sendiri, yaitu *membrane electrolyte assembly (MEA)*, pelat bipolar, *endplate*, dan pengumpul arus.



Gambar 2.1 Diagram Struktur PMFC[1]

Tabel 2.1 Komponen-komponen utama PEM *fuel cell* [3].

Komponen	Material	Fungsi
Membrane electrolyte assembly (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 alumunium)	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 Sifat Elektrokimia PEMFC

Pada PEMFC, gas kaya oksigen atau hidrogen yang dimampatkan berperan sebagai bahan bakar dan oksigen yang dimampatkan berfungsi sebagai oksidan. Dari anoda, hidrogen berdifusi melalui *gas diffusion layer* menuju lapisan katalisator dimana molekul hidrogen terpecah menjadi elektron dan proton mengikuti reaksi elektrokimia setengah sel berikut ini.

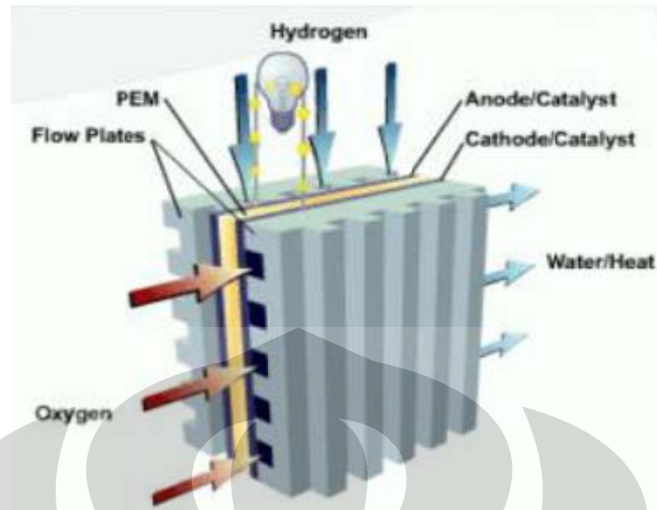


Proton akan berjalan melewati membran elektrolit menuju katoda dan elektron akan berjalan melalui sirkuit eksternal menuju katoda. Pada katoda, oksigen berdifusi melalui katoda *gas diffusion layer* menuju katoda katalis. Pada katalis, oksigen akan bereaksi dengan proton dan elektron membentuk air dan memproduksi panas sesuai dengan reaksi setengah sel berikut ini [4].



Sehingga reaksi keseluruhan pada PEMFC adalah sebagai berikut.



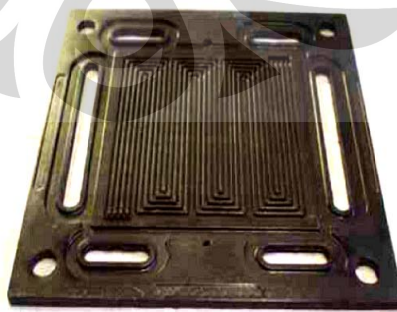


Gambar 2.2 Skema PMFC^[4]

2.2 Pelat Bipolar

Pelat bipolar (*flow field plate*) berfungsi 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 [5].

Jalur alir gas dibuat pada permukaan pelat sebagai tempat aliran gas-gas yang bereaksi. Gambar 2.3 di bawah ini menunjukkan sebuah pelat bipolar PEM *fuel cell* dengan saluran alir.



Gambar 2.3 Pelat bipolar dengan saluran alir [6].

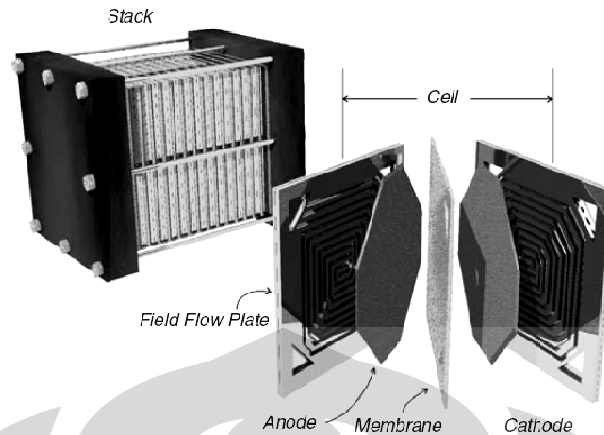
pelat bipolar sebagai komponen utama pada PEM *fuel cell* memenuhi bagian yang signifikan dari total biaya dan bobot rangkaian *fuel cell*. Pelat bipolar mencakup 80% total bobot dan 45% biaya, sehingga hal ini bersifat kritis dan perlu pertimbangan dalam mendesain *fuel cell* [10].

Salah satu proses yang membutuhkan biaya adalah pembuatan saluran alir (*flow path*) pada permukaan pelat bipolar, 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*.

2.2.1 Fungsi Pelat Bipolar

Fungsi utama pelat bipolar adalah sebagai berikut:

- Sebagai konduktor panas untuk meregulasikan temperatur *fuel cell* dan memindahkan panas dari elektroda ke saluran pendingin.
- 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 H₂ ke anoda dan O₂ ke katoda, serta membuang air hasil reaksi;
- Sebagai penguat mekanik sekaligus penahan membran tipis dan elektroda, serta sebagai penjepit rangkaian *fuel cell* seperti terlihat pada Gambar 2.4;



Gambar 2.4 Letak pelat bipolar (*field flow plate*) pada PEM *fuel cell* [7].

Agar pelat bipolar mampu menjalankan semua fungsi tersebut, maka dibutuhkan material yang tepat. Sifat-sifat material pelat bipolar yang ideal disajikan pada Tabel 2.2 berikut ini:

Tabel 2.2 Sifat material yang dibutuhkan untuk pelat bipolar ideal [1].

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 H_2 $10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}\cdot\text{cm}^2$
Korosi	$8 \times 10^{-7} \text{ mol}/\text{cm}^2$ per 5000 jam atau $0,0016 \text{ mA}/\text{cm}^2$ per 5000 jam

2.3 Komposit

Komposit merupakan perpaduan dua atau lebih material yang memiliki perbedaan fasa dan sifat yang berbeda, membentuk satu material yang memiliki sifat yang lebih baik daripada material penyusunnya. Namun, material penyusun masih dapat dibedakan secara makro.

Komposit terdiri dari dua penyusun, yaitu matriks dan penguat (*reinforcements*) [8]. Matriks berfungsi sebagai pengikat dari penguat, mendistribusikan beban antara penguat, memproteksi penguat dari lingkungan, dan melindungi permukaan abrasi mekanis. Pemilihan matriks dalam suatu komposit menjadi penting karena dalam suatu komposit dibutuhkan sifat mekanis yang baik, kemampuprosesan yang baik, dan juga memiliki resistansi yang baik terhadap bahan kimia dan panas.

2.3.1 Sifat Komposit

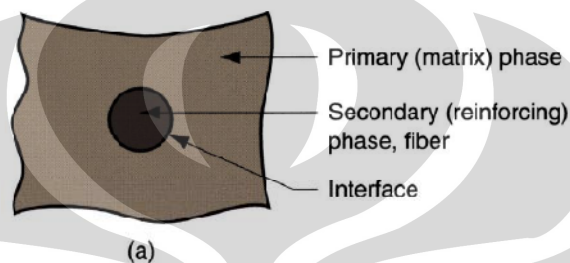
Sifat dari sebuah material komposit sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat dan konsentrasi konstituen penyusunnya, arah orientasi penguat, dan juga ikatan antara matriks dan penguatnya.

Pencampuran komposit memerlukan sebuah hipotesa awal mengenai sifat dari material komposit yang diinginkan sesuai dengan aplikasinya. Dari hipotesa tersebut, dapat diprediksi material bahan baku apa yang dapat digunakan sebagai konstituen penyusun material komposit yang diinginkan. Sebagai contoh, diinginkan sebuah komposit dengan sifat mekanis yang baik dan juga sifat konduktivitas yang baik. Dalam hal ini dapat digunakan material polimer yang memiliki sifat mekanis yang baik, tetapi sifat konduktivitasnya kurang baik. Sifat konduktivitas ini dapat ditingkatkan dengan penambahan penguat karbon. Namun, penambahan penguat karbon ini dapat menurunkan sifat mekanis dari material komposit yang dihasilkan karena sifatnya yang getas. Oleh karena itu, dibutuhkan komposisi yang tepat untuk mendapatkan sifat mekanis dan konduktivitas yang optimal.

Arah orientasi penguat mempengaruhi sifat material komposit. Pengaturan arah orientasi penguat ini dapat diatur untuk merekayasa sifat dari material komposit tersebut, seperti sifat mekanis dan konduktivitasnya. Arah orientasi penguat yang searah dengan arah pembebanan akan mampu memberikan performa mekanis yang baik terhadap pembebanan tersebut.

Ikatan antara penguat dan matriks memiliki peran yang besar dalam penentuan sifat komposit. Hal ini berkaitan erat dengan fenomena antarmuka dan fenomena interfasa. Ikatan antarmuka adalah ikatan yang terbentuk antara dua

fasa yang berbeda. Ikatan antarmuka berfungsi sebagai media transfer beban dari matriks dan penguat. Semakin luas bidang sentuh antara permukaan, semakin besar efek yang dihasilkan dari ikatan tersebut sehingga meningkatkan sifat ikatan dari material komposit yang diinginkan. Ikatan antarmuka ini mempengaruhi kekuatan, kekakuan, ketahanan mulur, dan degradasi akibat lingkungan pada material komposit [9]. Skema ikatan antarmuka dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Skema Fenomena Antarmuka^[9].

Ikatan antarmuka sangat berkaitan erat dengan kemampubasahan (*wettability*) dari permukaan kedua konstituen. Kemampubasahan dipengaruhi oleh tegangan permukaan dari ikatan tersebut. Untuk pembasahan yang baik, dibutuhkan tegangan permukaan dari penguat yang lebih tinggi daripada matriks, sehingga matriks dapat membasahi penguat dengan baik.

Kemampubasahan dapat dilihat melalui sudut kontak (*contact angle*) dari pembasahan tersebut. Apabila sudut kontak di bawah 90° , maka kemampubasahan dari ikatan antarmuka tersebut baik, sedangkan pembasahan tidak akan terjadi apabila sudut kontak lebih dari 90° . Skema dari sudut kontak permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.6 di bawah ini.

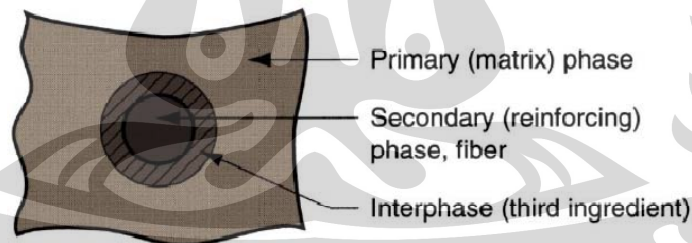


Gambar 2.6 Sudut Kontak. (a) $>90^\circ$, (b) $<90^\circ$ [10]

Ikatan antarmuka ini dapat ditingkatkan dengan beberapa cara, yaitu :

- Permukaan harus bersih dari partikel asing
- Luas area kontak yang besar
- Tegangan permukaan yang tinggi, terutama pada komposit dengan matriks yang mengandung gugus polar
- Tegangan permukaan penguat yang lebih tinggi daripada matriks
- Penciptaan atau penambahan gugus kimia
- Variasi topografi permukaan untuk menciptakan ikatan mekanis pada permukaan

Sedangkan, fenomena interfasa adalah sebuah fenomena dimana terbentuk sebuah lapisan fasa ketiga dalam suatu ikatan antarmuka. Interfasa dapat terbentuk apabila ikatan antarmuka dari konstituen penyusun sangat baik dan mampu berdifusi untuk menciptakan fasa ketiga. Selain itu, dapat digunakan juga sebuah adesif untuk menciptakan ikatan interfasa ini. Fasa ketiga ini memiliki sifat gabungan dari kedua fasa pembentuknya sehingga sangat berpengaruh terhadap sifat komposit yang terbentuk. Skema ikatan interfasa dapat dilihat pada Gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7 Skema Fenomena Interfasa[9]

2.3.2 Komposit Bermatriks Polimer

Komposit bermatriks polimer merupakan jenis komposit yang menggunakan bahan penguat berupa serat, partikel, atau serpihan sedangkan polimer sebagai matriks pengikatnya. Jenis serat yang biasa dipakai sebagai penguat dalam matriks polimer adalah serat karbon, serat gelas, dan serat aramid (Kevlar) [11, 12].

Pembentuknya komposit bermatriks polimer umumnya karena alasan manufaktur, yaitu biaya pembuatan yang relatif lebih rendah, dapat diproduksi secara massal, mudah dibentuk dan memiliki kemampuan permesinan (*machinability*) yang baik [13, 14]. Selain itu, tujuan umum lainnya adalah untuk memperoleh produk dengan ketangguhan yang tinggi dan relatif lebih ringan. Secara khusus polimer dipilih sebagai matriks karena harganya murah, ketersediaan jumlah yang memadai, tahan terhadap bahan kimia, dan memiliki sifat-sifat mekanik yang baik, serta tidak tembus air maupun udara [15].

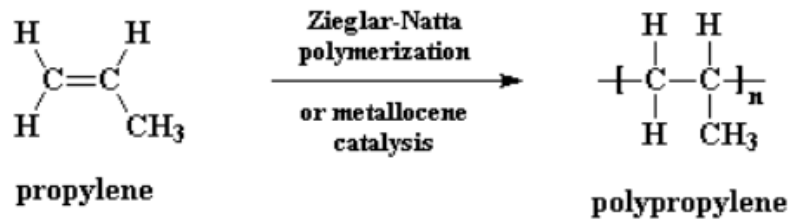
Komposit yang dibuat dari campuran antara matriks polimer dengan bahan pengisi konduktif seperti karbon hitam, serat karbon, grafit, dan partikel logam disebut dengan komposit konduktif polimer. Pelat bipolar yang terbuat dari komposit polimer konduktif memiliki bobot yang ringan dan daya tembus gas yang rendah, serta mampu mengurangi biaya manufaktur dengan produksi massal [1].

2.4 Matriks Polimer

Polimer termoplastik seperti polipropilena (PP), polietilena (PE), Polyphenylene Sulfide (PPS), dan polimer termoset seperti fenolik, epoksi, dan vinil ester dapat digunakan untuk membuat komposit pelat bipolar [16]. Polimer tidak hanya berperan sebagai matriks dalam proses fabrikasi pelat bipolar, tetapi juga sebagai faktor utama yang mempengaruhi performa pelat bipolar, seperti konduktivitas listrik dan kekuatan tekuk (*flexural*). Pada penelitian ini, polimer yang digunakan sebagai matriks adalah campuran antara termoplastik polipropilena dan PPS.

2.4.1 Polipropilena (PP)

Merupakan polimer hidrokarbon linier hasil reaksi polimerisasi dari propilena yang dapat dinotasikan sebagai C_nH_{2n} . Polipropilena ditemukan pertama kali oleh Giulio Natta (Italia) dengan melanjutkan penelitian Karl Ziegler (Jerman) pada tahun 1954. Makromolekul polipropilena terdiri dari 10.000 sampai 20.000 unit monomer [17].



Gambar 2.8 Polimerisasi propilena menjadi polipropilena ^[18].

PP memiliki kerapatan sebesar $0,9 \text{ g/cm}^3$. Polimer jenis ini terdiri dari makromolekul dengan rantai linear atau bercabang yang menyatu bersama dalam ikatan antarmolekul. Polimer jenis termoplastik tidak memiliki ikatan silang (*cross-link*).

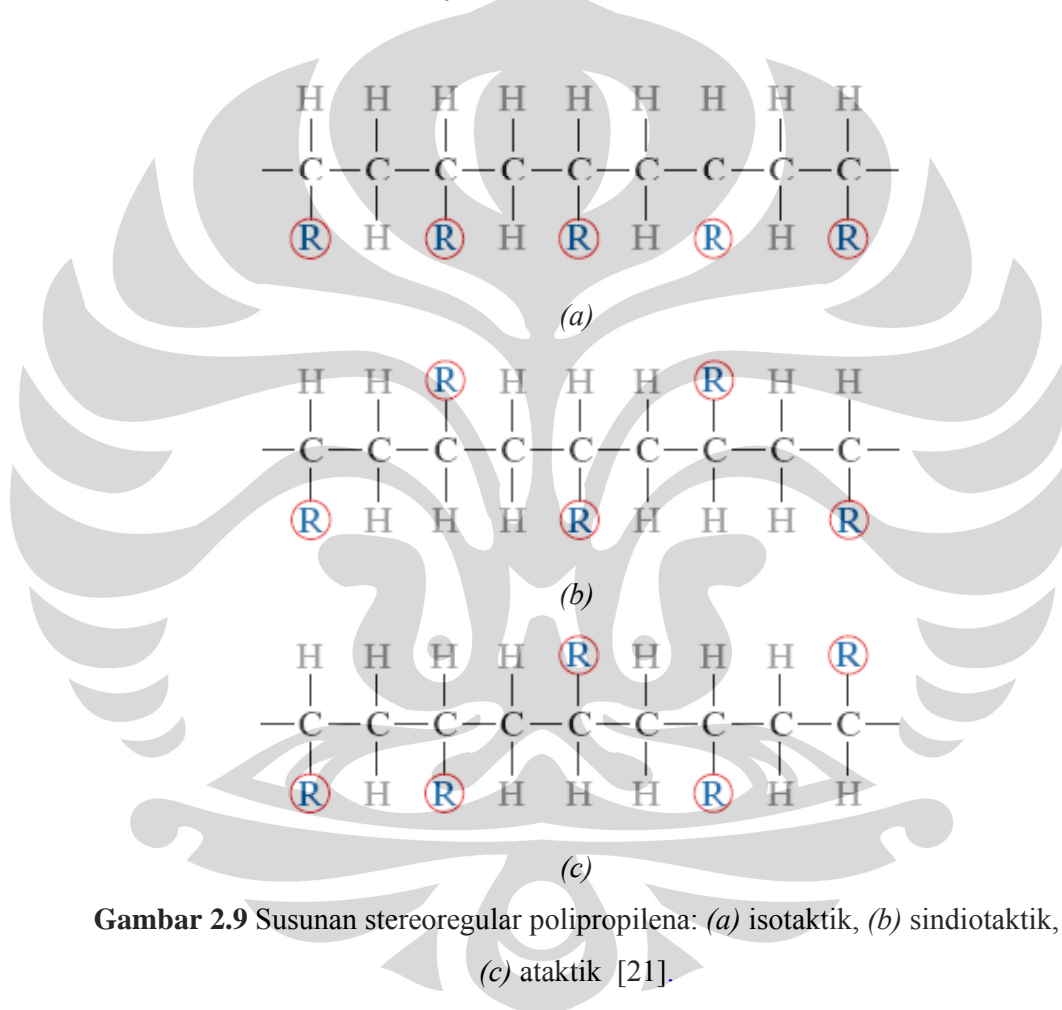
PP memiliki kristalinitas yang cukup tinggi berperan pada tingginya kekuatan tarik, kekakuan, dan kekerasan polipropilena. Besarnya perbandingan antara kekuatan terhadap berat polipropilena memberikan keuntungan dalam aplikasinya. Beberapa sifat mekanik polipropilena dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3 Sifat-sifat PP [19, 20].

Sifat-Sifat	Keterangan
Kerapatan	$0,89 - 0,92 \text{ g/cm}^3$
Titik Leleh	$160 - 170 \text{ }^\circ\text{C}$
Kekuatan Tarik	$31 - 38 \text{ MPa}$
Elongasi	$200 - 700 \%$
Modulus Tekuk	$1.170 - 1.730 \text{ MPa}$
Temp. Transisi Gelas	$-35 - 26 \text{ }^\circ\text{C}$
Penyusutan cetakan	$0,015 - 0,025 \text{ cm/cm}$

Polipropilena memiliki rantai molekul linier, sehingga dapat disusun teratur dalam struktur kristalnya. Tetapi karena adanya gugus samping, maka keteraturan susunannya tidak sempurna. Oleh karena itu, polipropilena disebut polimer semikristalin.

Polipropilena memiliki susunan stereoregular terbagi menjadi tiga jenis (Gambar 2.9). Bila gugus metil berada pada sisi yang sama dalam rantai utama, maka susunan tersebut dinamakan polipropilena *isotaktik*. Bila gugus metil berada pada posisi berselang-seling dalam rantai utama, maka disebut polipropilena *sindiotaktik*. Sedangkan bila gugus metil terletak secara acak, maka disebut sebagai polipropilena *ataktik* [21]. Polipropilena komersial umumnya terdiri dari 95-98% isotaktik dan selebihnya ataktik.



PP diproduksi secara luas melalui proses polimerasi monomer propilena dengan menggunakan katalis stereospesifik Ziegler-Natta. Katalis ini disebut stereospesifik karena mengontrol posisi gugus samping, yaitu gugus metil dalam tiap unit propilena pada rantai polimer. Kebanyakan polipropilena komersial yang diproduksi bersifat isotaktik [17].

Polipropilena juga memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi dan daya tahan yang baik terhadap pelarut organik, agensia peluruh, serangan elektrolitik, serta larutan asam-basa. Ditambah lagi, sifat viskoelastik polimer membuat material ini mudah dibentuk. Dengan demikian, biaya pembuatan material polimer relatif lebih murah daripada material lain.

Polipropilena yang beredar di pasaran dapat digolongkan ke dalam tiga jenis seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.4, yaitu homopolimer, kopolimer acak, dan kopolimer blok. Dimana material yang digunakan sebagai gabungan untuk membentuk kopolimer adalah etilena. Kopolimer blok digunakan untuk aplikasi yang melibatkan ketahanan impak. Kopolimer ini umumnya dipakai dalam proses cetak injeksi. Kopolimer acak memiliki transparansi yang baik dan digunakan dalam pembuatan film.

Tabel 2.4 Jenis-jenis polipropilena.

Urutan Monomer	Nama Produk
PPPPPPPPPPPPPPPPPP	Homopolimer Polipropilena
PPEPPPPPEPPPPPE	Kopolimer Acak Polipropilena
PPPPPPPPP + EPEPEPEPEP	Kopolimer Blok Polipropilena
PPPPPPP + EPEPEPEP + EEEEEEE	

(Keterangan: **P** = Propilena dan **E** = Etilena)

2.4.2 Polyphenylene Sulfide (PPS)

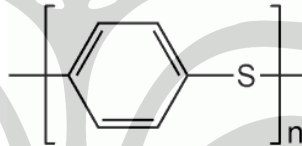
Komposit polimer berpengisi dapat ditingkatkan kekuatannya dengan meningkatkan ketangguhan matriks, mengoptimalkan ikatan antarmuka dan antarfasa antara pengisi dengan matriks melalui penambahan zat penggabung (*coupling agents*) dan *compatibilizer*, serta mengoptimalkan sifat-sifat yang berhubungan dengan pengisi, seperti jenis pengisi, ukuran partikel, dan dispersi partikel. Salah satu aditif polimer yang digunakan untuk meningkatkan ketangguhan komposit adalah *Polyphenylene Sulfide* (PPS).

Polyphenylene Sulphides (PPS) merupakan polimerisasi kompon logam *p-halothiophenoxide* dalam bentuk padat dan larutan. PPS juga bisa didapat dengan mengkondensasi *p-dichlorobenzene* dengan elemen sulfur dalam *sodium*

carbonate pada saat polimer komersial diproduksi dari reaksi *p-dichlorobenzene* dengan *sodium sulphide* dalam pelarut polar.

PPS diperkenalkan oleh *Phillips Petroleum* tahun 1968 dengan nama *Ryton*. Terdapat dua jenis aditif PPS : *thermoplastic branched polymer* dengan viskositas yang sangat tinggi yang dihasilkan oleh proses-proses tipe PTFE dan *initially linear polymer* yang dapat diproses dengan *compression moulding* termasuk laminating dengan *fibre glass*, secara cross-link oksidatif.

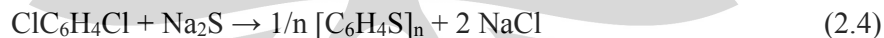
Proses produksi komersial PPS dikembangkan oleh Dr. H. Wayne Hill Jr. dan Mr. James T. Edmonds di *Phillips Petroleum Company*. *N-methylpyrrolidone* digunakan sebagai pelarut reaksi karena stabil pada suhu tinggi, hal tersebut diperlukan untuk proses sintesis dan larut dalam *sulfiding agent* dan *oligomeric intermediates*



Gambar 2.10 Struktur kimia PPS^[22].

PPS merupakan polymer yang tahan pada suhu tinggi ($T_m = 285^\circ\text{C}$), tahan terhadap panas, asam dan basa, lumut, *bleache*, *aging*, sinar matahari dan abrasi. PPS hanya menyerap sedikit pelarut dan tahan terhadap *dyeing*[22].

