

**LAPORAN TUGAS AKHIR PENELITIAN
PEMBUATAN KOMPOSIT MIKROFIBRIL DARI
PENCAMPURAN POLIMER PET-HDPE DENGAN
COMPATIBILIZER PE-G-MA**



OLEH:

IMAM SUHANDI

1513050

**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA POLIMER
POLITEKNIK STMI JAKARTA
KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN R.I
2018**

**LAPORAN TUGAS AKHIR PENELITIAN
PEMBUATAN KOMPOSIT MIKROFIBRIL DARI
PENCAMPURAN POLIMER PET-HDPE DENGAN
COMPATIBILIZER PE-G-MA**

Diajukan sebagai salah satu syarat penyelesaian akademik
Program Studi Teknik Kimia Polimer pada Politeknik STMI Jakarta



OLEH:

IMAM SUHANDI

1513050

**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA POLIMER
POLITEKNIK STMI JAKARTA
KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN R.I
2018**

**LAPORAN TUGAS AKHIR PENELITIAN
PEMBUATAN KOMPOSIT MIKROFIBRIL DARI
PENCAMPURAN POLIMER PET-HDPE DENGAN
COMPATIBILIZER PE-G-MA**

Diajukan sebagai salah satu syarat penyelesaian akademik
Program Studi Teknik Kimia Polimer pada Politeknik STMI Jakarta



OLEH:

IMAM SUHANDI

1513050

**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA POLIMER
POLITEKNIK STMI JAKARTA
KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN R.I**

2018

POLITEKNIK STMI JAKARTA
KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN R.I

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

JUDUL PENELITIAN:

PEMBUATAN KOMPOSIT MIKROFIBRIL DARI PENCAMPURAN POLIMER
PET-HDPE DENGAN KOMPATIBILISER PE-G-MA

DISUSUN OLEH:

NAMA : IMAM SUHANDI

NIM : 1513050

PROGRAM STUDI : TEKNIK KIMIA POLIMER

Telah diperiksa dan disetujui sebagai salah satu syarat penyelesaian akademik
Program Studi Teknik Kimia Polimer pada Politeknik STMI Jakarta.

Jakarta, November 2017

Menyetujui,

Ketua Program Studi
Teknik Kimia Polimer

Dosen Pembimbing

Ir. Roosmariharso, MBA
NIP. 19540523 198003 1 004

Dr. Erfina Oktariani, ST., MT.
NIP. 19821001 201402 2 001

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING PENELITIAN

JUDUL PENELITIAN:

PEMBUATAN KOMPOSIT MIKROFIBRIL DARI PENCAMPURAN POLIMER
PET-HDPE DENGAN KOMPATIBILISER PE-G-MA

DISUSUN OLEH:

NAMA : IMAM SUHANDI

NIM : 1513050

PROGRAM STUDI : TEKNIK KIMIA POLIMER

Jakarta, Juli 2017

Telah diperiksa dan disetujui oleh:
Pembimbing

Heru Santoso, M.Si
NIP. 680003744

POLITEKNIK STMI JAKARTA
KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN R.I

LEMBAR PENGESAHAN TIM PENGUJI SIDANG

JUDUL PENELITIAN:

PEMBUATAN KOMPOSIT MIKROFIBRIL DARI CAMPURAN POLIMER PET-HDPE
DENGAN MENGGUNAKAN *COMPATIBILIZER* PE-G-MA.

DISUSUN OLEH :
NAMA : IMAM SUHANDI
NIM : 1513050
PROGRAM STUDI : TEKNIK KIMIA POLIMER

Telah diuji oleh Tim Penguji Sidang Tugas Akhir Penelitian Program Studi Teknik Kimia Polimer pada Politeknik STMI Jakarta pada hari Senin 4 Juni 2018.