PPS polimer dibentuk dari reaksi sulfida dengan *p-dichlorobenzene*:



Ketika diperkenalkan di Eropa tahun 1973, penekanan utamanya adalah pada *moderate molecular weight grades* yang dapat di-*injection moulding* pada suhu 340°C hingga 370°C dan jika diinginkan bisa dicross-linking dengan menggunakan udara (*aging*). Dalam tahap pencetakan, suhu cetakan berkisar antara 25 hingga 40°C serta memberikan dampak *impact strength* terbesar jika permukaan cetakan bisa mencapai suhu 120°C .

Dengan berakhirnya patent Phillips, perusahaan-perusahaan lain mulai memasuki pasar sehingga pada awal tahun 90-an terdapat enam produsen selain Phillips, yaitu Bayer (Tedur), Hoechst-Celanese (Fortron) dan General Electric (Supec). Hal ini mengakibatkan kapasitasnya menjadi berlebih, namun produksi meningkat dari 10.000 ton di tahun 1985 menjadi sekitar 35.000 ton di tahun 1997. Persaingan tersebut telah merangsang produksi material dengan grade yang lebih tinggi. Umumnya, banyak material dengan grade baru yang memiliki lebih sedikit rantai cabang (*branch*) dibandingkan dengan grade material sebelumnya, sehingga memungkinkan pembentukan serat fiber, memproduksi *biaxially stretched film* dan mencetak dengan *impact resistance* yang lebih baik. Grade yang lebih baru juga memiliki tingkat kontaminasi ion yang lebih rendah. Ketika grade yang lebih baru dari PPS diperkenalkan, Phillips juga memproduksi beberapa jenis polimer acak (*amorp*) serupa yang menarik.

Sifat *poly(phenylene sulphides)* beraneka ragam sesuai *grade*-nya, khususnya karena bervariasinya linearitas molekul dan adanya kontaminan. Pada umumnya karakteristik PPS sebagai berikut :

1. Tahan panas (untuk material termoplastik)
2. Tahan api
3. Tahan bahan kimia, walaupun masih kalah oleh beberapa polimer lain, seperti PTFE
4. Bersifat insulasi listrik, meskipun masih kalah dari beberapa jenis polimer lain seperti PTFE dan *polyethylene*.

Polimer linear terkristalisasi dalam suhu antara 285-295°C dengan nilai *temperatur glass Tg* 85°C hingga 150°C. *Unfilled Material* memiliki suhu defleksi panas rendah, namun *grade filled* memiliki nilai melebihi 260°C. Menurut *US Underwriters Laboratories*, grade PPS diindikasikan sebesar 240°C, sebagai peringkat tertinggi dalam material termoplastik komersial. Analisa *thermogravimetric* menunjukkan tidak ada kehilangan berat yang berarti nitrogen dan oksigen pada temperatur di bawah 500°C.

Ketahanan PPS terhadap pembakaran juga sangat baik, hal ini ditunjukkan oleh kandungan oksigen 53% dan klasifikasi *Underwriters Laboratories* 94 V-0 dan 94-5V tanpa penggunaan aditif. Peringkat UL94 V-0 dicapai dengan

ketebalan wall terendah 0,5mm, menjadikan material tersebut sangat dipilih termasuk *polyethersulphones*, *polyester liquid crystal polymers*, *polyketones* dan *polyetherimides*.

Umumnya, seluruh grade PPS mampu melampaui pengujian *glow wire test* pada suhu 960°C dengan ketebalan 3.2mm.

Ketahanan api dari PPS juga menarik karena menghasilkan asap, racun, dan emisi korosif yang sedikit jika dibakar dengan api.

Ketahanan kimia PPS sangat baik. Tahan terhadap asam, *aqueous bases*, hidrokarbon, hidrokarbon halogena, alkohol dan phenol. Zat-zat kimia tersebut diserang dengan konsentrasi *sulphuric acid*, *formic acid*, beberapa *amine*, *benzaldehyde*, *nitromethane* dan beberapa *reagent* lainnya. Polimer akan mengalami *cross-linking* oleh oksidasi udara saat suhu mengalami kenaikan

Sifat-sifat PPS ditampilkan pada tabel 2.5. Rigiditas dan tensile strength PPS memiliki kesamaan dengan material *engineering* pada umumnya.

Tabel 2.5 Sifat-sifat grade termoplastik injection moulding PPS, PAS-1 dan PAS-2 [23]

<i>Property</i>	<i>Units</i>	<i>PPS</i>	<i>PPS/GF (60/40)</i>	<i>PAS-1</i>	<i>PAS-2</i>
T_g	°C	85	—	145	215
Heat distortion temp. (Method A)	°C	135	265	170	190
Tensile strength (21°C)	MPa	64–77	150	77	92
(204°C)	MPa	33	33	—	—
Elongation at break	%	3	2	—	>10
Flexural modulus	MPa	3900	10 500	3400	3200
Izod impact (unnotched)	J/m	320	350	223	1200
(notched)	J/m	20	—	21	50
Limiting oxygen index	%	44	47	46	46
Dielectric constant (10^3 – 10^6 Hz)		3.1	3.8	—	—
Dissipation factor (1 kHz)		0.004	0.0037	—	—
Volume resistivity	ohm.cm	2.5×10^{16}	$>10^{13}$	—	—
Water absorption 24 h	%	—	0.01	—	—
Saturation at 23°C	%	—	1.01	—	—

Tabel 2.6 Sifat-sifat PPS dan *Glass-fibre* PPS [24]

Property, units	PPS	40% glass-filled PPS
T_g , °C	85	—
Heat distortion temperature, method A, °C	135	265
Tensile strength		
21°C, MPa	64–77	150
204°C, MPa	33	33
Elongation at break, %	3	2
Flexural modulus, MPa	3,900	10,500
Limiting oxygen index, %	44	47

Tabel 2.7 Perbandingan sifat-sifat polimer termoplastik [24]

Material	Heat deflection temperature @1.82 MPa, °C	Tensile strength, MPa	Tensile modulus, GPa	Impact strength, J/m	Density, g/cm ³	Dielectric strength, MV/m	Dielectric constant @ 60 Hz
ABS	99	41	2.3	347	1.18	15.7	3.0
CA	68	37.6	1.26	210	1.30	16.7	5.5
CAB	69	34	0.88	346	1.19	12.8	4.8
PTFR		17.1	0.86	173	2.2	17.7	2.1
PCTFE		50.9	1.3	187	2.12	22.2	2.6
PVDF	90	49.2	2.5	202	1.77	10.2	10.0
PB	102	25.9	0.18	NB*	0.91		2.25
LDPE	43	11.6	0.17	NB	0.92	18.9	2.3
HDPE	74	38.2		373	0.95	18.9	2.3
PMP		23.6	1.10	128	0.83	27.6	
PI		42.7	3.7	320	1.43	12.2	4.1
PP	102	35.8	1.6	43	0.90	25.6	2.2
PUR	68	59.4	1.24	346	1.18	18.1	6.5
PS	98	45.1	3.1	59	1.05	19.7	2.5
PVC-rigid	68	44.4	2.75	181	1.4	34.0	3.4
PVC-flexible		9.6		293	1.4	25.6	5.5
POM	136	69	3.2	133	1.42	19.7	3.7
PMMA	92	72.4	3	21	1.19	19.7	3.7
Polyarylate	155	68	2.1	288	1.19	15.2	3.1
ICP	311	110	11	701	1.70	20.1	4.6
Nylon 6	65	81.4	2.76	59	1.13	16.5	3.8
Nylon 6/6	90	82.7	2.83	53	1.14	23.6	4.0
PBT	54	52	2.3	53	1.31	15.7	3.3
PC	129	69	2.3	694	1.20	15	3.2
PEEK	160	93.8	3.5	59	1.32		
PEI	210	105	3	53	1.27	28	3.2
PES	203	84.1	2.6	75	1.37	16.1	3.5
PET	224	159	8.96	101	1.56	21.3	3.6
PPO							
(modified)	100	54	2.5	267	1.09	15.7	3.9
PPS	280	138	11.7	69	1.67	17.7	3.1
PSU	174	73.8	2.5	64	1.24	16.7	3.5

*No break.

2.5 Bahan Pengisi Konduktif

Konduktivitas dipengaruhi oleh bahan pengisi komposit, 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 [25].

Penguat pada material komposit sering menggunakan karbon, selain itu untuk meningkatkan konduktivitas, juga untuk memperbaiki sifat mekanik komposit. Secara signifikan serat karbon atau grafit mampu meningkatkan kekuatan dan kekakuan plastik [11]. Pada penelitian ini, material yang dipilih sebagai bahan pengisi adalah karbon dalam tiga bentuk berbeda, yaitu karbon hitam, serat karbon, dan grafit sintetik.

2.5.1 Karbon Hitam

Carbon black atau Karbon hitam merupakan padatan karbon amorf yang dibentuk dengan proses deposisi dari partikel padat dalam fasa gas. Karbon hitam memiliki ukuran partikel yang sangat halus. 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* (UV), campuran pada plastik konduktif, campuran pada karet, peningkat aliran elektron, penghilang listrik statik dalam partikel non-konduktif, dan sebagai bahan penguat polimer [26].

2.5.2 Grafit Sintetik

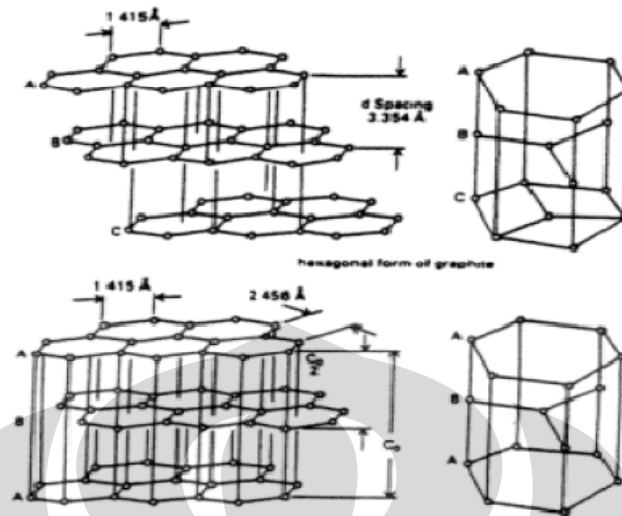
Terdapat dua jenis grafit, yaitu alami dan sintetik. Grafit sintetik lebih murni dibandingkan grafit alami. Grafit sintetik merupakan produk yang dibuat dari material karbon amorf melalui proses perlakuan temperatur tinggi. Grafit digunakan sebagai bahan pengisi khususnya dalam matriks polimer karena 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 [27].

Grafit sintetis untuk 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 μm (bubuk) sampai 2 cm (potongan-potongan) dengan kandungan 99% karbon [28]. Tabel 2.8 di bawah ini menunjukkan sifat-sifat umum grafit.

Tabel 2.8 Sifat-sifat umum grafit [26].

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



Gambar 2.11 Ikatan Antar Atom Grafit ^[29].

2.5.3 Serat Karbon

Pembuatan serat karbon merupakan hasil sintesis dari rayon, poliakrilonitril (PAN), dan *pitch* dengan menghilangkan hidrogen dan nitrogen dalam kondisi atmosfer inert. Perbandingan sifat ketiga jenis serat karbon tersebut disajikan dalam Tabel 2.9. 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 2.9 Sifat serat karbon berdasarkan bahan dasarnya [12].

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 (μm)	-	6,5	7,5

Jenis serat karbon berdasarkan bahan baku dan kondisi pemrosesan terbagi menjadi empat jenis kualitas serat karbon yang dibedakan berdasarkan kekuatannya, seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.10. Biasanya permukaan serat dioksidasi 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 [24].

Tabel 2.10 Jenis-jenis serat karbon [24].

Sifat-Sifat	Low “M” HT Pitch	Intermedia te “M” PAN	High “M” Pitch, PAN	Ultra High “M” Pitch, PAN
Kerapatan (g/cm ³)	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	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$0,9 \times 10^{-3}$	-

(Keterangan: “M” = Modulus)

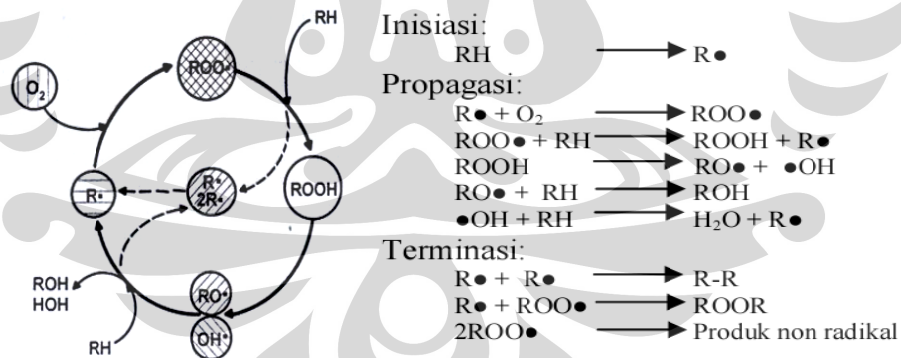
2.6 Anti-Oksidan

Anti-oksidan merupakan molekul untuk memperlambat atau mencegah terjadinya oksidasi pada molekul lain. Oksidasi adalah reaksi kimia dimana terjadi transfer elektron dari suatu substansi ke sebuah oksidator. Reaksi oksidasi dapat menghasilkan radikal bebas yang mampu merusak sel. Anti-oksidan mampu

mencegah reaksi oksidasi dengan menghilangkan radikal bebas dan menahan oksidasi lain dengan mengorbankan dirinya sendiri.

Anti-oksidan banyak digunakan sebagai penstabil bahan bakar dan pelumas untuk mencegah terjadinya oksidasi. Anti-oksidan banyak digunakan untuk mencegah degradasi oksidatif pada polimer yang akan mengurangi nilai kekuatannya dan fleksibilitasnya. Pada polimer dengan ikatan rangkap, reaksi oksidasi mudah terjadi. Produk polimer padat akan mengalami keretakan pada permukaan teroksidasi saat material mulai terdegradasi dan rantai polimer putus. Oksidasi juga sering dikaitkan dengan degradasi akibat sinar *ultra violet* (UV) karena radiasi *ultra violet* menciptakan radikal bebas dengan memutuskan ikatan karbon. Radikal bebas tersebut bereaksi dengan oksigen dan menciptakan reaksi berantai. Pada polipropilena, reaksi oksidasi menjadi lebih sensitif pada daerah rantai sekunder. Pada bagian tersebut, radikal bebas yang terbentuk lebih stabil apabila dibandingkan dengan radikal bebas yang terbentuk dari rantai primer.

Pada material komposit polimer dibutuhkan sebuah anti-oksidan agar menghindari degradasi material komposit terhadap lingkungan aplikasinya. Pelat bipolar akan terekspos ke lingkungan *fuel*, oksigen, dan juga air yang dapat bersifat oksidatif.

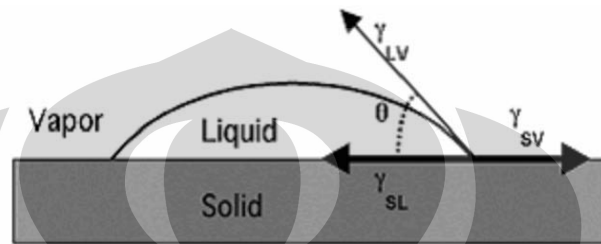


Gambar 2.12 Siklus auto-oksidasi [26].

(Keterangan: RH = rantai polimer, * = radikal, -OH = hidroksida, -OO- = peroksida, -OOH = hidro peroksida, -OR = alkoksi)

2.7 Kemampubasahan (*wettability*)

Merupakan kemampuan cairan membasahi suatu permukaan padat dengan sempurna. *Wetting* terjadi jika ada kesetimbangan antara tiga tegangan permukaan, sehingga cairan dapat menyebar dan membasahi permukaan padatan [30], seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Tiga tegangan permukaan dalam kondisi *wetting* tetes cairan pada permukaan padat. Skema sudut kontak θ dan energi permukaan γ_{SL} , γ_{SV} , γ_{LV} [31, 32].

Kesetimbangan energi dapat dirumuskan dengan persamaan Young sebagai berikut [33, 34]:

$$\gamma_{SL} - \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \cos \theta = 0 \quad (2.5)$$

Keterangan: γ_{SL} = tegangan permukaan padatan dan cairan

γ_{SV} = tegangan permukaan padatan dan uap

γ_{LV} = tegangan permukaan cairan dan uap

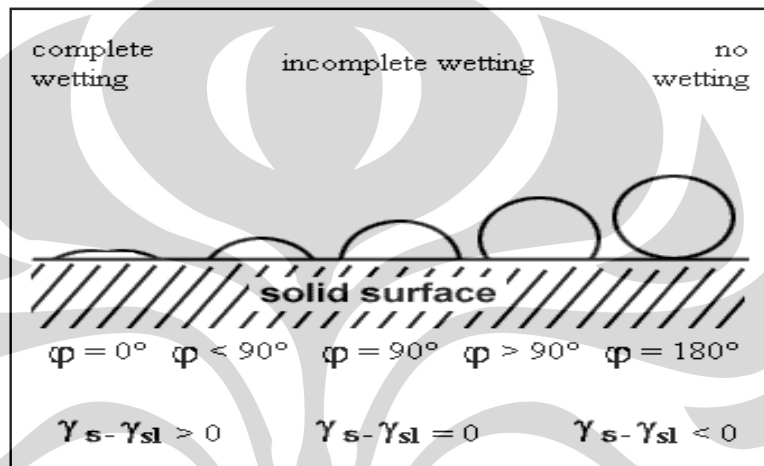
θ = sudut kontak antara cairan dan permukaan padat

Besar sudut θ berada pada rentang $0 - 180^\circ$. Sudut θ merupakan indikator daya pembasahan. Apabila sudut θ kurang dari 90° ($\theta < 90^\circ$), maka dapat dikatakan terjadi pembasahan sempurna. Sebaliknya apabila sudut θ lebih dari 90° ($\theta > 90^\circ$), maka tidak terjadi pembasahan sempurna. Daya pembasahan berdasarkan besar sudut kontak secara skematis diilustrasikan pada Gambar 2.14.

Digunakan parameter lain untuk mengukur daya pembasahan adalah koefisien penyebaran (*spreading coefficient / SC*). Pembasahan terjadi apabila SC bernilai positif. SC dirumuskan dengan persamaan:

$$SC = \gamma_{SV} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LV}) \quad (2.6)$$

Sudut kontak $\theta < 90^\circ$ merepresentasikan pembasahan yang sempurna ($\gamma_{SV} > \gamma_{SL}$) dan merupakan pendorong terjadinya penyebaran atau pemerataan tegangan permukaan. Dengan $\theta < 90^\circ$, energi antar permukaan (*interfacial energy*) akan tinggi, sedangkan tegangan permukaannya akan cenderung kecil sehingga gaya adhesi akan lebih besar daripada gaya kohesinya [30, 31].



Gambar 2.14 Daya pembasahan berdasarkan besar sudut kontak (ϕ) [35].

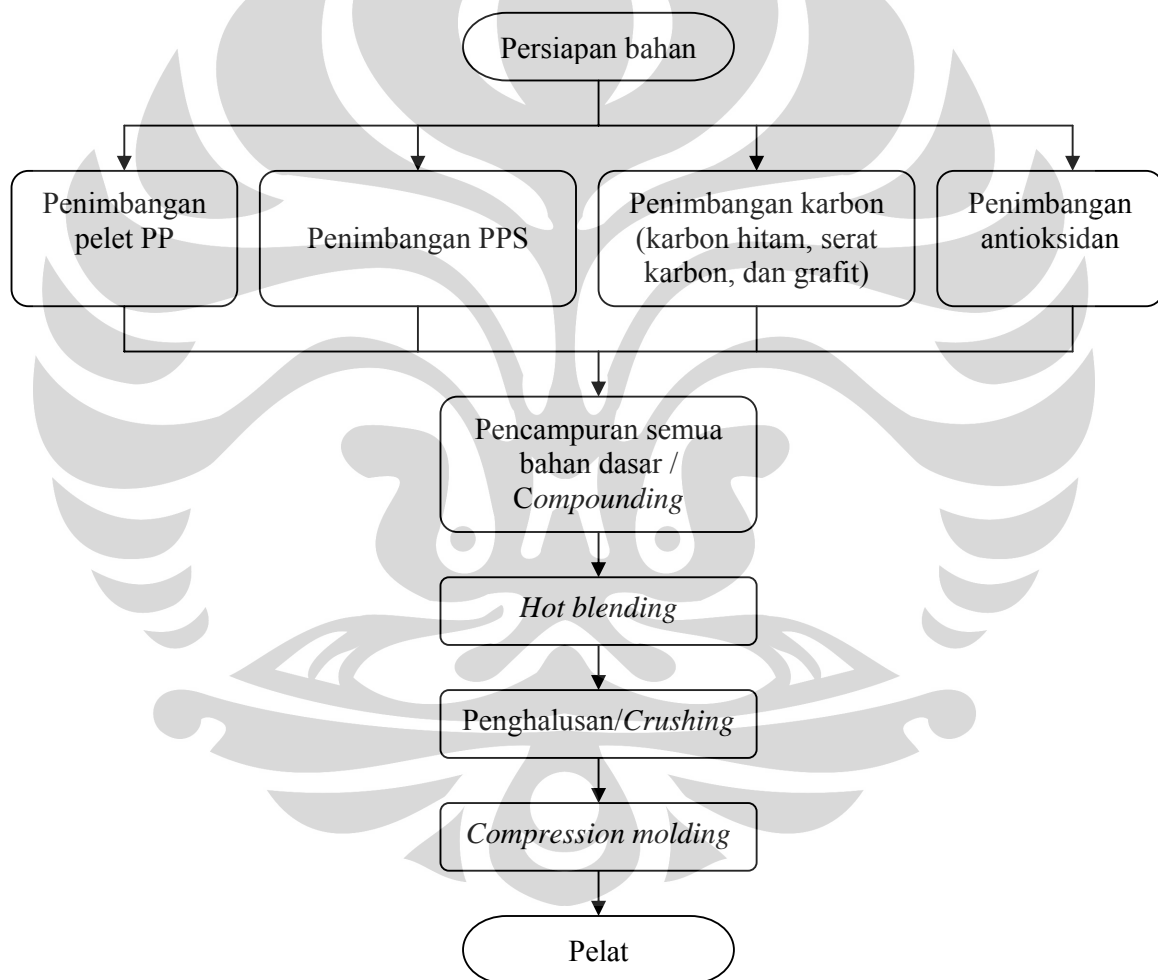
Wettability mempengaruhi hasil material komposit dengan keterpaduan yang baik. Keterpaduan suatu komposit dikatakan baik apabila di seluruh bagian pengisi dibasahi oleh matriks dengan sempurna. Energi permukaan yang relatif sama antara matriks dan pengisi akan menghasilkan tegangan permukaan yang relatif kecil sehingga terjadi pembasahan yang sempurna. Energi permukaan tidak hanya dipengaruhi oleh daya pembasahan. Faktor lain yang turut mempengaruhi besarnya energi permukaan adalah struktur kimia, komposisi kimia, kepolaran, dan adhesivitas.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

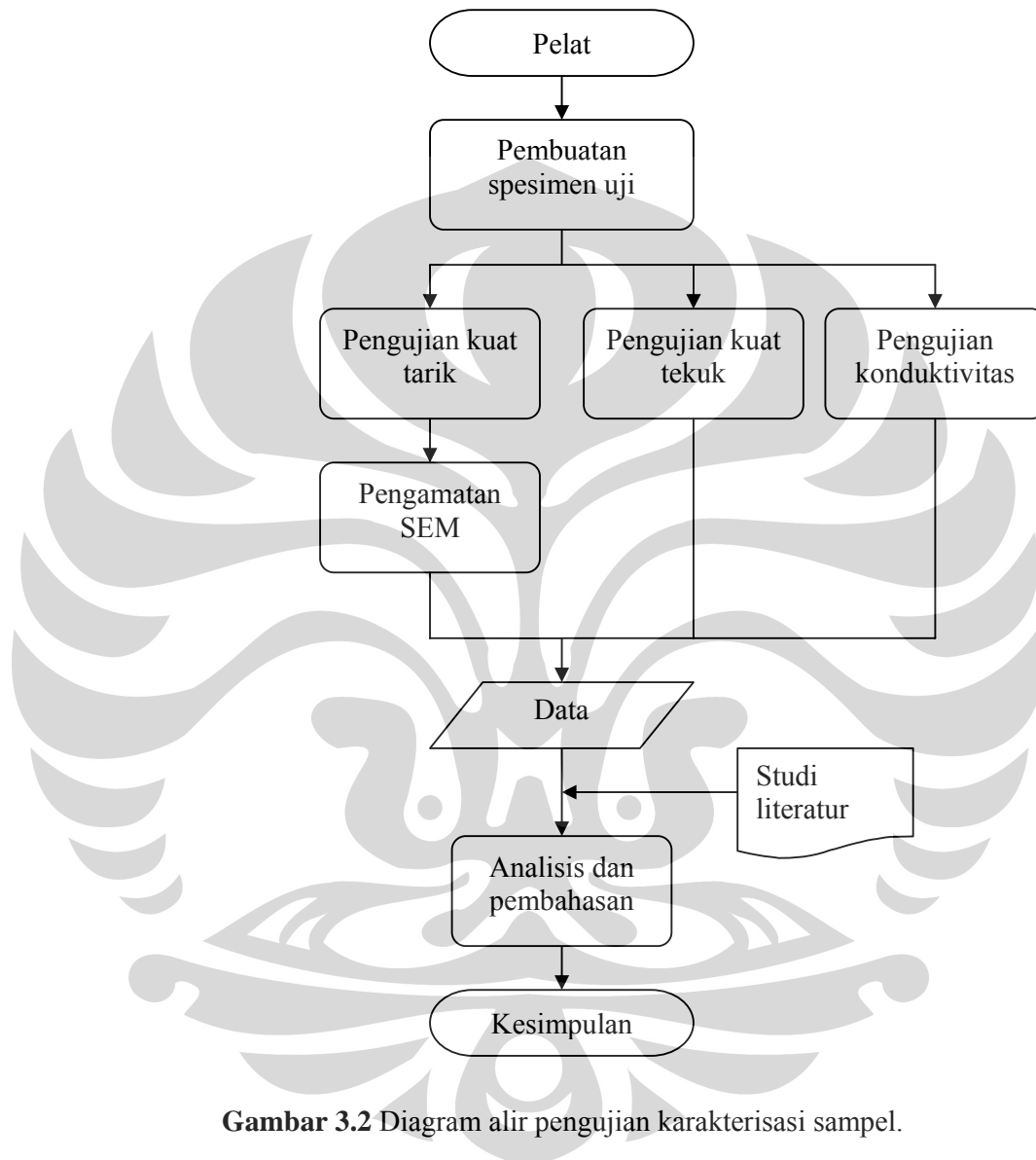
3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir berikut menggambarkan secara umum kegiatan preparasi sampel yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan PPS dan penguat karbon ke dalam komposit pelat bipolar berbasis polipropilena (PP).



Gambar 3.1 Diagram alir preparasi dan fabrikasi sampel.

Tahapan Pengujian karakterisasi sampel dapat digambarkan seperti diagram alir berikut ini:



Gambar 3.2 Diagram alir pengujian karakterisasi sampel.

3.2 Komposisi Bahan

Komposisi dan pengkodean seluruh sampel yang diteliti, seperti terdapat pada Tabel 3.1 berikut ini:

Tabel 3.1 Komposisi dan pengkodean formulasi sampel.

Bahan	Satuan	Kode Formulasi Sampel				
		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
PPS	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
Total	g	500	500	500	500	500

Fraksi massa karbon (karbon hitam, serat karbon, grafit) ditampilkan dalam Tabel 3.2 berikut ini:

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
Total	g	0	220	220	400	400

3.3 Peralatan dan Bahan

3.3.1 Peralatan

Dalam penelitian ini kami membutuhkan alat-alat seperti ditampilkan dalam Tabel 3.3 sebagai berikut:




Tabel 3.3 Peralatan dan spesifikasinya.

Nama Alat	Spesifikasi	Gambar
Timbangan Digital	<i>Mettler PM600</i> di Laboratorium P&L Pertamina Pulo Gadung	
<i>Hot Blender</i>	<i>Rheomix Haake + Rheocord 90</i> kapasitas 250 g di Laboratorium P&L Pertamina Pulo Gadung	
<i>Crusher</i>	<i>Kpi type KF-808-B</i> di Sentra Teknologi Polimer (STP) PUSPIPTEK Serpong	
Timbangan Digital	<i>Sartorius</i> di Sentra Teknologi Polimer (STP) PUSPIPTEK Serpong	

Tabel 3.3 Peralatan dan spesifikasinya (*lanjutan*).

Nama Alat	Spesifikasi	Foto
<i>Hydraulic Hot Press</i>	<i>COLLIN P300P</i> di Sentra Teknologi Polimer (STP) PUSPIPTEK Serpong	
<i>Mini Test Press.10 dan Specimens Puncher</i>	<i>TOYOSEIKI</i> di Sentra Teknologi Polimer (STP) PUSPIPTEK Serpong	
Mesin Pemotong	<i>GÖLZ BS 350</i> di Sentra Teknologi Polimer (STP) PUSPIPTEK Serpong	
Mesin Abrasif	<i>Rema 2000 type DS04/175</i> di Sentra Teknologi Polimer (STP) PUSPIPTEK Serpong	
Lemari Conditioning	- di Sentra Teknologi Polimer (STP) PUSPIPTEK Serpong	

Tabel 3.3 Peralatan dan spesifikasinya (*lanjutan*).

Nama Alat	Spesifikasi	Gambar
<i>Universal Testing Machine</i>	<i>SHIMADZU type AGS-10kNG</i> di Sentra Teknologi Polimer (STP) PUSPIPTEK Serpong	
<i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	<i>LEO 420i</i> di Departemen Metalurgi dan Material FTUI	
<i>Conductivity measurement apparatus</i>	<i>LCR-meter type 3522-50</i> di Laboratorium Listrik Magnet BATAN PUSPIPTEK Serpong	

3.3.2 Bahan-Bahan

3.3.2.1 Polipropilena (PP)

Komposit Polimer yang digunakan dalam penelitian ini adalah *polipropilena* termoplastik yang berperan sebagai matriks adalah kopolimer blok polipropilena COSMOPLENE[®]. PP jenis ini merupakan produksi *The Polyolefine Company* (TPC) *Singapore*. Dalam Tabel 3.4 berikut ini adalah spesifikasi dari PP yang digunakan dalam penelitian.

Tabel 3.4 Spesifikasi kopolimer blok polipropilena COSMOPLENE® [36].

Kode	AH561		
Nama Produk	Kopolimer Blok Polipropilena COSMOPLENE®		
Aplikasi	Komoditas, Baterai, Wadah, Kursi, Tempat Duduk		
Karakteristik	Sifat Alir Sedang-Tinggi, Tahan Impak, Kaku		
	Sifat-Sifat	Satuan	Metode Uji
Laju Aliran Leleh (MFR)	3	g/10 min	ASTM D1238
Kerapatan Massa	0.9	g/cm ³	ASTM D1505
Kekuatan Impak Izod	23°C: 24,5; -20 °C: 4,7	KJ/m ²	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

Untuk meningkatkan sifat konduktivitas listrik dari komposit menggunakan bahan pengisi karbon. Jenis-jenis karbon yang digunakan dalam penelitian ini adalah karbon hitam, serat karbon, dan grafit sintetik. Sifat-sifat dari ketiga jenis karbon tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.5 Spesifikasi karbon [1].

Jenis Karbon	Nama	Ukuran Partikel	Penyuplai
Karbon Hitam	<i>Vulcan XC72</i>	<i>60 x 325 mesh</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>30 nm</i>	<i>Asbury Carbon</i>

Dalam penelitian ini karbon hitam yang digunakan adalah *Cabot Vulcan XC72* yang diproduksi oleh *Cabot Corporation*. Karbon hitam *Cabot Vulcan XC72* memiliki karakteristik berhubungan dengan kemampuan proses dan konduktivitas meliputi luas permukaan spesifik, kimia permukaan, dan sifat pembasahan (*wetting*). Tabel 3.6 berikut menunjukkan sifat fisik dan kimia dari *Cabot Vulcan XC72* :

Tabel 3.6 Sifat-sifat karbon hitam *Cabot Vulcan XC-72* [1].

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

Penelitian ini menggunakan serat karbon yang disuplai dari *Fortail Carbons*. Serat karbon dalam material komposit konduktif sebagai jalur aliran elektron. Sifat-sifat umum dari serat karbon *Fortail 243* dapat dilihat pada Tabel 3.7 di bawah ini.

Tabel 3.7 Sifat-sifat serat karbon *Fortail 243* [1].

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

3.3.2.3 Polyphenylene Sulphides (PPS)

Pada penelitian ini PPS digunakan sebagai bahan aditif dalam komposit konduktif polipropilena-karbon dengan tujuan untuk meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi, kondisi asam-basa komposit.

Tabel 3.8 sifat-sifat PPS dan *Glass-fibre PPS* [24]

Property, units	PPS
T_g , °C	85
Heat distortion temperature, method A, °C	135
Tensile strength	
21°C, MPa	64–77
204°C, MPa	33
Elongation at break, %	3
Flexural modulus, MPa	3,900
Limiting oxygen index, %	44

3.3.2.4 Antioksidan

Antioksidan menggunakan produk dari China Catalyst Ltd dengan nama merek dagang CN-CAT B215 yang merupakan hasil penggabungan antioksidan utama A1010 dan antioksidan pembantu A168 dan *chelant* stabil. Tabel 3.9 dibawah ini menunjukkan sifat-sifat antioksidan CN-CAT B215.

Tabel 3.9 Sifat-sifat CN-CAT B215 [37].

Sifat-Sifat	Keterangan
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

Untuk mendapatkan takaran sesuai formulasi pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 dilakukan penimbangan dengan timbangan digital *Mettler PM600*. Penimbangan dilakukan untuk pelet polipropilena, PPS, tiga jenis karbon (karbon hitam, serat karbon, grafit sintetik), dan antioksidan. Hasil penimbangan kemudian dibungkus dalam kantong plastik.

3.4.1.2 Mixing

Mixing atau proses pencampuran bahan-bahan menggunakan metode *hot blending* (pencampuran secara mekanik melalui proses pemanasan) menggunakan *Rheomix Haake Rheocord 90* berkapasitas 250 gram. Formula F1 (PP 100%wt) tidak dicampur tetapi langsung dicetak menjadi pelat. Formula yang dicampur adalah F2, F3, F4, dan F5. Alat *mixing* Rheocord 90 yang dipakai berkapasitas maksimal 250 gram, maka bahan-bahan formulasi tidak bisa dimasukkan sekaligus, sehingga masing-masing dibagi menjadi dua bagian untuk dua kali proses pada setiap formula. Pencampuran dilakukan pada suhu 180°C selama ± 6 menit. Setelah campuran berbentuk bongkahan didiamkan hingga dingin.

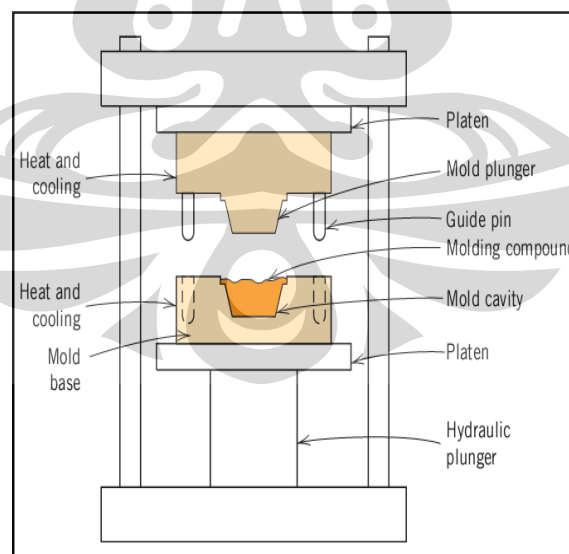
3.4.1.3 Penghalusan (*Crushing*)

Crushing merupakan proses memperkecil ukuran partikel hingga ukuran sesuai yang diharapkan. Bongkahan hasil mixing dihaluskan dahulu sebelum dicetak (*compression molding*).

Alat yang digunakan dalam proses penghalusan bahan komposit adalah mesin *Crusher Kpi type KF-808-B* buatan china. Proses *crushing* juga bertujuan untuk menjadikan campuran komposit lebih homogen. Hasil proses *crushing* berbentuk granula.

3.4.1.4 Pencetakan Pelat (*Compression Molding*)

Pada pengujian karakterisasi, sampel dicetak dengan metode *hot pressing*. Alat yang digunakan adalah *COLLIN P300P Hydraulic Hot Press*. Proses pencetakan dilakukan dengan memasukkan granula hasil *crushing* ke dalam cetakan logam (*mold*). Pemanasan dilakukan selama 14 menit pada temperatur 230 °C dan tekanan diatur sebesar 1 bar untuk formula F1, F2, dan F3. Sedangkan untuk F4 dan F5 dipanaskan selama 14 menit pada temperatur 240 °C dan tekanan 200 bar. Kemudian didinginkan selama 12 menit pada temperatur 40 °C. Diagram skematik alat *compression molding* digambar 3.3 berikut ini



Gambar 3.3 Diagram skematik alat *compression molding* [17].

Tahapan-tahapan pencetakan pelat tersebut ditampilkan dalam Tabel 3.10 dan Tabel 3.11.

Tabel 3.10 Fase pencetakan untuk sampel F1, F2, dan F3.

Fase	1	2	3	4	5
Temperatur (°C)	230	230	230	230	40
Tekanan (bar)	1	1	1	1	1
Waktu (menit)	4	5	5	0	12

(Keterangan: 1 – 4 = pemanasan, 5 = pendinginan, 1 bar = 10^5 N/m²)

Tabel 3.11 Fase pencetakan untuk sampel F4 dan F5.

Fase	1	2	3	4	5
Temperatur (°C)	240	240	240	240	40
Tekanan (bar)	200	200	200	200	200
Waktu (menit)	4	5	5	0	12

(Keterangan: 1 – 4 = pemanasan, 5 = pendinginan, 1 bar = 10^5 N/m²)

Kemudian setiap formula dicetak dengan dua tipe pelat lingkaran yang berbeda diameter dan ketebalan. Pelat tipe I berdiameter 20 cm dengan ketebalan ± 2 mm. Dan pelat tipe II berdiameter 14 cm dengan ketebalan ± 4 mm.

3.4.1.5 Pembuatan Spesimen Uji

Hasil *hot pressing* yang berupa lembaran berbentuk lingkaran kemudian dibuat menjadi spesimen uji tarik, uji tekuk, dan uji konduktivitas. Spesimen uji tarik dicetak dari pelat tipe I menggunakan alat potong berupa *puncher* berbentuk seperti *dog-bone* tipe IV sesuai standar ASTM D638. Hal yang sama dilakukan untuk pelat tipe II dipotong-potong menjadi spesimen uji tekuk sesuai standar ASTM D790.

Kemudian seluruh spesimen baik untuk uji tarik dan uji tekuk disimpan pada lemari pengkondisian pada temperatur 23 ± 2 °C dan kelembaban relatif $50 \pm 5\%$ selama ≥ 40 jam, setelah melalui fase pengkondisian barulah dilakukan

pengujian tarik dan tekuk. Hal ini dilakukan agar molekul polipropilena mengalami relaksasi tegangan.

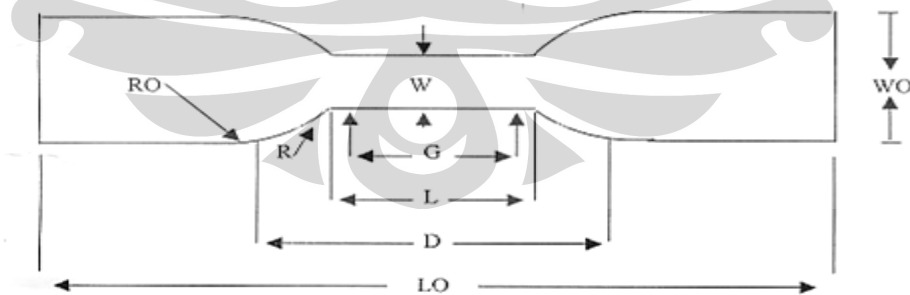
3.4.2 Pengujian Karakterisasi Material

3.4.2.1 Pengujian Tarik (Tensile)

Setelah seluruh sample siap kemudian dilakukan pengujian tarik sesuai metode pengujian tarik standar ASTM D638: “*Standard Test Methode for Tensile Properties of Plastics*” [38]. Uji tarik menggunakan spesimen berbentuk *dog-bone* tipe IV. Dimensi dan bentuk skematis spesimen uji tarik ditampilkan dalam Tabel 3.11 dan Gambar 3.4 di bawah ini :

Tabel 3.12 Dimensi spesimen uji tarik tipe IV.

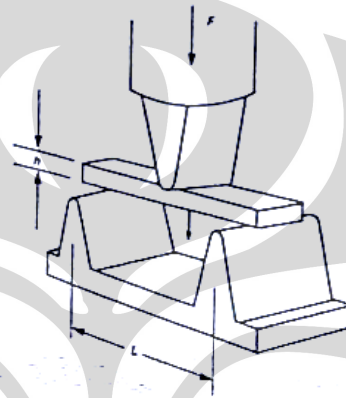
Dimensi	Tipe IV, mm (in)	Toleransi, mm (in)
W (<i>width of narrow section</i>)	6 / 0,25	$\pm 0,5$ ($\pm 0,02$)
L (<i>length of narrow section</i>)	33 / 1,30	$\pm 0,5$ ($\pm 0,02$)
WO (<i>width over all, min</i>)	19 / 0,75	+ 6,4 (+ 0,25)
LO (<i>length over all, min</i>)	115 / 4,50	<i>no max</i>
G (<i>gage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



Gambar 3.4 Skema bentuk spesimen uji tarik.

3.4.2.2 Pengujian kelenturan (*Flexural*)

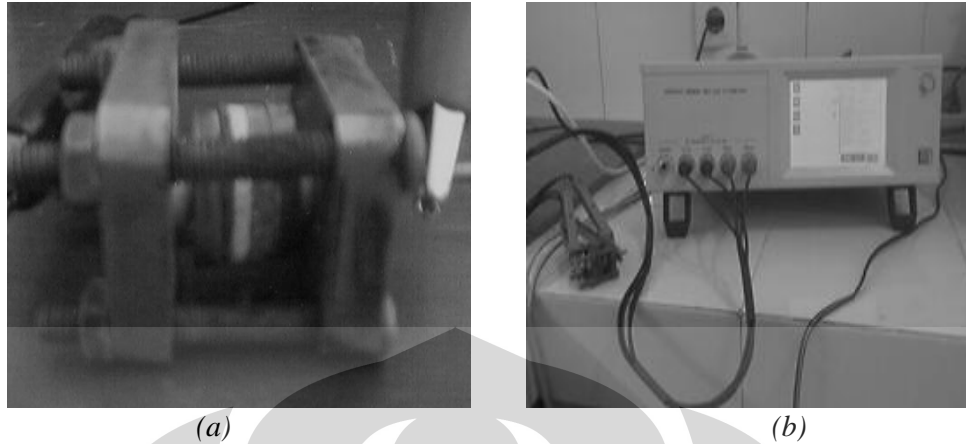
Pengujian kelentural atau flexural test merupakan pengujian untuk mengetahui kekuatan material apabila diberi beban bending. Pengujian tekuk berdasarkan pada standar ASTM D790: “*Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*” [38]. Gambar 3.5 menggambarkan skema pembebanan pada 3-titik (Gambar 3.5).



Gambar 3.5 Skema pengujian tekuk 3-titik [24].

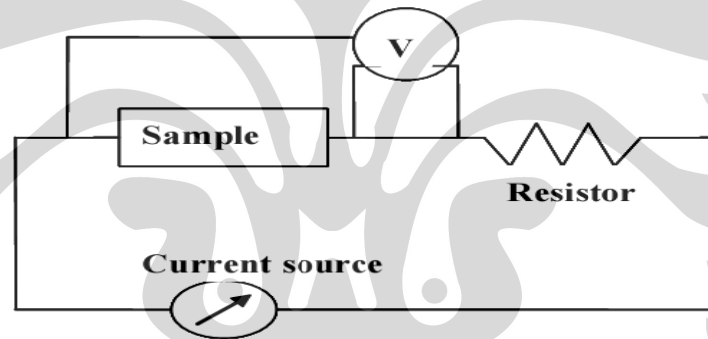
3.4.2.3 Pengujian Konduktivitas Listrik

Seluruh sampel dilakukan uji konduktivitas listrik. Pengujian komposit pelat bipolar ini menggunakan standar ASTM B193 untuk menghitung konduktivitas dalam bidang (*in-plane*) sampel. Alat yang digunakan adalah LCR-meter tipe 3522-50. Alat ini dapat digunakan untuk mengukur sifat listrik material yang meliputi induktansi, kapasitansi, dan konduktansi terhadap fungsi frekuensi. Frekuensi yang dapat dilakukan pada bahan antara 0,01 Hz sampai 100 kHz. Gambar 3.6 di bawah ini adalah foto alat LCR-meter.



Gambar 3.6 (a) Tempat penyimpanan sampel, (b) alat LCR-meter.

Skema sirkuit listrik untuk menghitung konduktivitas dalam bidang (*in-plane*) sampel dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.7 Diagram sirkuit pengukuran konduktivitas listrik [1].

3.4.2.4 Pengamatan Scanning Electron Microscopy (SEM)

Seluruh permukaan patahan spesimen dilakukan SEM untuk mengamati morfologi pada permukaan sampel dilakukan dengan menggunakan SEM. Sebelum melakukan pengamatan, terlebih dahulu melakukan preparasi sampel yaitu pemotongan spesimen menjadi ukuran sekitar 1 x 1 cm pada bagian perpatahan *tensile test*. Pengamatan SEM dilakukan untuk spesimen F2, F3, F4 dan F5. Spesimen F1 tidak dilakukan pengamatan karena hanya sebagai referensi PP murni saja, kita bisa mendapatkan referensi hasil SEM polipropilena murni dari berbagai referensi baik buku maupun internet. Kemudian sampel terlebih dahulu dilapisi dengan emas (Au) agar bersifat konduktif sehingga dapat

menghantarkan elektron. Detektor yang digunakan pada SEM adalah detektor *Secondary Electron*.

Tujuan pengamatan morfologi patahan adalah untuk mengetahui dispersi bahan pengisi pada matriks, daya pembasahan matriks terhadap serat karbon, dan morfologi perpatahan sampel. Bagian sampel yang diamati adalah pada permukaan perpatahan uji tarik. Karena pada daerah patahan kita akan bisa melihat lebih jauh ke dalam inti dari sampel dan cacat-cacat apa saja yang terjadi



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Preparasi Sampel

4.1.1 Hasil Pencampuran (*Compounding*)

Sampel hasil pencampuran pada alat *hot blending /mixer* Rooke 90 berupa bongkahan padat seperti ditunjukkan Gambar 4.1, bongkahan ini biasa disebut *master batch*. Hasil proses *hot blending*, dengan kandungan PP 50 wt% pada F2 dan F3 terasa lebih lengket dan ulet sehingga agak sulit untuk mengeluarkan hasil *hot blending* dari wadah dan *screw*. Lelehan komposit menempel pada ulir (*screw*) mesin Rheocord 90 sehingga sulit diambil hasilnya.

Pada formulasi F4 dan F5 dengan kandungan PP 14 wt% terasa lebih kasar dan getas, proses pengambilannya pun mudah karena tidak menempel di *screw*. Secara visual dapat diamati pada F2 dan F3 terjadi proses pembasahan (*wetting*) yang lebih sempurna dibandingkan pada F4 dan F5.



Gambar 4.1 *Master batch* formula 2 dan 3 hasil *hot blending*.



Gambar 4.2 *Master batch* formula 4 dan 5 hasil *hot blending*.

4.1.2 Hasil Penghalusan (*Crushing*)

Master batch gumpalan hasil proses pencampuran kemudian dicrushing untuk menghasilkan bentuk yang lebih kecil berupa pellet. Seluruh sampel komposit (F2, F3, F4, F5) hasil *crushing* berbentuk granula dengan berbagai variasi ukuran (Gambar 4.3).

Pada keempat formula (F2, F3, F4, F5) tidak ditemukan adanya perbedaan yang signifikan dalam bentuk maupun warna pellet. Namun, jumlah serbuk pada formula keempat dan kelima tampak lebih banyak apabila dibandingkan dengan formula kedua dan ketiga. Granula formula F4 dan F5 lebih halus karena sifatnya lebih getas dari F2 dan F3. Adanya serbuk tersebut dikarenakan jumlah PP yang sedikit pada formula ketiga dan keempat sehingga tidak dapat mengikat seluruh penguat.



Gambar 4.3 *Master batch* hasil *crushing* berbentuk granula.

4.1.3 Hasil Pencetakan (*Compression Molding*)

Setelah mendapatkan sampel berbentuk pellet, kemudian seluruh formula komposit dicetak menggunakan alat *hot press*. Kami membuat menjadi dua buah tipe pelat lingkaran. Pelat tipe I berdiameter 20 cm dengan ketebalan ± 2 mm, sedangkan pelat tipe II berdiameter 14 cm dengan ketebalan ± 4 mm. Hasil pencetakan *hot press* kedua tipe pelat tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 dibawah ini.



Gambar 4.4 Pelat tipe I.



Gambar 4.5 Pelat tipe II.

Pada proses *hot press* ini sering terjadi kegagalan berupa retak dan pecah saat proses pelepasan cetakan. Beberapa kali pelat kami mengalami keretakan, namun akhirnya kami mendapatkan pelat dari formula F1, F2, F3, F4 dan F5 berhasil dicetak dengan sempurna. Namun pada F2, kami terpaksa melakukan

crushing kembali pada hasil hot press yang gagal karena keterbatasan sampel yang tersisa.