Jakarta, Juni 2018

Penguji

Penguji

Syaiful Ahsan, S.T., M.T
NIP. 198407162014021001

Ir. Parulian Leonard M., MM..
NIP. 195702141985031002

Penguji

Penguji

Dr. Erfina Oktariani, S.T., M.T.
NIP.1982100120140022001

Ir. Rochmi Widjayanti, M. Eng.
NIP.195609101984032002

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN PENELITIAN

Kami Mahasiswa Program Studi Teknik Kimia Polimer, Politeknik STMI Jakarta, Kementerian Perindustrian Republik Indonesia:

Nama : Imam Suhandi
NIM : 1513050
Program Studi : Teknik Kimia Polimer

Dengan ini menyatakan bahwa hasil karya Tugas Akhir Penelitian yang kami buat dengan judul:

PEMBUATAN KOMPOSIT MIKROFIBRIL DARI PENCAMPURAN PET-HDPE DENGAN *COMPATIBILIZER* PE-G-MA

- Dibuat dan diselesaikan sendiri dengan menggunakan literatur hasil kuliah, survei lapangan, bimbingan dengan dosen pembimbing dan pembimbing penelitian, melalui tanya-jawab maupun asistensi serta buku-buku jurnal acuan yang tertera dalam referensi pada karya tulis Tugas Akhir Penelitian ini.
- Bukan merupakan duplikasi yang sudah dipublikasikan atau yang pernah dipakai untuk mendapatkan gelar sarjana di Universitas/Perguruan Tinggi lain, kecuali pada bagian-bagian tertentu digunakan referensi pendukung untuk melengkapi informasi dengan mencantumkan referensi yang semestinya.
- Bukan merupakan karya tulis terjemahan dari kumpulan buku atau jurnal acuan yang tertera dalam referensi pada karya tulis Tugas Akhir Penelitian kami.

Jika terbukti kami tidak memenuhi apa yang telah kami nyatakan seperti apa yang diatas, maka karya tulis Tugas Akhir Penelitian ini dibatalkan.

Jakarta, Juni 2018

Yang Membuat Pernyataan

Imam Suhandi

LEMBAR BIMBINGAN PENYUSUNAN TUGAS AKHIR PENELITIAN

Nama : Imam Suhandi
NIM : 1513050
Judul TA Penelitian : Pembuatan Komposit Mikrofibril dari Pencampuran Polimer
PET-HDPE dengan Kompatibiliser PE-g-MA
Pembimbing : Dr. Erfina Oktariani, ST., MT.

Tanggal	BAB	Keterangan	Paraf

Mengetahui,
Kepala Program Studi
Teknik Kimia Polimer

Pembimbing,

Ir. Roosmariharso, MBA
NIP. 19540523 198003 1 004

Dr. Erfina Oktariani, ST., MT.
NIP. 19821001 201402 2 001

ABSTRAK

Pencampuran polimer merupakan salah satu perkembangan metode yang cukup efektif untuk merekayasa material polimer. Dalam penelitian ini akan dilakukan pembuatan komposit mikrofibril dengan proses pencampuran polimer *polyethylene terephthalate* (PET) dengan *high density polyethylene* (HDPE) dengan kompatibiliser *polyethylene graft maleic anhydride* (PE-g-MA). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan penarikan dan temperatur terhadap sifat mekanik kekuatan tarik dan kekuatan impak serta untuk mengetahui pengaruh penambahan *compatibilizer* pada pencampuran polimer tersebut. Proses pencampuran ini menggunakan proses ekstrusi dengan ekstruder tipe *twin screw* dengan mengatur parameter temperatur zona 170°C; 240°C; 265°C; 280°C pada kecepatan putaran 40 rpm. Kondisi operasi diamati pada temperatur air pada proses *cool drawing* 75°C; 80°C; 85°C, kecepatan penarikan 2;3;4;5 kali lebih cepat dari kecepatan awal. Pada penelitian ini didapatkan nilai tertinggi pada kondisi temperatur 85°C dan kecepatan dua kali lebih cepat dari kecepatan awal dengan nilai kuat tarik sebesar 24,13 MPa. Penambahan kompatibiliser PE-g-MA memiliki pengaruh dalam sistem campuran PET-HDPE yaitu dapat meningkatkan sifat mekanik. Pada saat sebelum ditambahkan kompatibiliser PE-g-MA, kedua sifat mekanik antara kekuatan tarik dan kekuatan impak itu berbanding terbalik. Sedangkan setelah ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA kedua sifat mekanik berbanding lurus.

Kata Kunci: pencampuran polimer, PET-HDPE, *compatibilizer* PE-g-MA, *twin-screw extruder*, komposit mikrofibril.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin puji dan syukur yang tiada hentinya penyusun panjatkan kehadiran Allah SWT Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang atas segala berkat, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penyusun dapat menyelesaikan Laporan Penelitian kami yang berjudul "*Pembuatan Komposit Mikrofibril dari Campuran Polimer PET-HDPE dengan Menggunakan Compatibilizer PE-g-MA*" di Sentra Teknologi Polimer ini dapat terselesaikan dengan tepat pada waktunya. Penyusunan laporan ini bertujuan guna memenuhi salah satu persyaratan kelulusan dari jurusan Teknik Kimia Polimer Politeknik STMI Kementerian Perindustrian, Jakarta.

Pada kesempatan ini, kami ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya atas bimbingan, bantuan, dukungan, dan dorongan semangat yang diberikan hingga terselesaikannya laporan penelitian ini. Dengan selesainya laporan ini, penyusun mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. kedua orang tua penulis yang telah memberikan dukungan secara moril maupun materil,
2. Dr. Mustofa, ST, MT selaku Direktur Politeknik STMI Jakarta Kementerian Perindustrian RI,
3. Ir. Roosmariharso, MBA selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia Polimer Politeknik STMI Jakarta,
4. Dr. Erfina Oktariani, ST, MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan laporan ini,
5. Heru Santoso, M.Si selaku pembimbing penelitian di Sentra Teknologi Polimer yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama melakukan penelitian,
6. seluruh karyawan serta staf Sentra Teknologi Polimer yang turut memberikan bimbingan dan bantuan selama pelaksanaan penelitian,

7. seluruh teman-teman angkatan 2013 dan pihak yang membantu hingga selesainya laporan penelitian ini.

Penyusun menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu kami mengharapkan saran dan kritik yang membangun agar lebih baik lagi untuk kedepannya. Akhir kata, penyusun mengharapkan agar laporan penelitian yang telah dibuat ini dapat bermanfaat.

Jakarta, Mei 2018

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING	
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING PENELITIAN	
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN PENELITIAN	
LEMBAR BIMBINGAN PENYUSUNAN LAPORAN TA PENELITIAN	
HALAMAN SURAT PENGAJUAN TUGAS AKHIR PENELITIAN	
KATA PENGANTAR.....	i
ABSTRAK	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL	viii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 <i>High Density Polyethylene (HDPE)</i>	6
2.2 <i>Polyethylene Terephthalate (PET)</i>	7
2.3 Kompatibiliser PE-g-MA	8
2.4 Komposit	10
2.5 Komponen Penyusun Komposit	12
2.6 Klasifikasi Material Komposit	16
2.7 Komposit Mikrofibril	20
2.8 Pembuatan Komposit Mikrofibril.....	22

2.9 Ekstrusi	24
2.10 Karakterisasi Komposit	26
BAB III METODE PENELITIAN.....	32
3.1 Jadwal Penelitian	32
3.2 Alat dan Bahan	32
3.3 Variabel	32
3.4 Prosedur Penelitian	33
3.5 Tahap Pengujian atau Karakterisasi	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 Pengujian Kekuatan Tarik	39
4.2 Pengujian Kekuatan Impak.....	44
4.3 Pengaruh Penambahan Kompatibiliser PE-g-MA.....	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	51
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran	51
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN-LAMPIRAN	
LAMPIRAN A	
LAMPIRAN B	
LAMPIRAN C	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur Molekul Polietilena	6
Gambar 2.2	Struktur Molekul Polyethylene Terephthalate (PET).....	7
Gambar 2.3	Struktur Molekul PE-g-MA.....	8
Gambar 2.4	Skema Rantai Penghubung pada Antarmuka	10
Gambar 2.5	Perbedaan Struktur Termoplastik dan Termoset	15
Gambar 2.6	Klasifikasi Komposit	17
Gambar 2.7	Mikrostruktur Lamina	18
Gambar 2.8	Metode Pembuatan Komposit Mikrofibril (MFC)	23
Gambar 2.9	Skema Mekanisme Pembentukan Mikrofibril.....	23
Gambar 2.10	Ekstruder Ulir Tunggal (<i>Single Screw Extruder</i>)	25
Gambar 2.11	Ekstruder Ulir Ganda (<i>Twin Screw Extruder</i>)	26
Gambar 2.12	Kurva Hubungan Tegangan dan Regangan.....	27
Gambar 2.13	Bentuk Spesimen Pengujian Kekuatan Tarik	28
Gambar 3.1	Rancangan Penelitian	34
Gambar 3.2	Tahapan Penelitian Komposit Mikrofibril PET-HDPE.....	35
Gambar 3.3	Tahapan Penelitian Komposit Mikrofibril PET-HDPE-PE-g-MA	36
Gambar 4.1	Foto SEM Sampel Komposit Mikrofibril PET-HDPE pada Spesimen Uji <i>Dogbone</i> dengan Perbesaran 2000 kali.....	40
Gambar 4.2	Grafik Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Tarik Komposit PET-HDPE	41
Gambar 4.3	Foto SEM Sampel Komposit Mikrofibril PET-HDPE pada Spesimen Uji <i>Dogbone</i> dengan Perbesaran 2000 kali:(a)Sampel 9 PET-HDPE, (b)Sampel 3 PET-HDPE.....	42
Gambar 4.4	Grafik Pengaruh Kecepatan Akhir Penarikan terhadap Kekuatan Komposit PET-HDPE	43
Gambar 4.5	Grafik Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Impak	