Penyebab retaknya pelat adalah tidak dipakainya pelumas (*wax*) yang baik untuk melumasi cetakan (*mold*). Penyebab yang kedua, proses pembukaan *mold* oleh operator kurang hati-hati, terkadang hasil cetakan menempel pada *mold* sehingga sulit diambil dan akibatnya pelat menjadi pecah berkeping-keping. Penyebab ketiga, besi cetaknya sudah terkontaminasi oleh banyak sample sehingga daya cetaknya menjadi kurang baik.



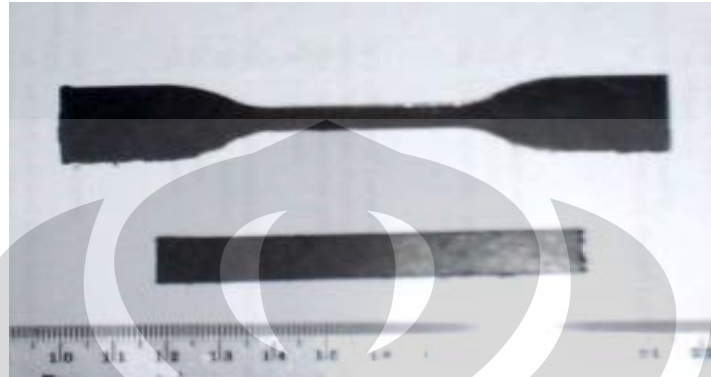
Gambar 4.6 Pelat tipe I mengalami retak akibat lengket dengan cetakan.

Permukaan pelat komposit dengan kandungan PP 50 *wt%* terasa lebih halus, sedangkan permukaan pelat komposit dengan kandungan PP 14 *wt%* terasa lebih kasar. Perbedaan tekstur permukaan tersebut karena adanya perbedaan daya pembasahan (*wettability*) pada masing-masing formula.

4.1.4 Hasil Pembuatan Spesimen Uji

Setelah berhasil melakukan *hot press*, sampel yang kami dapat kami potong-potong sesuai bentuk standar pengujian *tensile* dan *flexural*. Bentuk spesimen untuk uji tekuk berbentuk balok sesuai standar ASTM D 790 dengan

dimensi 80 mm x 12 mm x 4 mm. Sedangkan hasil pemotongan spesimen uji tarik berbentuk *dog-bone* tipe IV sesuai standar ASTM D 638. Bentuk dari kedua spesimen dapat dilihat pada Gambar 4.7 dibawah ini.



Gambar 4.7 Spesimen uji tarik tipe IV dan spesimen uji tekuk.

4.2 Hasil Pengujian Karakterisasi

4.2.1 Hasil Pengujian Tarik (*Tensile*)

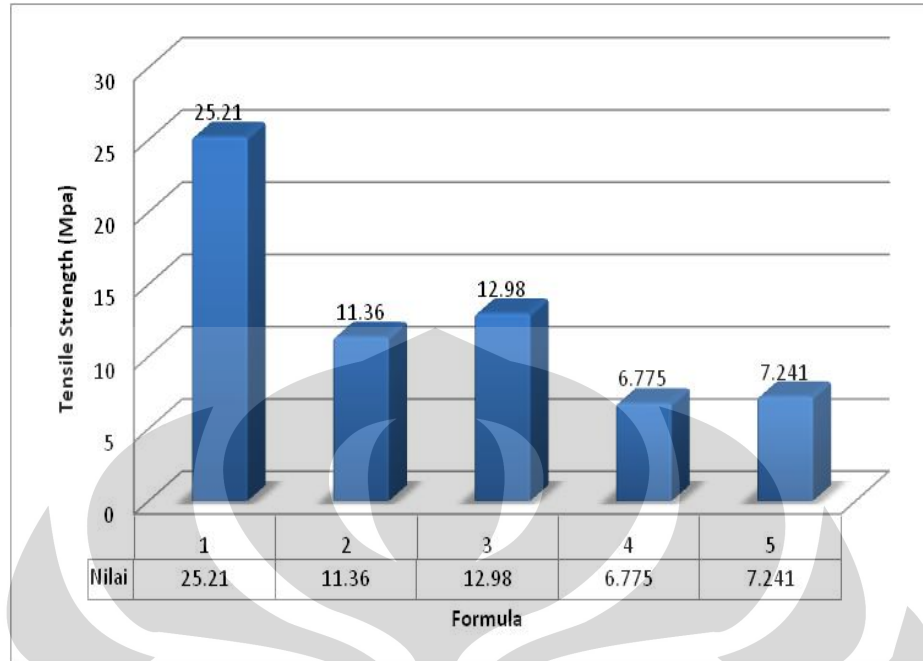
Aplikasi pelat Bipolar menuntut sifat mekanik yang baik dalam pengaplikasian pada PEM *fuel cell*. Pelat harus menjaga stabilitas mekanik agar dapat mencegah rangkaian *fuel cell* dari kebocoran dan pelat tidak merusak membran.

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian tarik terhadap formula-formula komposit yang dihasilkan untuk mengetahui kekuatan komposit tersebut terhadap beban tarik linear. Pengujian tarik ini dilakukan terhadap spesimen-spesimen yang dibuat dari *slab* hasil *hot press* setiap formula.

Data yang diperoleh dari pengujian mekanik adalah kurva tegangan-regangan. Dari kurva tegangan-regangan dapat dihitung nilai kekuatan tarik dan modulus tarik. Hasil pengujian tarik setiap komposit disajikan dalam Tabel 4.1 dan dan grafiknya dapat dilihat di Gambar 4.8.

Tabel 4.1 Nilai kekuatan tarik (*tensile strength*).

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
σ_T (MPa)	25,21	11.36	12.98	6.775	7.241



Gambar 4.8 Grafik perbandingan kekuatan tarik sampel.

Gambar 4.8 di atas menunjukkan grafik perbandingan kekuatan tarik seluruh formulasi sampel. Komposit F3 menunjukkan kekuatan dan keuletan yang lebih tinggi dibandingkan komposit lain, yaitu sebesar 12,98 MPa. Dibandingkan dengan F2, kekuatan F3 lebih besar nilainya. Dari hasil pengamatan patahan pada SEM, kekutan F3 lebih besar disebabkan pada sampel F2 terdapat rongga-rongga mikro yang lebih banyak dibandingkan pada sampel F3, rongga-rongga mikro menyebabkan rendahnya energi perpatahan. Penambahan grafit pada formula F3 sebanyak 20,45% (45 gram) dari total fraksi massa karbon juga berpengaruh pada peningkatan kekuatan tarik.

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa secara umum peningkatan konsentrasi pengisi 0 wt% (F1), 44 wt% (F2 dan F3), dan 80 wt% (F4 dan F5) cenderung menurunkan kekuatan tarik komposit. Kekuatan tarik komposit jauh lebih rendah dari kekuatan tarik PP (F1).

Pada sampel komposit juga terdapat banyak rongga-rongga mikro (*micro-voids*), sehingga komposit menjadi lebih rapuh. *Micro-voids* dalam sampel komposit dapat dilihat langsung secara visual dan dari hasil pengamatan SEM. Rongga-rongga mikro tersebut dapat menjadi titik konsentrasi tegangan (*stress*

concentration) ketika spesimen uji dikenakan pembebanan sehingga perpatahan mudah terjadi.

Kekuatan mekanik komposit sangat bergantung pada kemampuan matriks untuk mentransfer tegangan ke pengisi. Akan tetapi, karena tidak adanya ikatan antarmuka antara matriks PP dan serat karbon, maka serat karbon tidak dapat menyerap tegangan hasil pembebanan dari luar. Adhesi yang kurang baik menjadikan matriks PP tidak membasahi permukaan pengisi karbon dengan sempurna, sehingga memungkinkan terdapat celah-celah mikro pada antarmuka. Hal ini dapat dibuktikan pada gambar hasil pengamatan SEM.

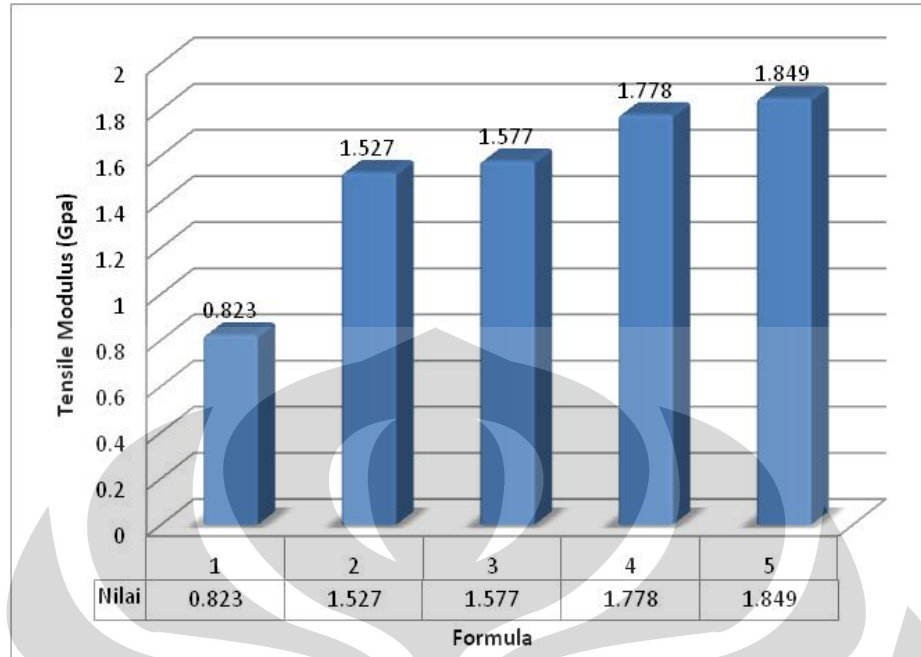
Rongga-rongga mikro muncul disebabkan karena beberapa faktor, diantaranya karena tingginya viskositas campuran sehingga kemampuan alirnya rendah dan ketika dicetak kepadatannya tidak merata, granula komposit hasil *crushing* menyerap moistur karena bersifat higroskopis. Moistur yang terperangkap ketika 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.

V. Di Liello *et al.* (1990) berdasarkan hasil penelitiannya mempercayai bahwa kecilnya nilai kekuatan tarik pada komposit PP diperkuat serat karbon lebih disebabkan karena perilaku getas dari komposit sebagaimana terlihat dari karakteristik morfologinya [39].

Nilai modulus tarik (*tensile modulus of elasticity*) ditampilkan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.9. Terlihat dari data modulus tarik bahwa penambahan karbon cenderung meningkatkan kekakuan, sehingga data tersebut seolah-olah menunjukkan penambahan karbon menyebabkan kegetasan pada komposit.

Tabel 4.2 Nilai modulus tarik.

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
E_T (GPa)	0,823	1.527	1.577	1.778	1.849



Gambar 4.9 Grafik perbandingan modulus tarik setiap formulasi sampel.

Perbandingan modulus tarik dapat dilihat pada Gambar 4.9 di atas, grafik tersebut menunjukkan perbandingan modulus tarik setiap sampel komposit (F2, F3, F4, dan F5) yang dibandingkan dengan modulus tarik PP murni (F1). Dengan penambahan konsentrasi pengisi, modulus tarik menunjukkan peningkatan. Modulus tarik tertinggi diperoleh pada formula F5 sebesar 1,849 GPa.

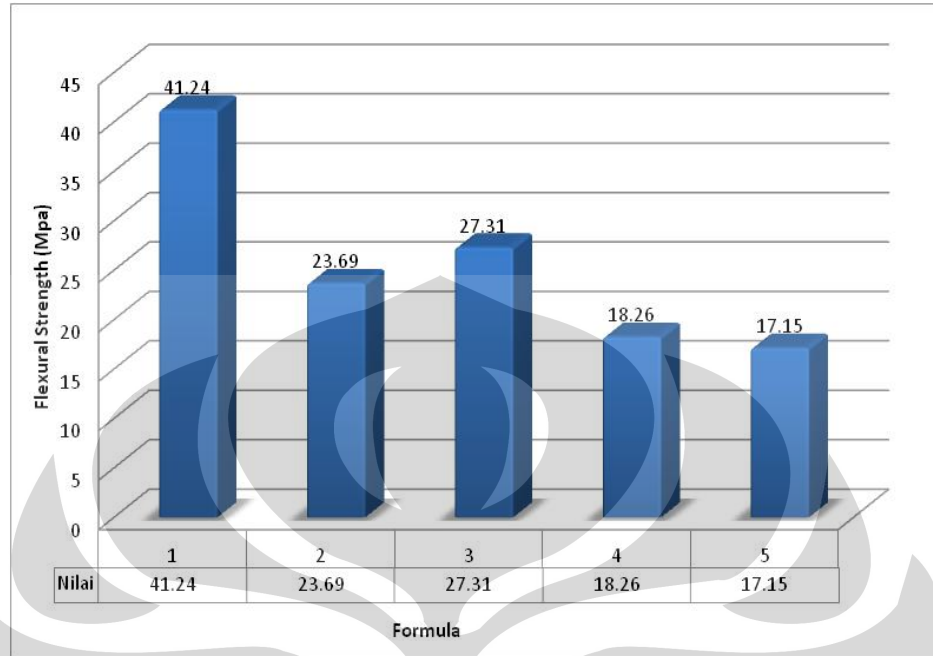
4.2.2 Hasil Pengujian Kelenturan (*Flexural*)

Pengujian tekuk seluruh sampel hasilnya ditampilkan dalam Tabel 4.3

Tabel 4.3 Nilai kekuatan kelenturan (*flexural strength*).

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
σ_F (MPa)	41,24	23.69	27.31	18.26	17.15

Hasil pengujian flexural strength ditampilkan dalam grafik berikut ini



Gambar 4.10 Grafik perbandingan kekuatan tekuk setiap formulasi komposit PP/PPS.

Dari grafik pada Gambar 4.10 di atas menunjukkan nilai kekuatan tekuk sampel F2, F3, F4, dan F5 dibandingkan dengan PP 100% (F1). Formula komposit F3 memiliki kekuatan tekuk tertinggi sebesar 27,31 MPa, sedangkan formula komposit F5 dengan kekuatan tekuk sebesar 17.15 MPa paling rendah nilainya.

Efek penurunan kekuatan tekuk seiring dengan penambahan konsentrasi pengisi karbon 0 wt% (F1), 44 wt% (F2 dan F3), dan 80 wt% (F4 dan F5) tergambar dengan jelas pada grafik. Semakin banyak fraksi massa karbon yang ditambahkan, berakibat kekuatan tekuknya semakin menurun.

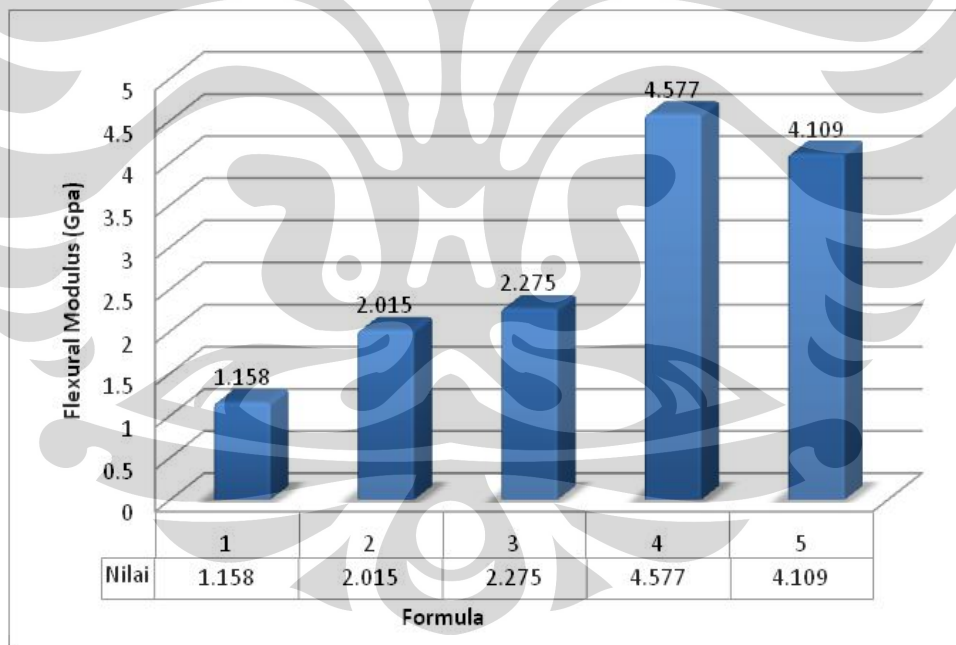
Perbedaan kekuatan tekuk antara antara F2 dan F3 serta antara F4 dan F5 lebih disebabkan perilaku getas dari komposit. Formula F2 lebih getas dari F3 karena proses pencetakan pelat tipe II yang digunakan untuk membuat spesimen uji tekuk mengalami kurang sempurna. Karena bahan yang digunakan dalam penelitian ini terbatas, maka pelat F2 yang hancur di-crushing kembali kemudian dicetak ulang. Proses penghalusan dan pemanasan dalam *mold* yang berulang-ulang menyebabkan matriks PP mengalami degradasi.

Terjadinya degradasi ditandai dengan menurunnya sifat mekanik dalam hal ini sifat kuat tekuk. Kadar matriks PP yang berkurang karena mengalami degradasi menyebabkan komposit F4 menjadi sangat getas, kemampuan matriks PP untuk mengikat pengisi menjadi berkurang. Akibat yang ditimbulkan adalah menurunnya kekuatan tekuk dan modulus tekuk pada komposit F4.

Secara keseluruhan, penurunan kekuatan tekuk juga dipengaruhi oleh penambahan PPS sebanyak 5 wt% dari total komposisi komposit. Dapat disimpulkan bahwa faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan tarik juga berpengaruh pada kekuatan tekuk.

Tabel 4.4 Nilai modulus kelenturan (*flexural modulus of elasticity*).

Kode Sampel	F1	F2	F3	F4	F5
E_F (GPa)	1,158	2.015	2.275	4.577	4.109



Gambar 4.11 Grafik perbandingan modulus tekuk setiap formulasi komposit PP/PPS.

Dari grafik perbandingan modulus tekuk pada Gambar 4.11 di atas, formula komposit F4 menunjukkan kekakuan yang lebih tinggi dibanding yang formula lain. Seharusnya komposit F4 memiliki nilai modulus tekuk yang lebih

rendah dari komposit F5, tetapi karena F5 bersifat sangat getas akibat degradasi maka nilai kekakuannya menjadi lebih rendah dari F4.

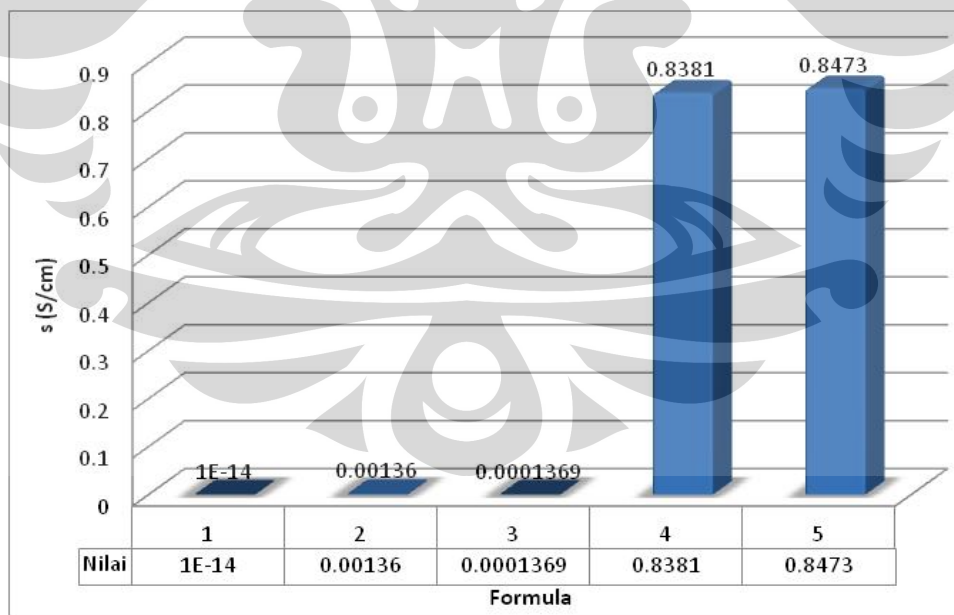
4.2.3 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik

Sifat yang sangat diperlukan dari pelat bipolar pada PEM *fuel cell* adalah daya hantar (konduktivitas) yang cukup tinggi. Tujuan utama dari penelitian ini adalah mendapatkan komposisi komposit bermatriks polimer dengan konduktivitas yang tinggi untuk aplikasi pelat bipolar.

Untuk sampel F1 (PP murni) kami tidak melakukan pengujian konduktivitas, data diperoleh dari literatur. Tabel 4.5 dan Gambar 4.12 di bawah ini menampilkan data dan grafik hasil pengujian konduktivitas listrik seluruh sampel.

Tabel 4.5 Nilai konduktivitas listrik.

Konduktivitas	F1	F2	F3	F4	F5
(S/cm) rata-rata	$1,00 \times 10^{-14}$	0.00136	0.000137	0.8381	0.8473



Gambar 4.12 Grafik perbandingan nilai konduktivitas setiap formulasi komposit PP/PPS/C.

Dari data dan grafik pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.11 di atas terlihat bahwa hasil data yang diperoleh bersifat fluktuatif. Namun secara umum, nilai konduktivitas cenderung semakin meningkat. Nilai konduktivitas tertinggi diperoleh F5 sebesar 0,8473 S/cm. Sebaliknya konduktivitas terendah diperoleh komposit F3 sebesar $1,37 \times 10^{-4}$ data.

Seperti yang diperkirakan, nilai konduktivitas komposit PP/PPS/C dengan konsentrasi karbon 80 wt% (F4 dan F5) jauh lebih besar nilainya dibandingkan komposit dengan konsentrasi karbon 44 wt% (F2 dan F3). Artinya, peningkatan nilai konduktivitas dari komposisi komposit yang berbeda merupakan fungsi dari konsentrasi karbon.

4.2.4 Perbandingan Sifat Komposit

Dari hasil pengujian di atas, maka dapat dibandingkan sifat-sifat komposit setiap formula yang dapat dilihat pada Tabel 4.6 di bawah ini.

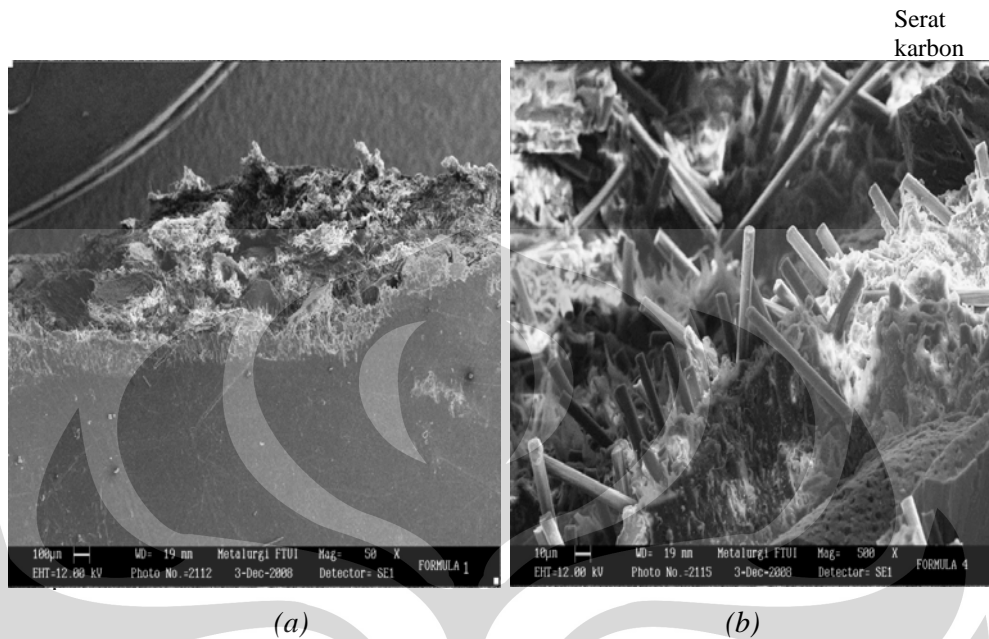
Tabel 4.6 Perbandingan Sifat Komposit

Formula	F1	F2	F3	F4	F5
Modulus Elastisitas (Gpa)	0.823	1.527	1.577	1.778	1.849
Kekuatan Tarik (Mpa)	25.21	11.36	12.98	6.775	7.241
Modulus Kelenturan (Gpa)	1.158	2.015	2.275	4.577	4.109
Kekuatan flextural (Mpa)	41.24	23.69	27.31	18.26	17.15
Konduktivitas (S/cm)	1E-14	0.00136	0.0001369	0.8381	0.8473

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa formula lima memiliki nilai konduktivitas tertinggi, tetapi memiliki sifat mekanis yang rendah. Di sisi lain, formula ketiga memiliki konduktivitas terendah, tetapi sifat mekanis tertinggi. Keempat formula komposit (F2, F3, F4, F5) belum memiliki komposisi optimal dimana diharapkan komposit yang dihasilkan memiliki sifat mekanis yang baik dan juga memiliki sifat konduktivitas yang baik, sehingga masih dibutuhkan penelitian lebih lanjut, khususnya dalam pemilihan matriks, aditif dan penguat karbon yang digunakan.

4.2.5 Hasil Pengamatan SEM

4.2.5.1 Analisis Permukaan Patahan Spesimen F2



Gambar 4.13 Permukaan patahan sample F2: (a) Perbesaran 50X, (b) Perbesaran 500X.

Gambar 4.13 merupakan hasil foto SEM pada permukaan patahan sampel formulasi 2 (F2) pada pengujian tarik. Dari gambar 4.13 terlihat bahwa pada sampel patahan F2 terdapat banyak serat karbon, keberadaan serat karbon sangat terlihat dominan pada sample F2 ini. Serat karbon berperan sebagai *reinforcement* pada komposit.

Pada sampel formula dua ini, sempat mengalami kegagalan dalam proses *hot press* sehingga sampel dilakukan proses *crushing* ulang, kemudian dilakukan *hot press* kembali. Namun dari hasil SEM tidak terlihat adanya degradasi material akibat pengulangan proses *crushing* dan *hot blending*.

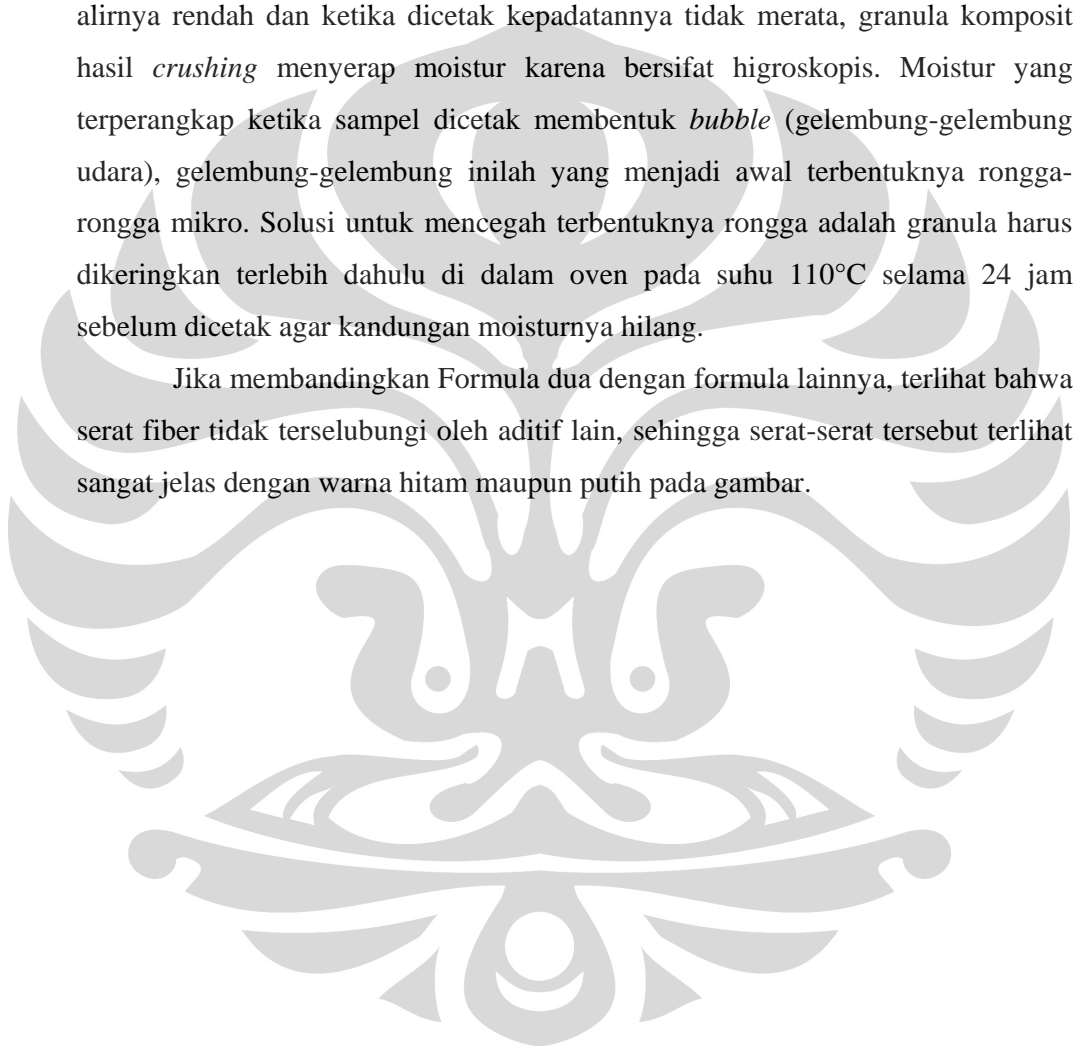
Persebaran warna yang tidak seragam, menunjukkan bahwa pada formulasi 2 masih kurang homogen. Faktor yang menyebabkan kurang homogen tersebut adalah karena kurangnya pemberian *coupling agent* yang cukup pada formulasi 2. Secara tidak langsung menyebabkan proses pembasahan (*wetting*) pada formula dua ini menjadi kurang maksimal.

Poros-poros (*void*) juga terlihat pada hasil foto SEM formula 2 dimana terdapat poros-poros berukuran kecil. Poros tersebut merupakan udara yang

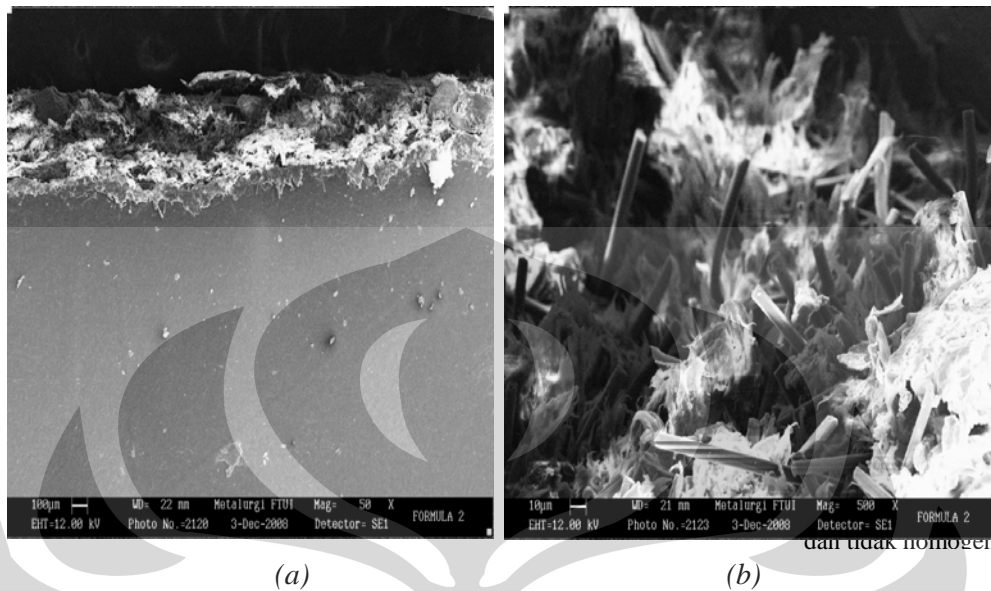
terjebak pada saat proses *hot press* dimana penekanan dilakukan pada tekanan ruang, sehingga hanya mengandalkan temperatur pelelehan dari komposit tanpa tambahan penekanan. Hal ini menyebabkan udara yang terjebak di dalam komposit tidak tertekan keluar dari komposit yang dihasilkan.

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 moister karena bersifat higroskopis. Moister 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.

Jika membandingkan Formula dua dengan formula lainnya, terlihat bahwa serat fiber tidak terselubungi oleh aditif lain, sehingga serat-serat tersebut terlihat sangat jelas dengan warna hitam maupun putih pada gambar.



4.2.5.2 Analisis Permukaan Patahan Spesimen F3



Gambar 4.14 Permukaan patahan sampel F3: (a) Perbesaran 50X, (b) Perbesaran 500X.

Gambar 4.14 merupakan hasil foto SEM pada permukaan patahan sampel formulasi 3 (F3) pada pengujian tarik. Dari gambar 4.14 diatas dapat kita lihat bahwa sampel patahan F3 hampir sama dengan F2 yaitu masih belum mencapai pencampuran yang sempurna/homogen, hal ini terlihat dari sebaran warna hitam dan putih yang belum merata. Persebaran warna yang tidak seragam, menunjukkan bahwa pada formulasi 3 masih kurang homogen. Faktor yang menyebabkan kurang homogen tersebut adalah karena kurangnya pemberian *coupling agent* yang cukup pada formulasi 3 ini. Secara tidak langsung juga menyebabkan proses pembasahan (*wetting*) pada formula dua ini menjadi kurang maksimal.

Pada gambar 4.14(a) terlihat adanya beberapa cacat berupa poros (*void*). Poros tersebut merupakan udara yang terjebak pada saat proses *hot press* dimana penekanan dilakukan pada tekanan ruang, sehingga hanya mengandalkan temperatur pelelehan dari komposit tanpa tambahan penekanan. Hal ini menyebabkan udara yang terjebak di dalam komposit tidak tertekan keluar dari komposit yang dihasilkan. Adanya poros-poros tersebut dikarenakan kebersihan sampel yang kurang diperhatikan, sehingga besar kemungkinan ada partikel pengotor yang ikut masuk bercampur, idealnya hasil pencampuran dari *hot*

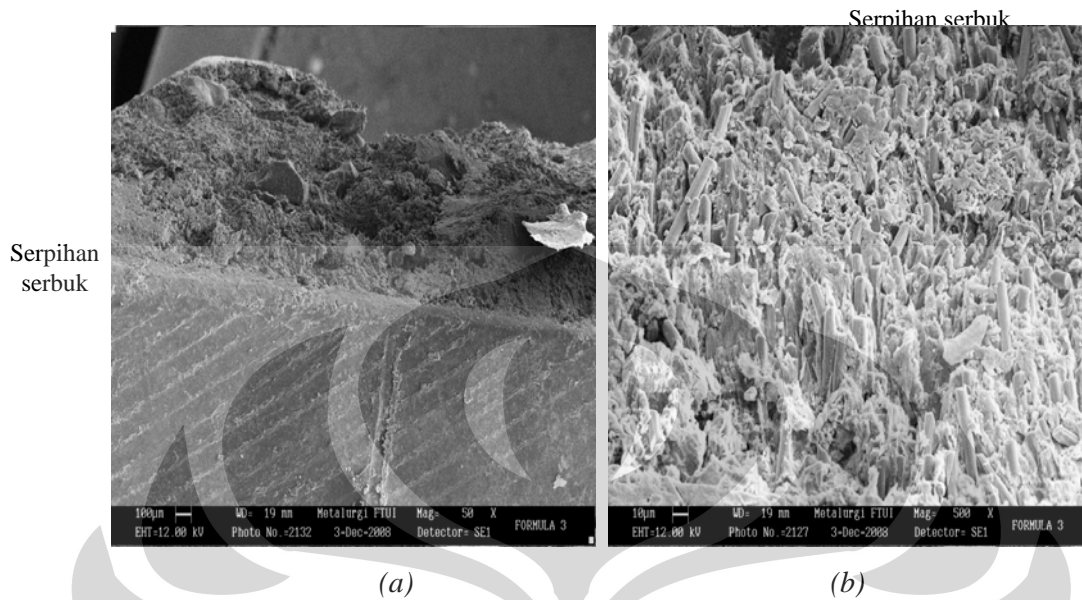
blending langsung di-*crushing* dan di-*hot-press* dalam hari yang bersamaan, untuk mencegah masuknya uap air dari udara ke sampel, namun dalam percobaan ini terdapat jarak sekitar satu minggu antara proses *hot blending* dengan *hot press*.

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.

Gambar 4.14(b) menunjukkan bahwa banyak serat fiber yang tidak utuh lagi dan mengalami patah. Keberadaan serat fiber masih terlihat dominan pada permukaan sample Formula 3 ini. Berbeda dari F2, pada permukaan patahan sampel F3 ini serat-serat tersebut sebagian besar sudah diselimuti oleh aditif lain, sehingga pada SEM nampak seperti berwarna putih.

Pada hasil pencampuran formula 3 didapatkan hasil pencampuran yang getas dan saling terpisah satu sama lain. Perilaku getas pada hasil pencampuran ini dikarenakan jumlah PP yang sedikit pada formula tersebut. Karena jumlah PP yang sedikit, maka sifat komposit didominasi oleh sifat penguat karbon yang getas.

4.2.5.3 Analisis Permukaan Patahan Spesimen F4



Gambar 4.15 Permukaan patahan sampel F4: (a) Perbesaran 50X, (b) Perbesaran 500X.

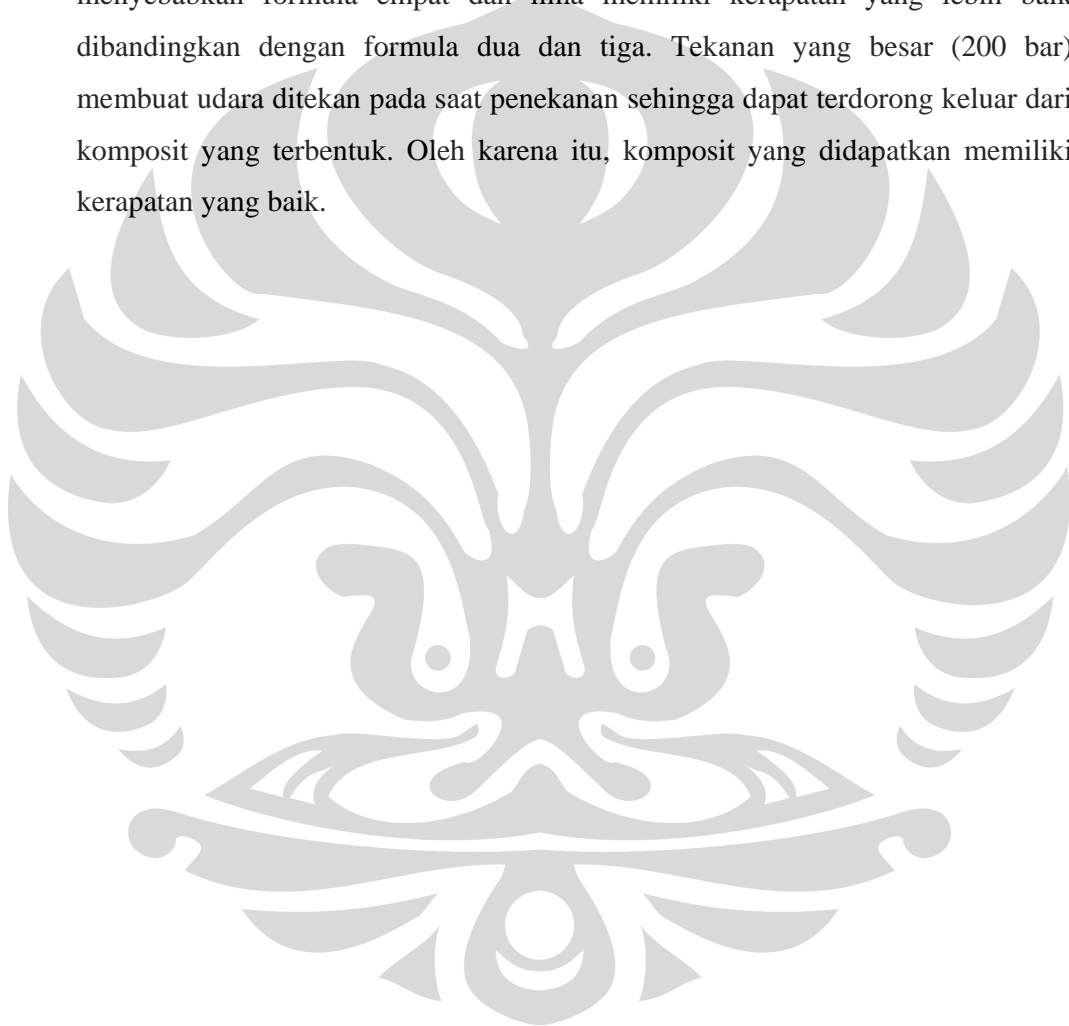
Gambar 4.15 merupakan hasil foto SEM pada permukaan patahan sampel formulasi 4 (F4) pada pengujian tarik. Dari gambar 4.15 terlihat bahwa pada permukaan patahan formula 4 terlihat banyak serpihan menyerupai serbuk, hal ini menunjukkan bahwa pada spesimen formula 4 memiliki tingkat kerapuhan yang cukup tinggi, hal ini karena kadar graphite pada formula 4 paling banyak dibandingkan formula lainnya. Dengan kata lain kekuatan mekanis dari sampel F4 ini sudah menurun drastis.

Dari Gambar 4.15 sudah tidak terlihat keberadaan serat fiber, hal ini disebabkan karena kadar serat fiber formula 4 lebih sedikit daripada formula 2 dan 3 serta serat-serat tersebut menjadi serpihan-serpihan serbuk dan dominan pada permukaan sampel formula 4 ini. Perubahan serat fiber menjadi serbuk karena saat dilakukan *hot press* menggunakan parameter suhu proses 240°C dan tekanan hingga 200 bar, tekanan dan suhu setinggi itu menyebabkan serat karbon hancur menjadi serpihan serbuk. Tingginya kadar *graphite* menyebabkan serat karbon juga tertutup.

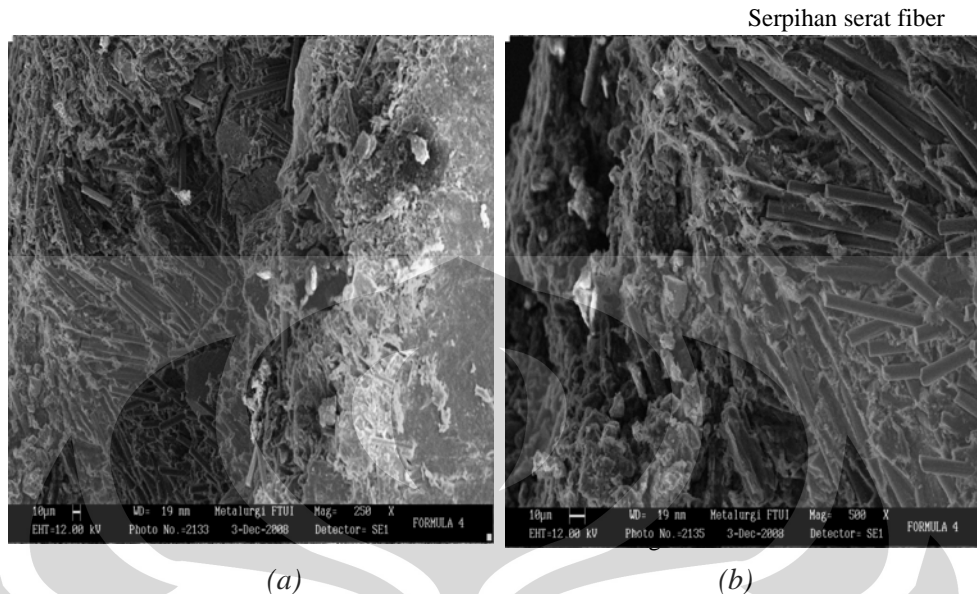
Kadar PP pada formula 4 hanya sebesar 14% menyebabkan *wetting* pada formula 4 ini sangat rendah. Pada hasil pencampuran formula 4 didapatkan hasil

pencampuran yang getas dan saling terpisah satu sama lain. Perilaku getas pada hasil pencampuran ini dikarenakan jumlah PP yang sedikit pada formula tersebut. Karena jumlah PP yang sedikit, maka sifat komposit didominasi oleh sifat penguat karbon yang getas.

Poros-poros tidak ditemukan pada hasil *hot press* pada formula 4 ini. Hal ini disebabkan oleh perbedaan parameter tekanan *hot press* pada proses yang menyebabkan formula empat dan lima memiliki kerapatan yang lebih baik dibandingkan dengan formula dua dan tiga. Tekanan yang besar (200 bar) membuat udara ditekan pada saat penekanan sehingga dapat terdorong keluar dari komposit yang terbentuk. Oleh karena itu, komposit yang didapatkan memiliki kerapatan yang baik.



4.2.5.4 Analisis Permukaan Patahan Spesimen F5



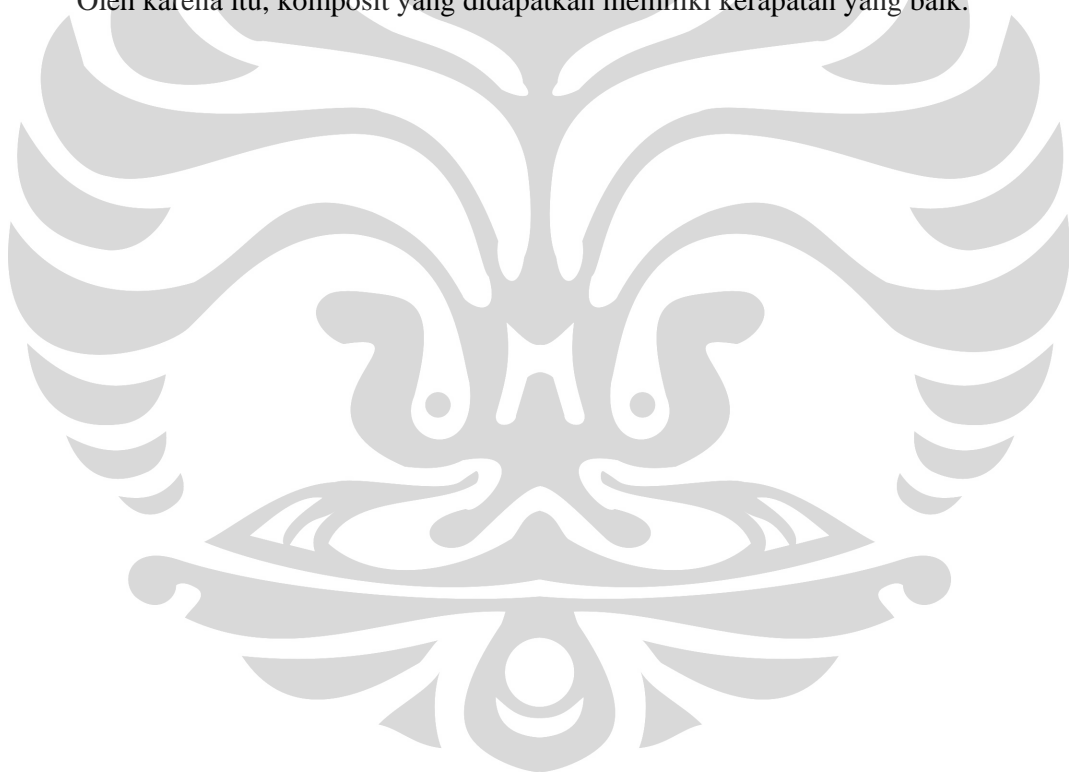
Gambar 4.16 Permukaan patahan sampel F5: (a) Perbesaran 250X, (b) Perbesaran 500X.

Gambar 4.15 merupakan hasil foto SEM pada permukaan patahan sampel formulasi 5 (F5) pada pengujian tarik. Dari gambar 4.16 di atas terlihat bahwa sampel patahan formulasi 5 hampir didominasi oleh warna hitam, sehingga secara sepintas terlihat bahwa pencampuran mendekati sempurna, namun jika diamati dengan jangkauan yang lebih luas lagi masih ada beberapa bagian yang terlihat belum homogen.

Serat fiber kembali terlihat pada permukaan sampel formula 5 ini, namun serat fiber yang tersisa hanya sedikit dan ada beberapa yang tidak utuh bahkan sudah hancur menjadi serpihan serbuk. Hampir seluruh serat fiber yang tersisa diselimuti warna hitam, hal tersebut karena pada formulasi 5 ini kadar karbon blacknya lebih banyak dari formula lainnya (F2, F3, F4). Pada sampel formulasi 5 ini banyak serat yang terlihat putus atau tidak utuh, hal ini dikarenakan karena pada saat proses pencetakan dengan *hot press*, sampel formulasi 5 ini mengalami kegagalan, sehingga sebagian sampel dilakukan proses *crushing* ulang dan kemudian dilakukan *hot press* kembali, pengulangan proses ini bisa menyebabkan degradasi sifat material komposit ini.

Sama seperti formula 4, kadar PP pada formula 5 hanya sebesar 14% menyebabkan *wetting* pada formula 5 ini juga rendah. Pada hasil pencampuran formula 5 didapatkan hasil pencampuran yang getas dan saling terpisah satu sama lain. Perilaku getas pada hasil pencampuran ini dikarenakan jumlah PP yang sedikit pada formula tersebut. Karena jumlah PP yang sedikit, maka sifat komposit didominasi oleh sifat penguat karbon yang getas.

Poros-poros juga tidak ditemukan pada formula 5 ini. Hal ini disebabkan oleh perbedaan parameter tekanan *hot press* pada proses yang menyebabkan formula empat dan lima memiliki kerapatan yang lebih baik dibandingkan dengan formula dua dan tiga. Tekanan yang besar (200 bar) membuat udara ditekan pada saat penekanan sehingga dapat terdorong keluar dari komposit yang terbentuk. Oleh karena itu, komposit yang didapatkan memiliki kerapatan yang baik.



BAB 5

KESIMPULAN

Setelah mendapat data hasil penelitian maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kekuatan tarik tertinggi komposit PP/PPS/C adalah formula F3 sebesar 12,98 MPa, tetapi nilainya masih dibawah kekuatan tarik F1 (PP 100 *wr%*). Sedangkan komposit dengan modulus tarik tertinggi adalah formula F5 sebesar 1,849 GPa, menunjukkan formula F5 paling getas bila dibandingkan komposit lain.
2. Kekuatan flexural tertinggi komposit PP/PPS/C adalah formula F3 sebesar 27.31 MPa. Sedangkan komposit dengan modulus flexural tertinggi adalah formula F4 sebesar 4.577 GPa menunjukkan F4 paling kaku bila dibandingkan komposit lain.
3. Nilai konduktivitas tertinggi komposit PP/PPS/C adalah formula F5 dengan nilai 0.8473 S/cm.
4. Penambahan bahan pengisi karbon hitam, serat karbon, dan grafit sintetik yang berbeda-beda mempengaruhi nilai sifat mekanik dan konduktivitas dari komposit.
5. Penambahan PPS kedalam komposit PP/PPS/C dengan kadar 5 *wr%* berpengaruh pada kekuatan tarik, kekuatan tekuk dan konduktivitas.
6. Dalam penelitian ini belum ditemukan komposisi optimal yang dapat memberikan sifat mekanis dan konduktivitas yang optimal, sehingga dibutuhkan penelitian lanjutan.

DAFTAR REFERENSI

- [1] 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 18/2/09.
- [2] Harper CA - *Modern Plastics Handbook*, (McGraw-Hill, 1999), hlm 58
- [3] 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.
- [4] Wikipedia. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell
diakses pada 14/04/09.
- [5] A. Hermann, T. Chaudhuri, dan P. Spagnol, *International Journal of Hydrogen Energy* (2005), 30, 1297 – 1302.
- [6] <http://www.eppo.go.th/encon/energyresearch/PDF/somruthai.pdf>
diakses pada 18/03/09.
- [7] A. Heinzl, *et al.*, “Injection molded low cost bipolar plates for PEM fuel cells”.
<http://www.zbt-duisburg.de/downloads/Grove2003-ZBT-Bipolar.pdf>
diakses pada 18/2/09.
- [8] V. V. Vasiliev dan E. V. Morozov, *Advanced Mechanics of Composite Materials* (Amsterdam: Elsevier Ltd, 2007), hlm. 18.

- [9] Syahrial, Anne Zulfia. *Diktat Kuliah Komposit*. Depok : Departemen Metalurgi & Material UI. 2008.
- [10] Yuwono, Akhmad Herman. *Diktat Kuliah Polimer Adesif*. Depok : Departemen Metalurgi & Material UI. 2007.
- [11] Edward E. Muccio, *Plastics Processing Technology* (USA: ASM International, 1994), hlm 37, 173.
- [12] Bor Z. Jang, *Advanced Polymer Composites* (USA: ASM International, 1994), hlm. 3 – 4, 38.
- [13] Anatole A. Klyosov, *Wood Plastic Composites* (New York: John Willey & Sons, 2007), hlm. 161 – 173.
- [14] R. J. Crawford, *Plastics Engineering, Third Edition* (Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998), hlm. 8 – 9, 18 – 28, 245 – 351.
- [15] A. Heinzl, *et al.*, “Injection molded low cost bipolar plates for PEM fuel cells”. http://www.zbt-duisburg.de/_downloads/Grove2003-ZBT-Bipolar.pdf diakses pada 18/3/09.
- [16] A. Hermann, T. Chaudhuri, dan P. Spagnol, *International Journal of Hydrogen Energy* (2005), 30, 1297 – 1302.
- [17] D. Tripathi, *Practical Guide to Polypropylene* (Shawbury: Rapra Technology Ltd, 2002), hlm. 1, 9 – 10, 19 – 20.
- [18] <http://www.pslc.ws/mactest/pp.htm> diakses pada 27/11/08.
- [19] R. J. Hernandez, *et al.*, *Plastic Packaging: Properties, Processing, Applications, and Regulations* (Munich: Carl Hanser Verlag, 2000), hlm. 58, 134.

- [20] H. Belofsky, *Plastics: Product Design and Proses Engineering* (New York: Carl Hanser Verlag, 1995), hlm. 72.
- [21] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction, 7th Edition* (New York: John Wiley & Sons, 2007), hlm. 504, 537, 566, 587 – 589, 593 – 594.
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/Polyphenylene_sulfide diakses pada 13/03/08
- [23] BEHLE, U. and MERMANS, B., *Kunststoffe*, 86(10), 1549-50 (1996) (PPS)
- [24] Harper C.A., *Modern Plastics Handbook* (McGraw-Hill, 1999) hlm 58
- [25] H. Zweifel (Editor), *Plastics Additives Handbook 5th Edition* (Munich: Hanser Publishers, 2001), hlm. 4, 6, 903 – 905, 930, 933 – 934, 1004.
- [26] <http://www.asbury.com/Carbons.html> diakses pada 22/11/08.
- [27] H. Zweifel (Editor), *Plastics Additives Handbook 5th Edition* (Munich: Hanser Publishers, 2001), hlm. 4, 6, 903 – 905, 930, 933 – 934, 1004.
- [28] <http://www.asbury.com/Synthetic-Graphite.html> diakses pada 22/11/08.
- [29] BDG Graphite and Carbon Fibers. *Buckyballs, Diamond, and Graphite*. <http://www.chem.wisc.edu/~newtrad/CurrRef/BDGTopic/BDGtext/BDGGraph.html>. (30 Desember 2008)
- [30] D. F. Caulfield *et al.*, *Wood Thermoplastic Composites Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite, Chap. 13* (Taylor and Francis, 2005), hlm. 4 – 5.
- [31] M. Ohring, *The Materials Science of Thin Films* (San Diego: Academic Press, 1991), hlm. 439 – 443.

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

[33] 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.

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

[35] http://www.hdm-stuttgart.de/projekte/printing-inks/b_selec0.htm diakses pada 23/04/08.

[36] <http://www.tpc.com.sg/> diakses pada 22/11/08.

[37] <http://www.cn-cat.com/Products/Additives/Antioxidant/B215225.htm> diakses 29/11/08.

[38] ASTM International, *Annual Book of ASTM Standards, Vol. 08.01*.

[39] 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 15/12/08.

Lampiran 1. Hasil Uji Tarik Sampel PP Murni / F1

Test Certificate**Plastics Tensile Test**

Order No.....J1080466
 Test standard.....ASTM D638 type IV
 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.....J1080466\pptePP C p\pdf
 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	588.1	
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	

Lampiran 2. Hasil Uji Tarik Sampel Formulasi 2

Test Certificate**Plastics Tensile Test**

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

Material.....PP50%PPS C1
 Tested on.....2008-12-04
 Kondisi Uji.....22.5oC, RH 62%

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
 Fmax.....Maximum load
 Comment.....Comment

Test No	BNo	a mm	b mm	E GPa	"M MPa	"B %	Fmax kN	Comment
70	PP50PPS C1 -1	1.860	6.120	1.421	10.40	1.699	0.118	
71	PP50PPS C1 -2	1.850	6.180	1.723	12.63	1.701	0.144	
72	PP50PPS C1 -3	1.850	6.170	1.633	12.49	1.981	0.143	
73	PP50PPS C1 -4	1.890	6.200	1.397	11.39	2.400	0.133	
74	PP50PPS C1 -5	1.880	6.150	1.459	9.903	1.515	0.114	
Mean:		1.866	6.164	1.527	11.36	1.859	0.131	
Minimum:		1.850	6.120	1.397	9.903	1.515	0.114	
Maximum:		1.890	6.200	1.723	12.63	2.400	0.144	
Std.dev.:		0.018	0.030	0.144	1.218	0.345	0.014	
W(0.95) %:		1.209	0.614	11.67	13.31	23.05	13.04	
Values:		5	5	5	5	5	5	

Lampiran 3. Hasil Uji Tarik Sampel Formulasi 3

Test Certificate**Plastics Tensile Test**

Order No.....J1080466
 Teststandard.....ASTM D638typeIV
 Tester.....abd
 Material.....PP50%PPS C2
 Tested on.....2008-12-04
 Kondisi Uji.....22.5oC , RH 62%

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
 Fmax.....Maximum load
 Comment.....Comment

Test No	BNo	a mm	b mm	E GPa	"M MPa	"B %	Fmax kN	Comment
75	PP50PPS C2-1	1.920	6.150	1.646	13.46	2.488	0.159	
77	PP50PPS C2-3	1.910	6.170	1.776	14.09	2.707	0.166	
78	PP50PPS C2-4	1.820	6.230	1.474	12.21	2.920	0.139	
79	PP50PPS C2-5	1.880	6.150	1.541	12.83	2.127	0.148	
80	PP50PPS C2-6	1.870	6.130	1.450	12.30	2.394	0.141	
Mean:		1.880	6.166	1.577	12.98	2.527	0.151	
Minimum:		1.820	6.130	1.450	12.21	2.127	0.139	
Maximum:		1.920	6.230	1.776	14.09	2.920	0.166	
Std.dev.:		0.039	0.038	0.135	0.797	0.303	0.012	
W(0.95) %:		2.600	0.775	10.59	7.623	14.86	9.669	
Values:		5	5	5	5	5	5	

Lampiran 4. Hasil Uji Tarik Sampel Formulasi 4

MESSPHYSIK Laborgeräteges.m.b.H.

Test Certificate**Plastics Tensile Test**

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

Material.....PP15%PPS C3
 Tested on.....2008-12-04
 Kondisi Uji.....22.5oC , RH 62%

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
 Fmax.....Maximum load
 Comment.....Comment

Test No	BNo	a mm	b mm	E GPa	"M MPa	"B %	Fmax kN	Comment
81	PP15PPS C3-1	2.200	7.350	2.033	8.714	0.601	0.141	
82	PP15PPS C3-2	2.100	7.430	1.708	4.882	0.463	0.076	
83	PP15PPS C3-4	2.090	7.170	1.811	7.497	0.584	0.112	
84	PP15PPS C3-5	2.210	6.650	2.105	9.373	0.723	0.138	
85	PP15PPS C3-6	1.950	6.480	1.231	3.407	0.462	0.043	
Mean:		2.110	7.016	1.778	6.775	0.567	0.102	
Minimum:		1.950	6.480	1.231	3.407	0.462	0.043	
Maximum:		2.210	7.430	2.105	9.373	0.723	0.141	
Std.dev.:		0.105	0.427	0.345	2.547	0.109	0.042	
W(0,95) %:		6.185	7.548	24.12	46.68	23.91	51.05	
Values:		5	5	5	5	5	5	

Lampiran 5. Hasil Uji Tarik Sampel Formulasi 5

MESSPHYSIK Laborgeräteges.m.b.H.

Test Certificate

Plastics Tensile Test

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

Material.....PP15%PPS C4
 Tested on.....2008-12-04
 Kondisi Uji.....22.5oC , RH 62%

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
 Fmax.....Maximum load
 Comment.....Comment

Test No	BNo	a mm	b mm	E GPa	*M MPa	*B %	Fmax kN	Comment
86	PP15PPS C4-1	1.990	6.456	1.759	5.918	0.508	0.076	
87	PP15PPS C4-2	2.060	6.740	1.980	7.631	0.539	0.106	
88	PP15PPS C4-3	2.070	7.200	1.688	7.937	0.702	0.118	
89	PP15PPS C4-4	2.040	6.980	1.967	7.479	0.504	0.106	
Mean:		2.040	6.844	1.849	7.241	0.563	0.102	
Minimum:		1.990	6.456	1.688	5.918	0.504	0.076	
Maximum:		2.070	7.200	1.980	7.937	0.702	0.118	
Std.dev.:		0.036	0.320	0.147	0.902	0.094	0.018	
W(0.95) %:		2.776	7.432	12.68	19.83	26.50	28.21	
Values:		4	4	4	4	4	4	

Lampiran 6. Hasil Uji Tekuk Sampel PP Murni / F1

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

Lampiran 7. Hasil Uji Tekuk Sampel Formulasi 2

MESSPHYSIK Laborgeräteges.m.b.H.

Test Certificate

Flexural Test

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

Material.....PP50%PPS C1
 Tested on.....2008-12-04
 Kondisi Uji.....22.5oC,RH61%

Testing machine.....AGS-G
 Test speed 1.....0 % -> 1.716 mm/min

Directory.....J1080466ftPP C pvd
 Parameterset.....astm d790

Legend

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

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

Test No	BNo	a mm	b mm	Ls mm	Ef GPa	"RM MPa
66	PP50%PPSC1-1	3.980	11.66	63.68	2.199	22.30
67	PP50%PPSC1-2	3.980	12.31	63.68	1.512	22.20
68	PP50%PPS C1-3	3.900	11.89	62.40	1.918	25.59
69	PP50%PPS C1-4	4.020	11.95	64.32	2.626	26.43
70	PP50%PPS C1-5	4.030	12.39	64.48	1.818	21.94
Mean:		3.982	12.04	63.71	2.015	23.69
Minimum:		3.900	11.66	62.40	1.512	21.94
Maximum:		4.030	12.39	64.48	2.626	26.43
Std.dev.:		0.051	0.304	0.819	0.421	2.141
W(0.95) %:		1.596	3.138	1.596	25.93	11.22
Values:		5	5	5	5	5

Lampiran 8. Hasil Uji Tekuk Sampel Formulasi 3

Test Certificate**Flexural Test**

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

Material.....PP50%PPS C2
 Tested on.....2008-12-10
 Kondisi Uji.....24oC,RH56%

Testing machine.....AGS-G
 Test speed 1.....0 % -> 1.627 mm/min

Directory.....J1080466PP 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
71	PP50%PPS C2-1	3.840	12.25	61.44	2.488	27.50
73	PP50%PPS C2-2	3.790	12.54	60.64	2.035	27.42
74	PP50%PPS C2-3	3.830	11.66	61.28	2.205	27.26
75	PP50%PPS C2-4	3.830	12.86	61.28	2.636	26.73
76	PP50%PPS C2-5	3.810	12.00	60.96	2.013	27.65
Mean:		3.820	12.26	61.12	2.275	27.31
Minimum:		3.790	11.66	60.64	2.013	26.73
Maximum:		3.840	12.86	61.44	2.636	27.65
Std.dev.:		0.020	0.465	0.320	0.277	0.354
W(0.95) %:		0.650	4.711	0.650	15.11	1.611
Values:		5	5	5	5	5

Lampiran 9. Hasil Uji Tekuk Sampel Formulasi 4

Test Certificate

Flexural Test

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

Material.....PP15%PPS C3
 Tested on.....2008-12-10
 Kondisi Uji.....24oC,RH56%

Testing machine.....AGS-G
 Test speed 1.....D % -> 1.682 mm/min

Directory.....J1080466RPP C pvd
 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
77	PP15%PPS C3-1	3.890	12.41	62.24	4.230	18.02
78	PP15%PPS C3-2	3.860	12.96	61.76	4.559	18.12
79	PP15%PPS C3-3	3.900	11.90	62.40	4.345	17.13
80	PP15%PPS C3-4	3.900	12.59	62.40	4.927	18.94
81	PP15%PPS C3-5	3.940	12.20	63.04	4.823	19.11
Mean:		3.898	12.41	62.37	4.577	18.26
Minimum:		3.860	11.90	61.76	4.230	17.13
Maximum:		3.940	12.96	63.04	4.927	19.11
Std.dev.:		0.029	0.400	0.458	0.299	0.797
W(0.95) %:		0.912	3.998	0.912	8.110	5.415
Values;		5	5	5	5	5

Lampiran 10. Hasil Uji Tekuk Sampel Formulasi 5

Test Certificate**Flexural Test**

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

Material.....PP15%PPS C4
 Tested on.....2008-12-10
 Kondisi Uji.....24oC,RH56%

Testing machine.....AGS-G
 Test speed 1.....0 % -> 1.764 mm/min

Directory.....J1080466ftPP C pvd
 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
82	PP15%PPS C4-1	4.090	11.71	65.44	3.873	16.89
83	PP15%PPS C4-2	4.090	11.86	65.44	3.998	16.86
84	PP15%PPS C4-3	4.130	11.77	66.08	4.354	17.76
85	PP15%PPS C4-4	4.140	12.49	66.24	4.255	16.92
86	PP15%PPS C4-5	4.130	12.66	66.08	4.064	17.32
Mean:		4.116	12.10	65.86	4.109	17.15
Minimum:		4.090	11.71	65.44	3.873	16.86
Maximum:		4.140	12.66	66.24	4.354	17.76
Std.dev.:		0.024	0.443	0.385	0.195	0.389
W(0.95) %:		0.726	4.544	0.726	5.878	2.817
Values:		5	5	5	5	5

Lampiran 11. Hasil Uji Konduktivitas Listrik

Data konduktivitas listrik:

Frekuensi (Hz)	σ (S/cm), S = Siemen = 1/Ohm			
	F2	F3	F4	F5
0.1	1.292E-03	1.307E-04	8.363E-01	8.489E-01
1	1.307E-03	1.328E-04	8.356E-01	8.474E-01
10	1.308E-03	1.335E-04	8.353E-01	8.464E-01
20	1.315E-03	1.336E-04	8.348E-01	8.457E-01
30	1.344E-03	1.322E-04	8.350E-01	8.455E-01
40	1.356E-03	1.327E-04	8.345E-01	8.436E-01
50	1.356E-03	1.329E-04	8.350E-01	8.453E-01
60	1.356E-03	1.339E-04	8.349E-01	8.463E-01
70	1.357E-03	1.339E-04	8.327E-01	8.461E-01
80	1.352E-03	1.346E-04	8.353E-01	8.436E-01
90	1.349E-03	1.355E-04	8.333E-01	8.440E-01
100	1.355E-03	1.353E-04	8.355E-01	8.440E-01
200	1.354E-03	1.358E-04	8.322E-01	8.434E-01
300	1.366E-03	1.351E-04	8.335E-01	8.421E-01
400	1.370E-03	1.349E-04	8.329E-01	8.446E-01
500	1.376E-03	1.354E-04	8.326E-01	8.433E-01
600	1.374E-03	1.356E-04	8.338E-01	8.440E-01
700	1.373E-03	1.362E-04	8.336E-01	8.443E-01
800	1.368E-03	1.363E-04	8.340E-01	8.435E-01
900	1.371E-03	1.359E-04	8.341E-01	8.435E-01
1000	1.371E-03	1.368E-04	8.341E-01	8.436E-01
2000	1.361E-03	1.369E-04	8.342E-01	8.436E-01
3000	1.371E-03	1.364E-04	8.396E-01	8.494E-01
4000	1.362E-03	1.370E-04	8.397E-01	8.494E-01
5000	1.360E-03	1.364E-04	8.396E-01	8.500E-01
6000	1.357E-03	1.386E-04	8.404E-01	8.496E-01
7000	1.359E-03	1.385E-04	8.402E-01	8.503E-01
8000	1.364E-03	1.384E-04	8.405E-01	8.496E-01
9000	1.364E-03	1.387E-04	8.409E-01	8.505E-01
10000	1.361E-03	1.380E-04	8.408E-01	8.502E-01
20000	1.366E-03	1.392E-04	8.420E-01	8.512E-01

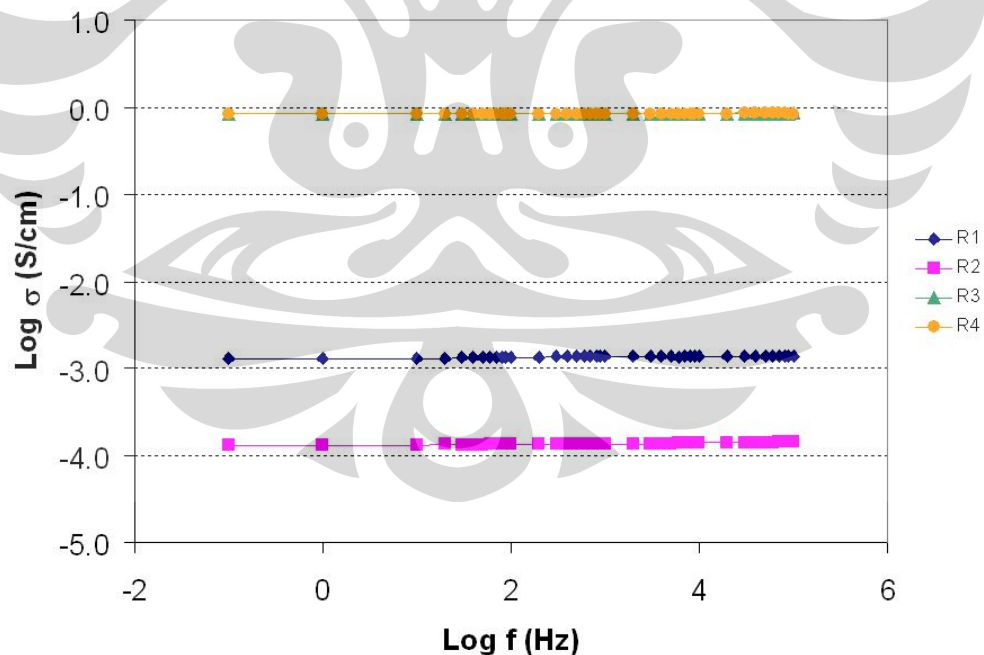
Data konduktivitas listrik (*lanjutan*):

Frekuensi (Hz)	σ (S/cm), S = Siemen = 1/Ohm			
	F2	F3	F4	F6
30000	1.371E-03	1.396E-04	8.425E-01	8.514E-01
40000	1.376E-03	1.399E-04	8.436E-01	8.519E-01
50000	1.378E-03	1.407E-04	8.432E-01	8.515E-01
60000	1.378E-03	1.419E-04	8.454E-01	8.514E-01
70000	1.385E-03	1.433E-04	8.468E-01	8.513E-01
80000	1.383E-03	1.435E-04	8.480E-01	8.515E-01
90000	1.383E-03	1.446E-04	8.488E-01	8.510E-01
100000	1.385E-03	1.453E-04	8.514E-01	8.508E-01
σ (S/cm) rata-rata	1.360E-03	1.369E-04	8.381E-01	8.473E-01

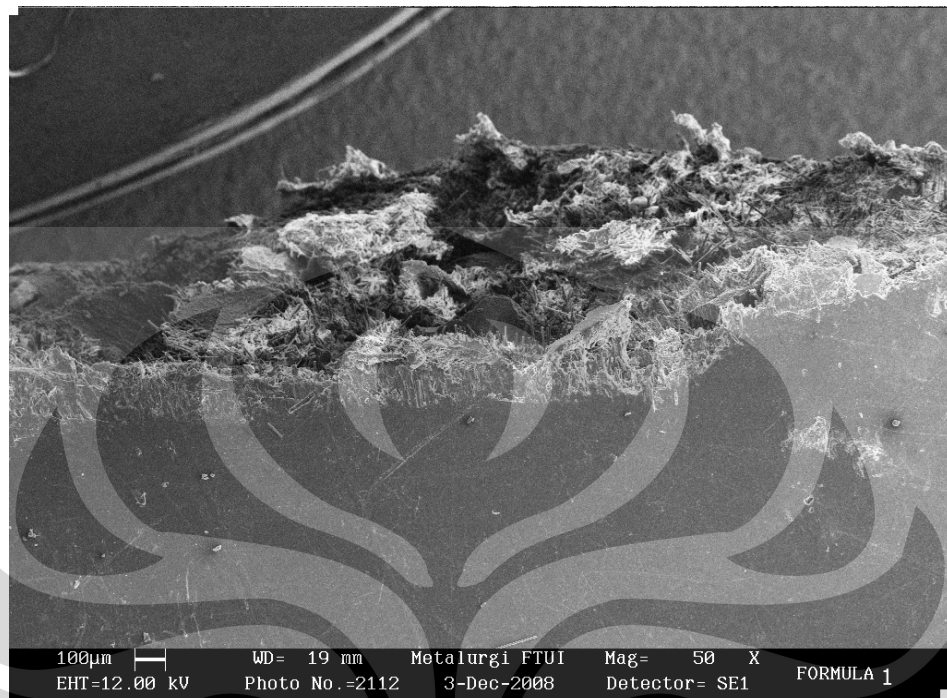
Konduktivitas listrik rata-rata:

σ (S/cm)			
F2	F3	F4	F5
0.00136	0.0001369	0.8381	0.8473

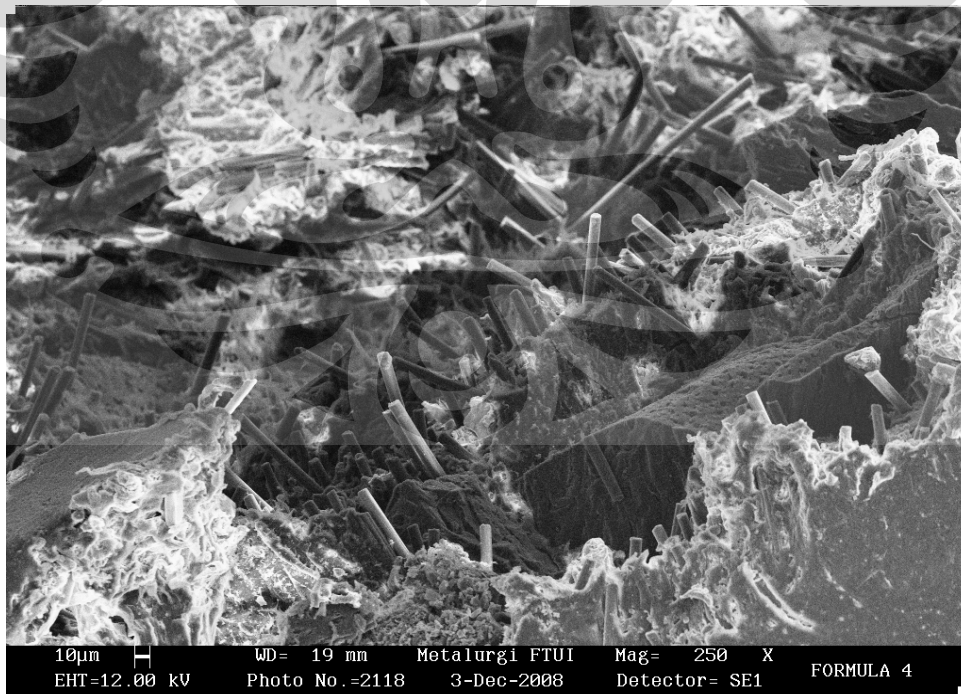
Kurva hubungan konduktivitas dengan frekuensi:



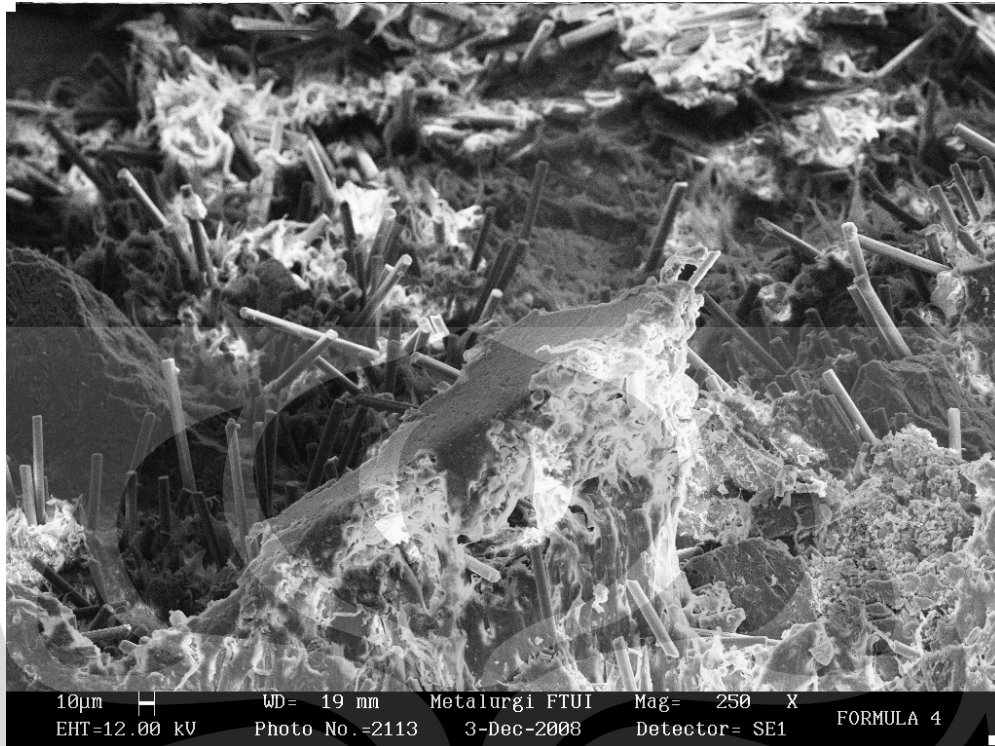
Lampiran 12. Hasil Foto SEM



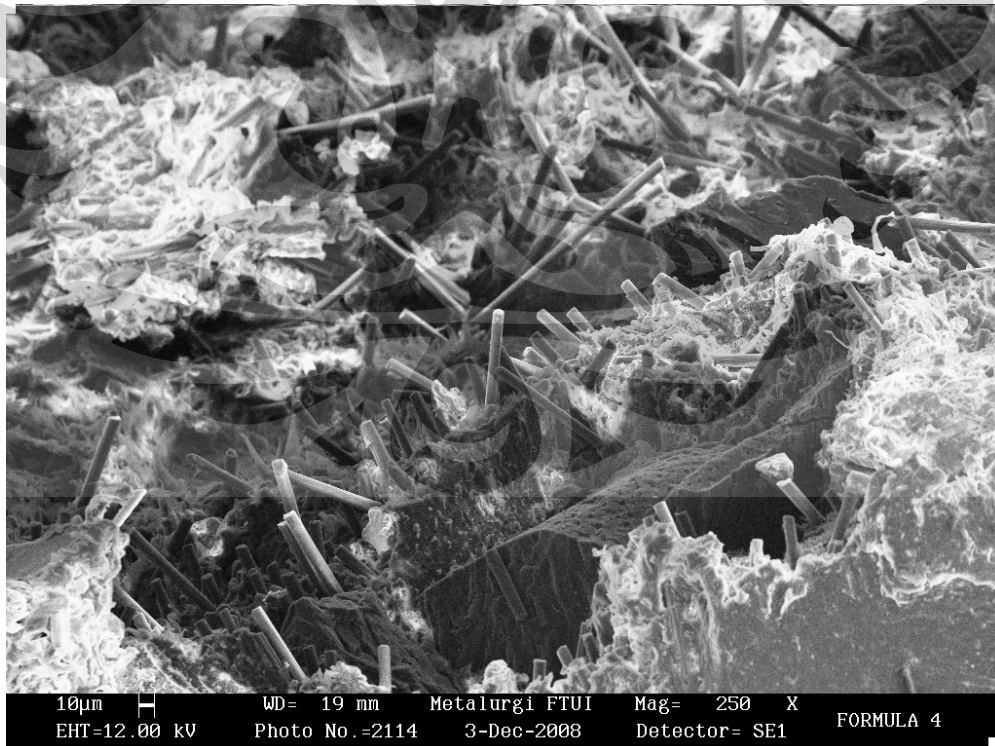
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 2 pada perbesaran 50X



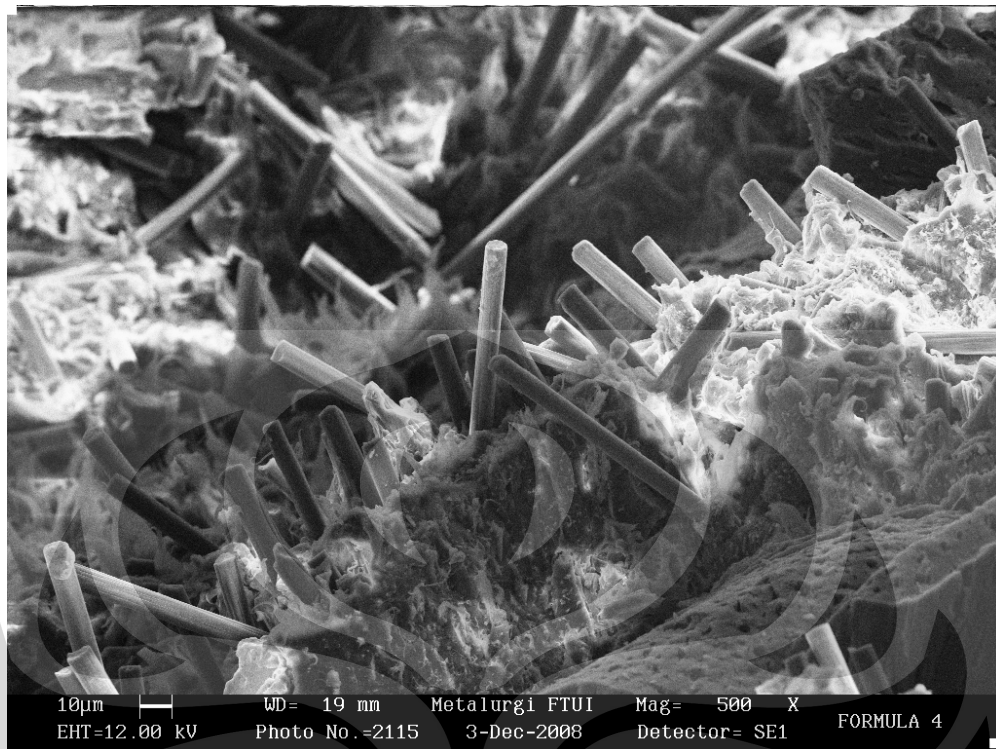
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 2 pada perbesaran 250X



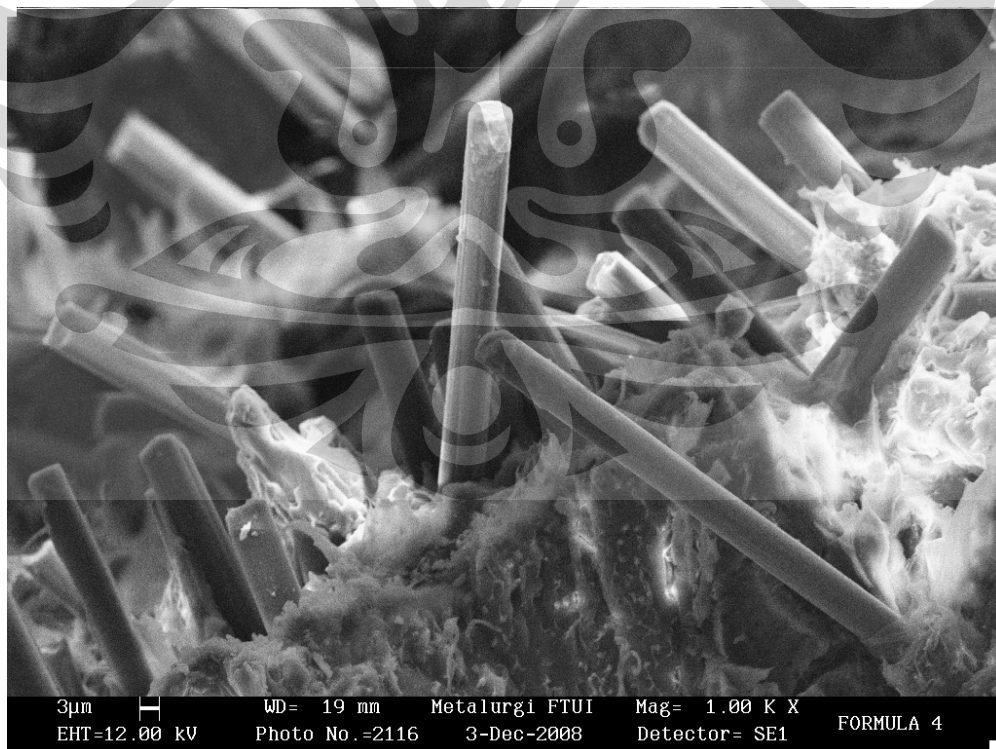
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 2 pada perbesaran 250X



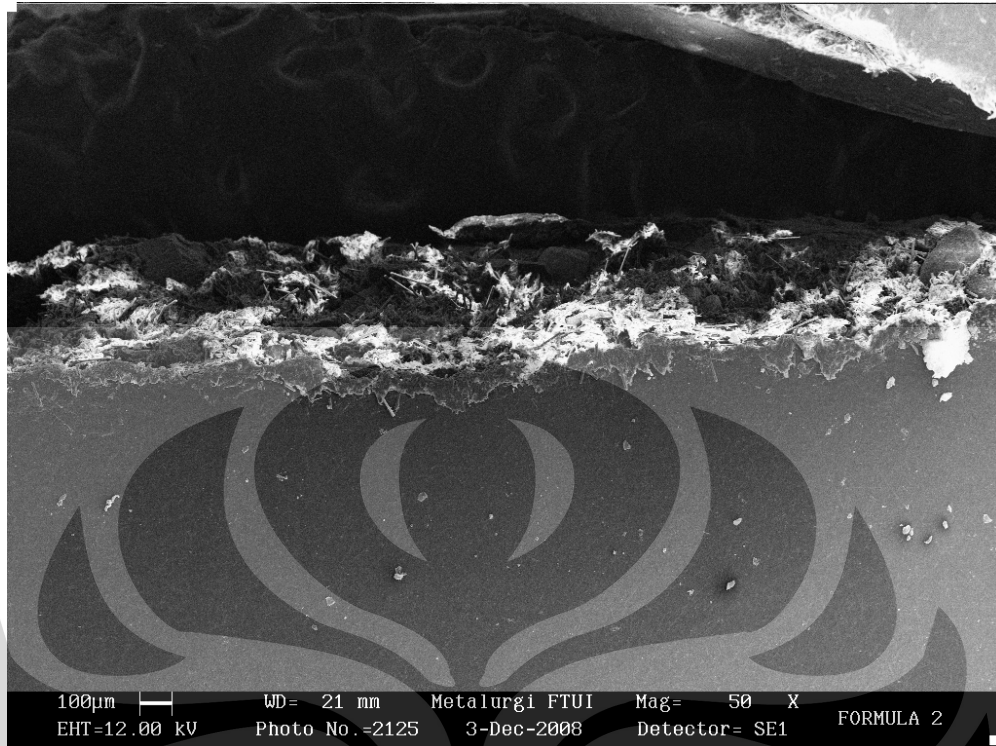
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 2 pada perbesaran 250X



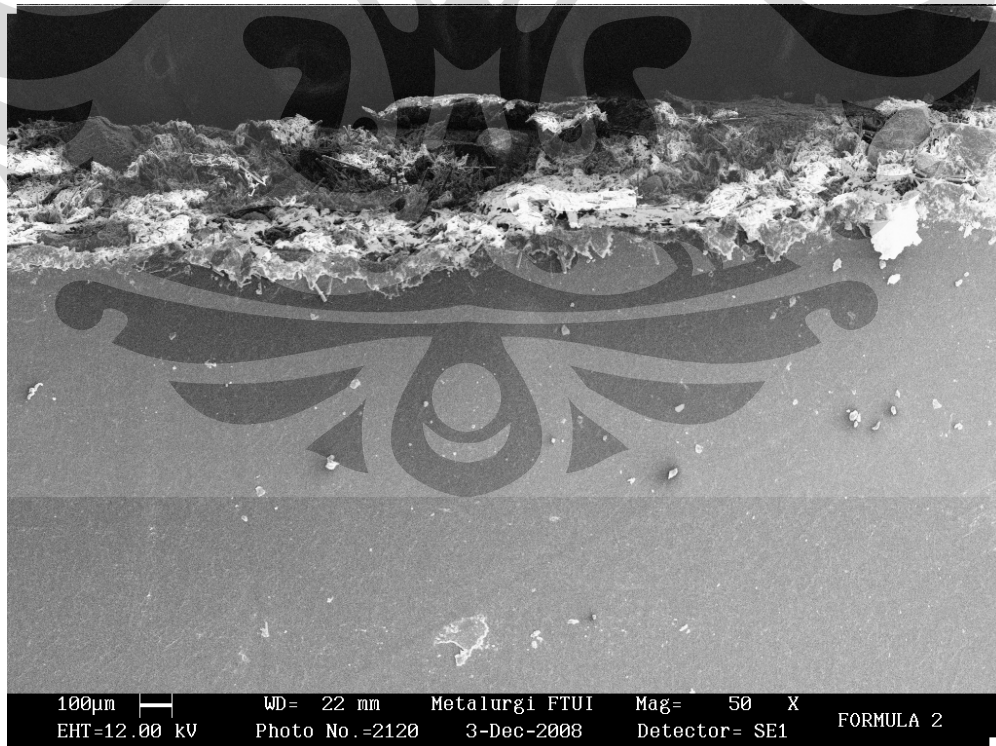
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 2 pada perbesaran 500X



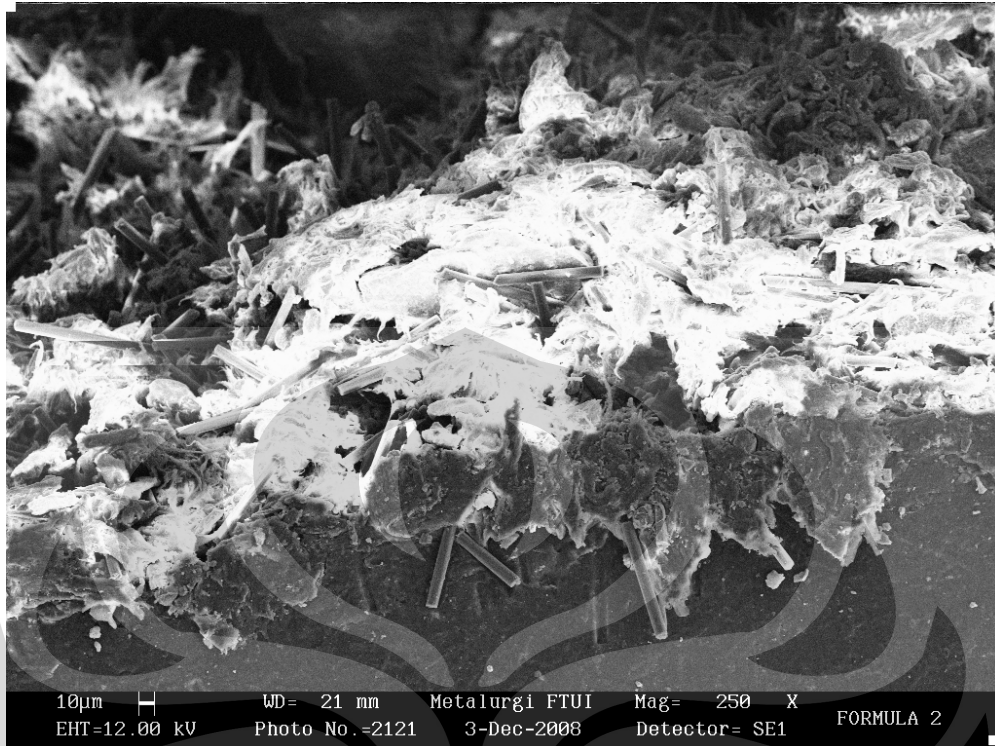
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 2 pada perbesaran 1000X



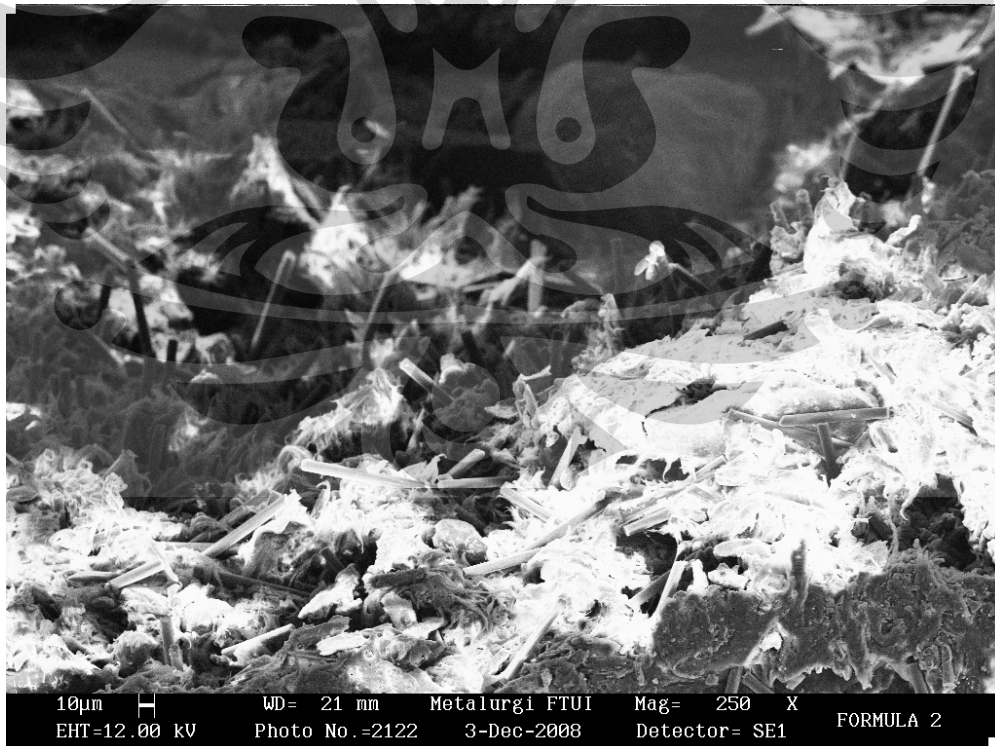
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 3 pada perbesaran 50X



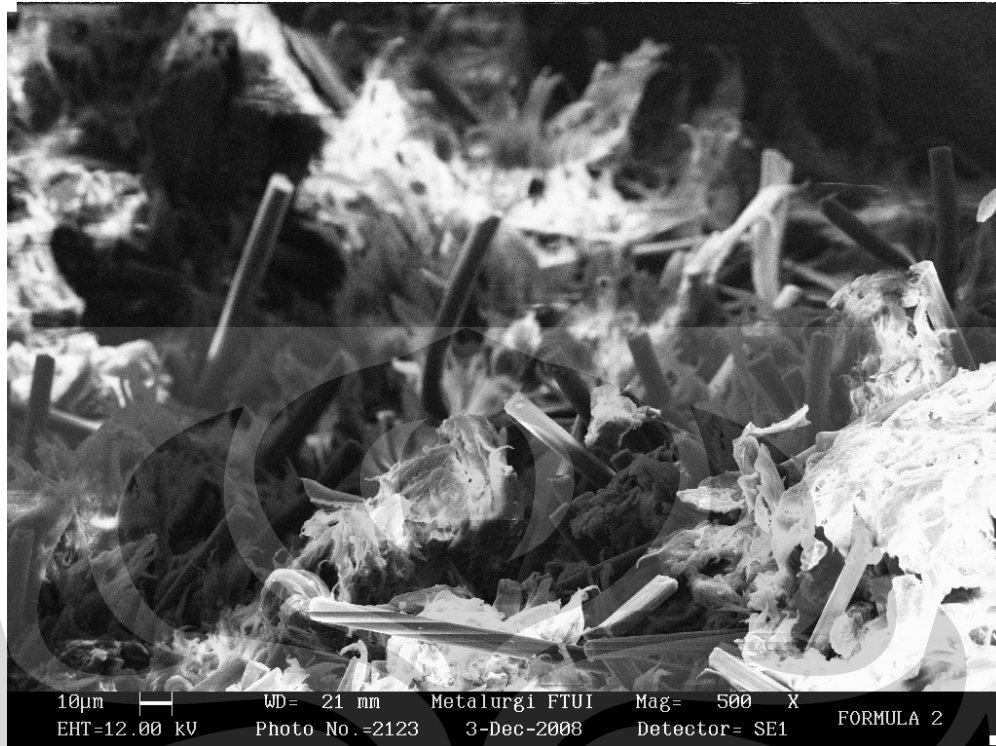
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 3 pada perbesaran 50X



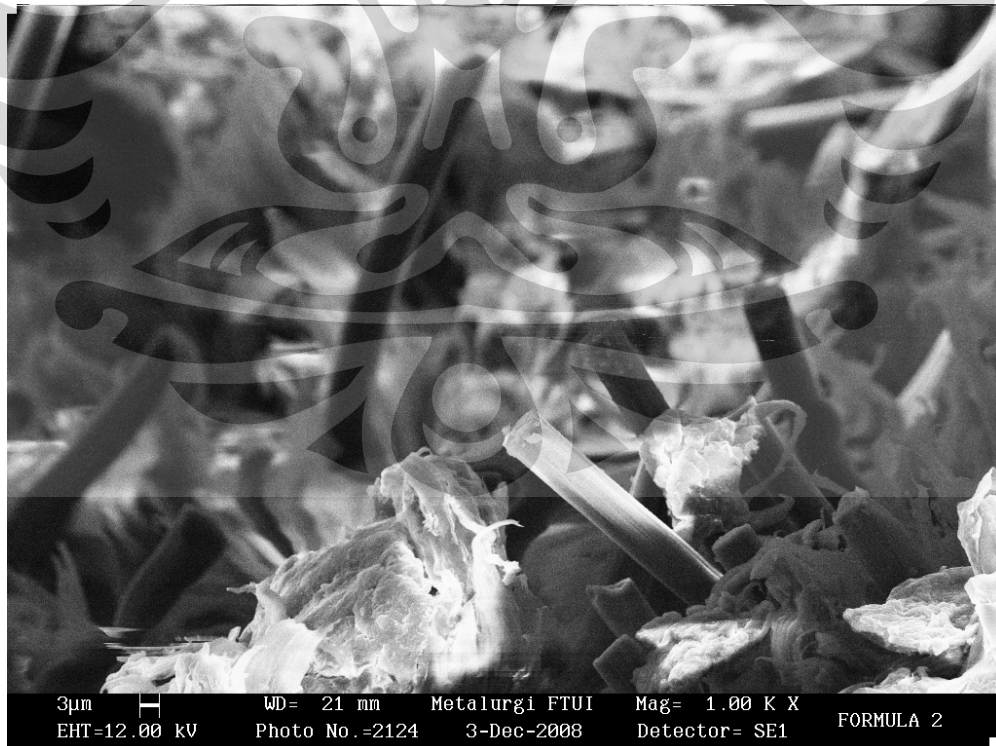
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 3 pada perbesaran 250X



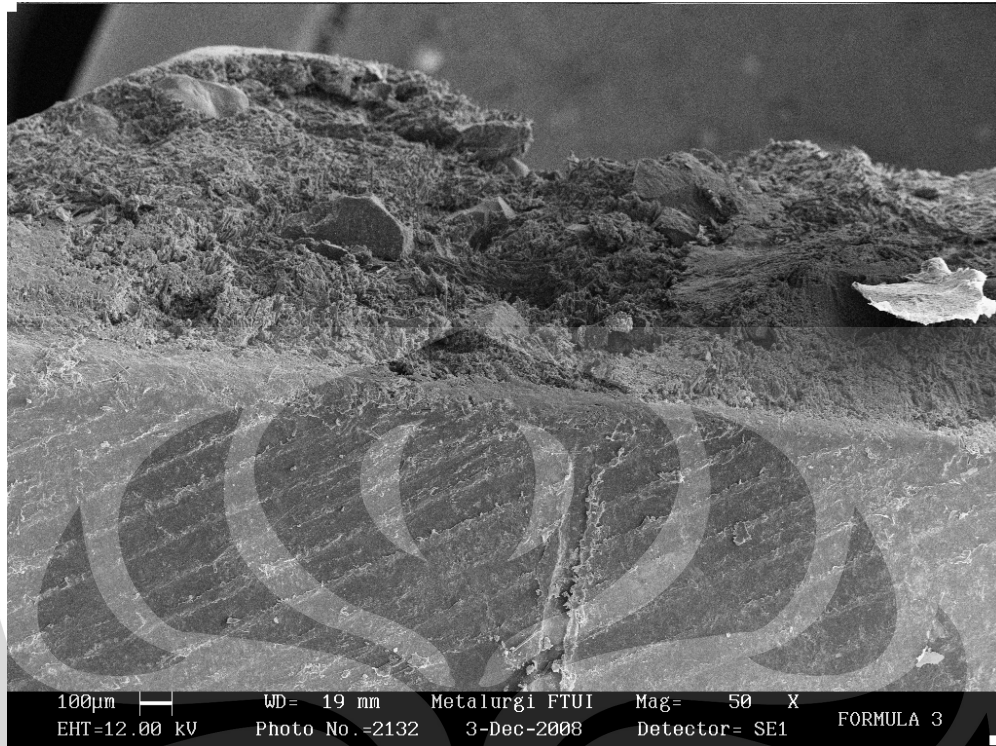
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 3 pada perbesaran 250X



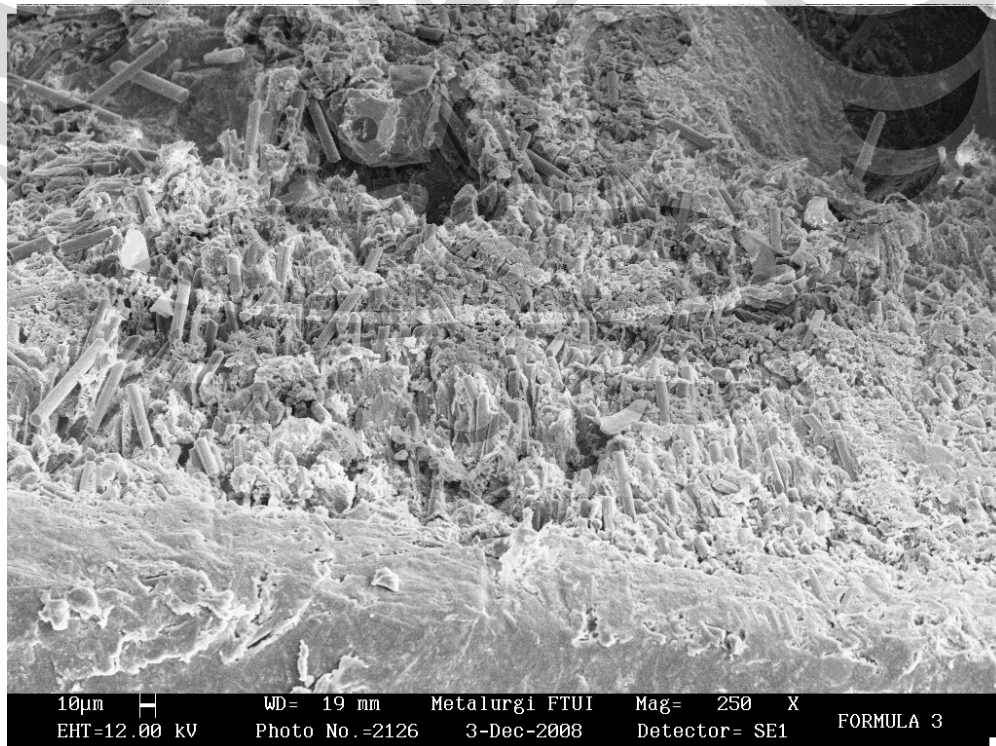
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 3 pada perbesaran 500X



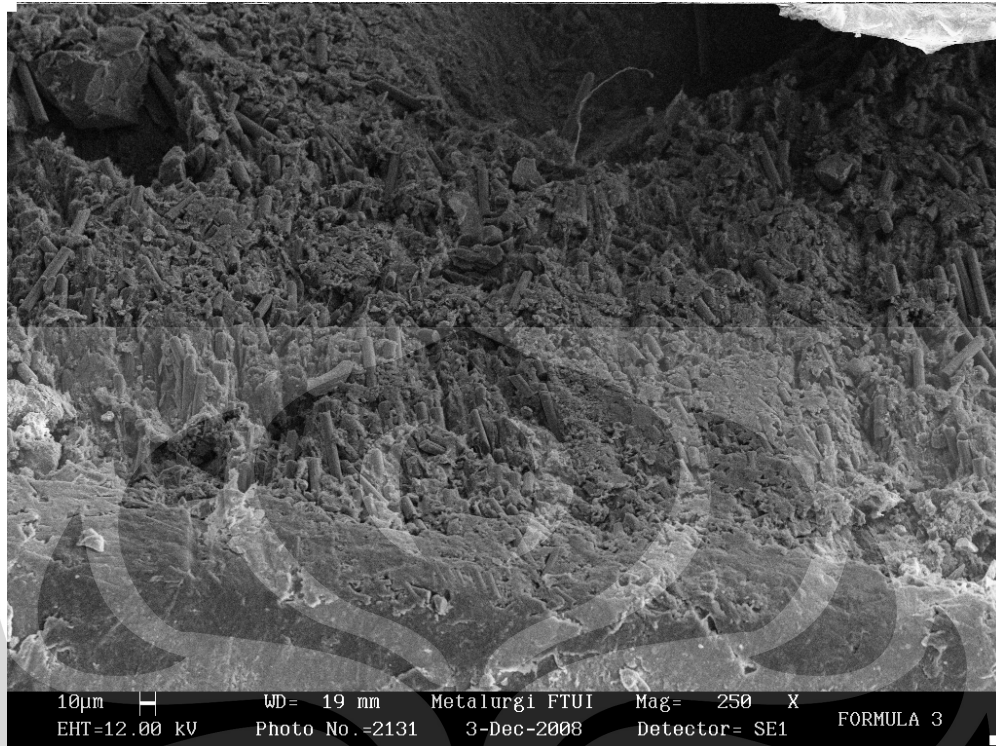
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 3 pada perbesaran 1000X



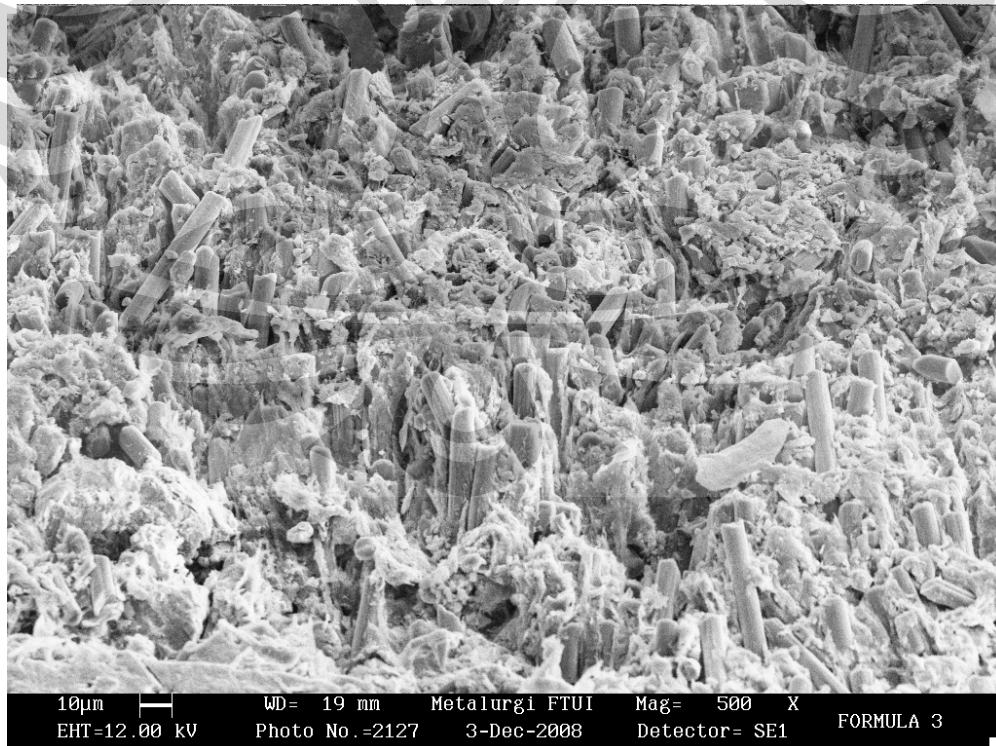
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 4 pada perbesaran 50X



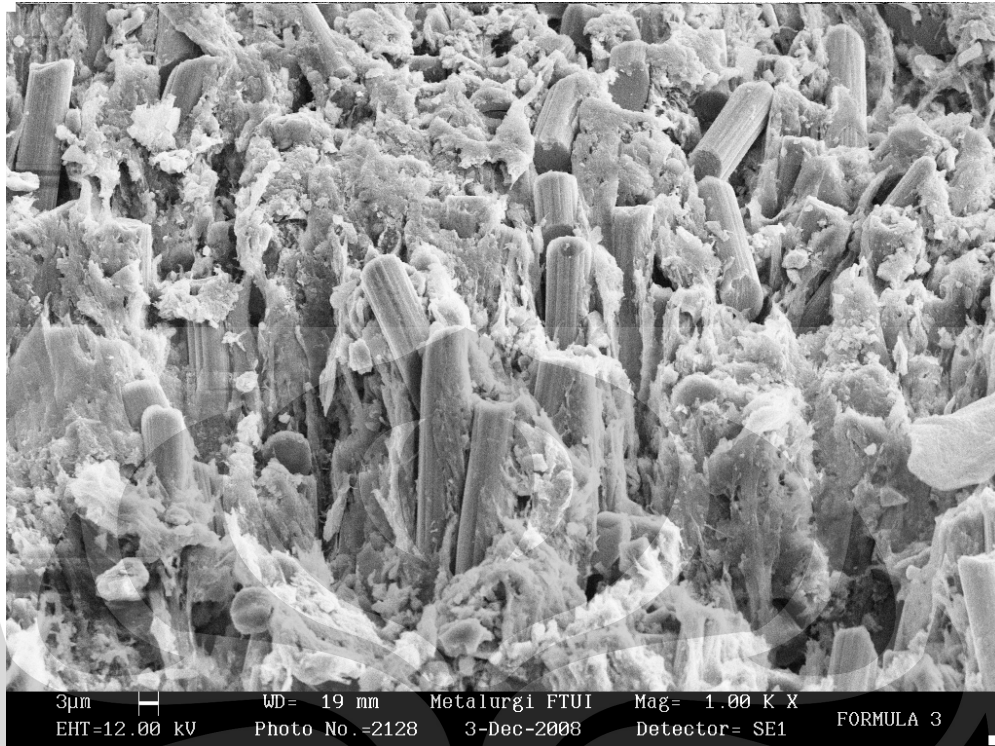
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 4 pada perbesaran 250X



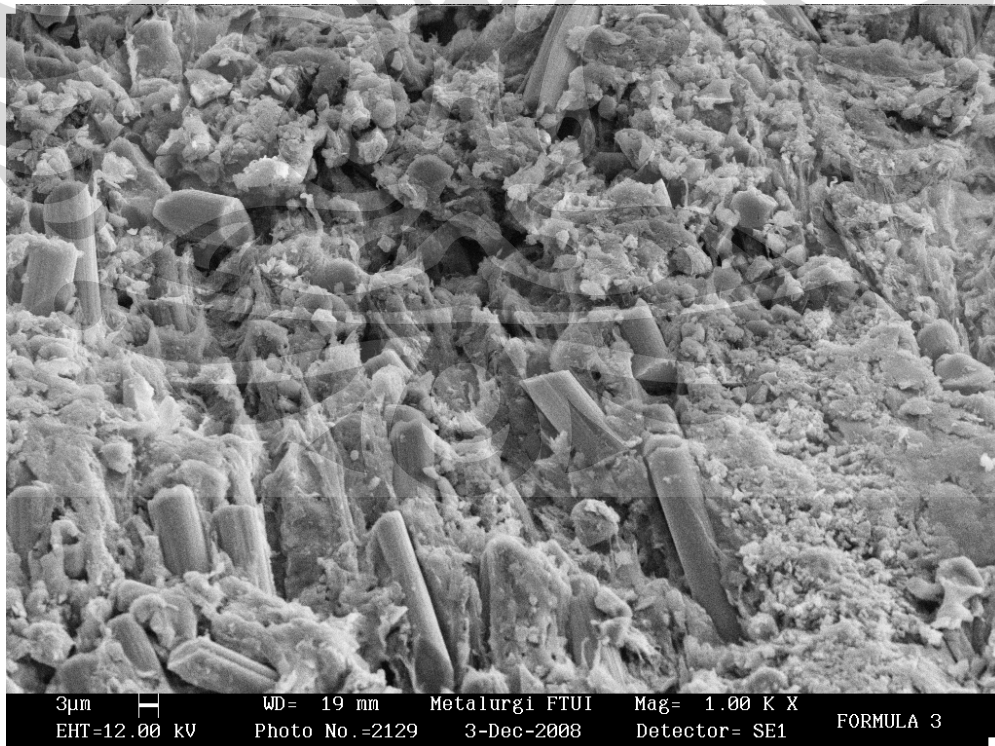
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 4 pada perbesaran 250X



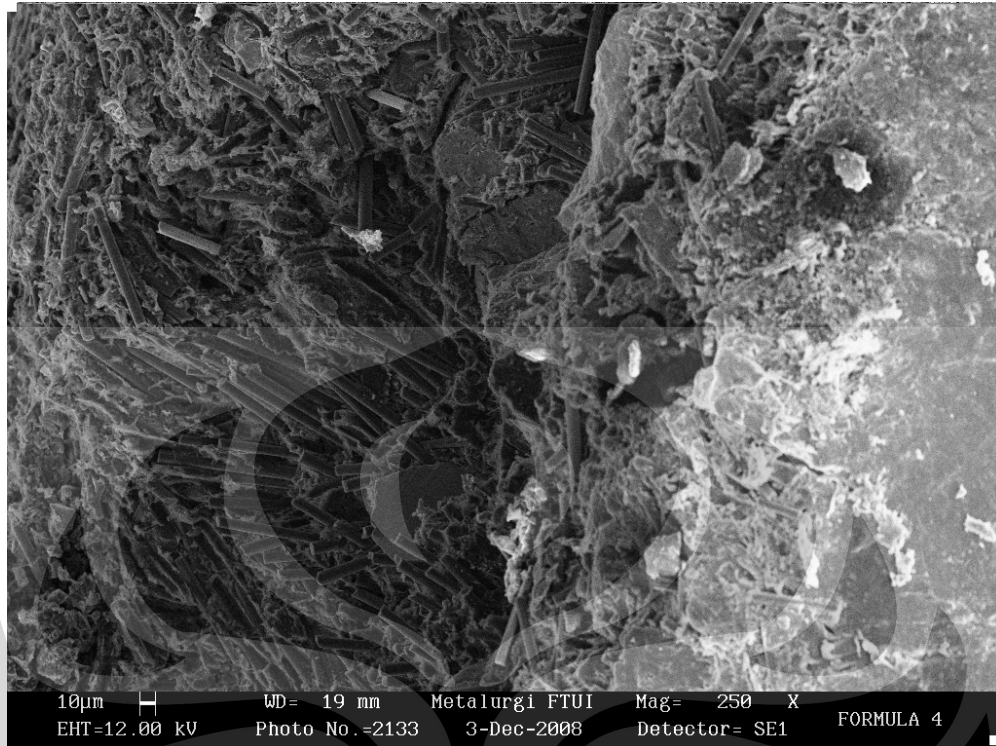
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 4 pada perbesaran 500X



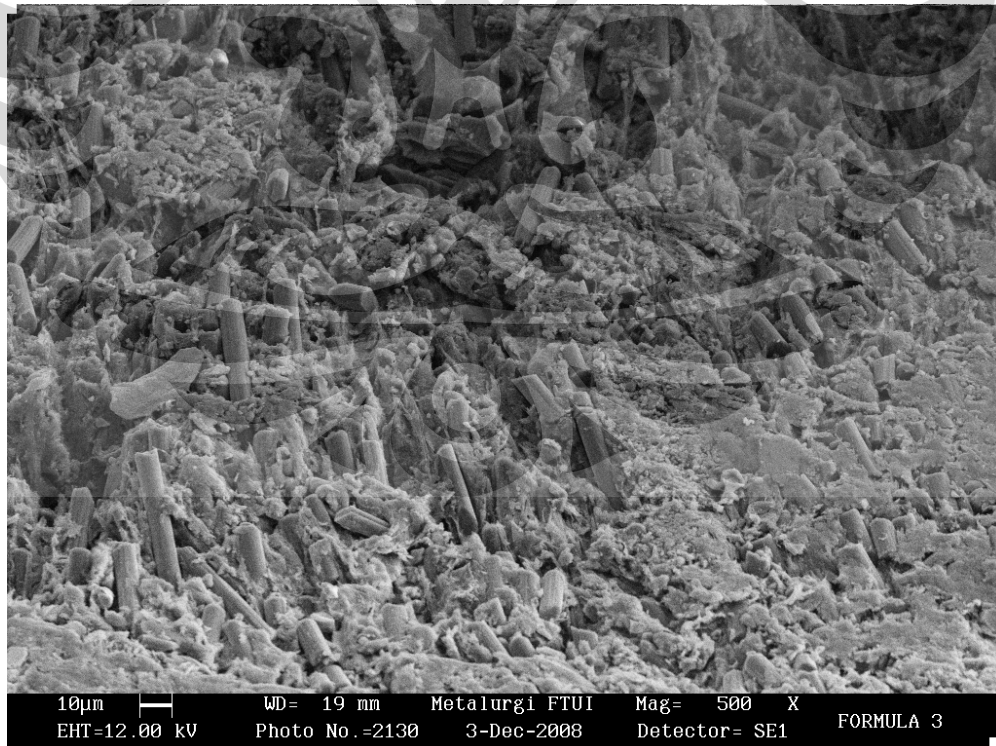
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 4 pada perbesaran 1000X



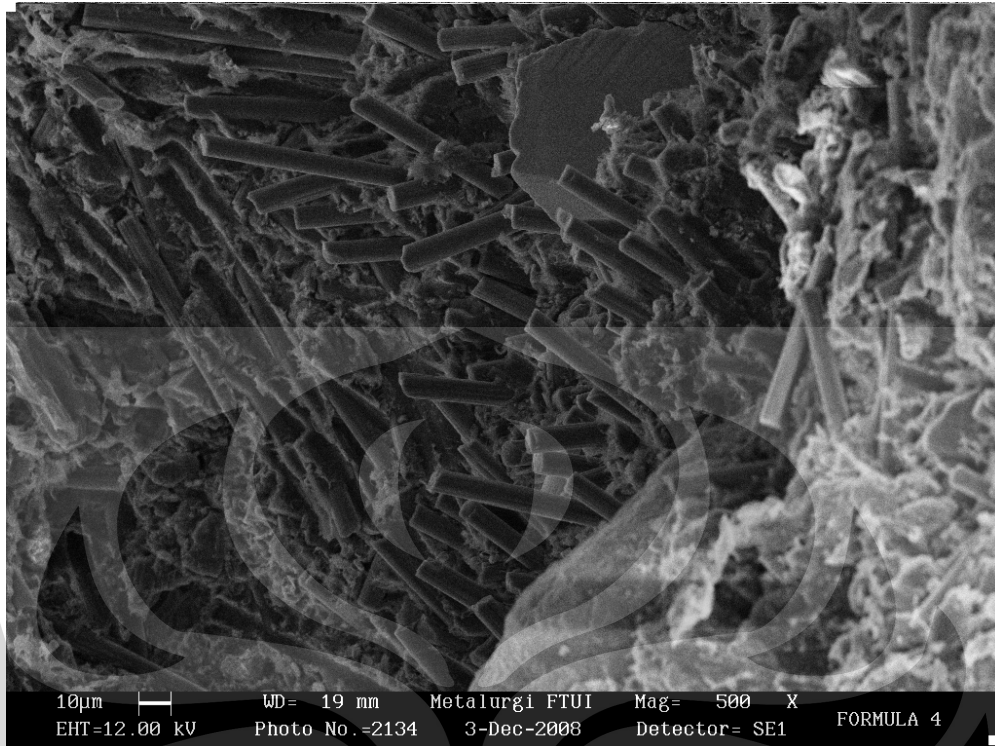
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 4 pada perbesaran 1000X



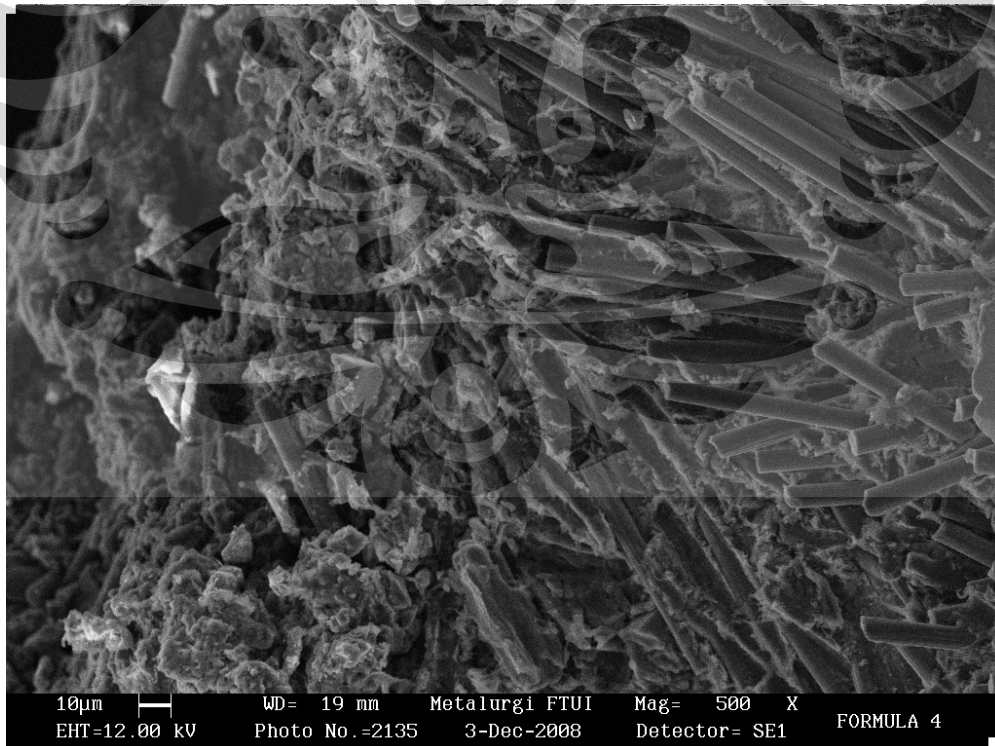
Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 5 pada perbesaran 250X



Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 5 pada perbesaran 500X



Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 5 pada perbesaran 500X



Gambar SEM permukaan patahan hasil uji tarik formula 5 pada perbesaran 500X