	Komposit PET-HDPE	45
Gambar 4.6	Grafik Pengaruh Kecepatan Akhir Penarikan terhadap Kekuatan Impak Komposit PET-HDPE	46
Gambar 4.7	Grafik Pengaruh Penambahan Kompatibiliser PE-g-MA terhadap Kekuatan Tarik Komposit Mikrofibril	47
Gambar 4.8	Foto SEM Sampel Komposit Mikrofibril PET-HDPE pada Spesimen Uji <i>Dogbone</i> dengan Perbesaran 500 kali: (a)Sampel PET-HDPE non-PE-g-MA, (b)Sampel PET-HDPE dengan PE-g-MA	48
Gambar 4.9	Grafik Pengaruh Penambahan Kompatibiliser PE-g-MA terhadap Kekuatan Impak Komposit Mikrofibril	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik HDPE.....	7
Tabel 2.2	Karakteristik PET	8
Tabel 2.3	Sifat dan Kegunaan Polimer	15
Tabel 3.1	Matriks Penelitian PET-HDPE.....	33
Tabel 3.2	Matriks Penelitian PET-HDPE-PE-g-MA.....	33
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Kekuatan Tarik.....	39
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Kekuatan Impak	44
Tabel 4.3	Pengaruh Penambahan PE-g-MA pada Komposit PET-HDPE ...	47

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dengan berkembangnya kemampuan rekayasa material, *polymer blend* menjadi salah satu metode untuk merekayasa material polimer yang cukup penting karena aplikasinya yang cukup luas. Pencampuran polimer (*polymer blend*) memainkan peranan yang penting dalam industri polimer, tidak hanya untuk pengembangan material baru tetapi juga untuk tujuan daur ulang [1].

Pencampuran polimer *immiscible* biasanya memiliki sifat mekanik yang rendah karena daya adhesi antar muka yang lemah antara konstituen mereka. Kurangnya daya adhesi antara campuran konstituen ini umumnya dianggap sebagai kelemahan. Disisi lain kompatibilitas campuran polimer *immiscible* dapat ditingkatkan dengan menambahkan komponen ketiga yaitu *compatibilizer* atau dengan menambahkan polimer fungsional tertentu yang mampu meningkatkan interaksi spesifik dan reaksi kimia dalam sistem *blending* [2].

Polyethylene terephthalate (PET) dan *high density polyethylene* (HDPE) plastik yang berharga murah ini paling sering digunakan di bidang industri dan sering digunakan dalam kemasan dan produk sehari-hari. PET menjadi salah satu termoplastik komoditi yang penting karena fleksibilitas aplikasi dan volume produksinya [3]. Sebagai material termoplastik, PET mudah untuk diproses dengan cara proses ekstrusi, injeksi molding, *blow molding*, dan *thermoforming*. Pada dasawarsa terakhir ini, PET telah banyak digunakan dalam berbagai macam aplikasi karena material ini mempunyai ketahanan aus yang tinggi, ketahanan panas yang unggul, ketahanan lelah (*fatigue*), ketahanan kimia dan kemampuan dapat didaur ulang. Namun, PET memiliki kekuatan impak yang rendah, menyerap air dan

kecepatan kristalisasi yang rendah sehingga membatasi dalam penggunaan aplikasi tertentu [4].

Sedangkan material HDPE termasuk jenis termoplastik semikristalin yang secara luas digunakan dalam serat dan pengemas karena sifatnya yang baik sebagai *barrier properties*, pemrosesan yang mudah, harga yang murah, berat yang ringan dan mempunyai kekuatan impak yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan PET [5].

Compatibilizer ini memiliki fungsi sebagai pengikat antara matrik dan penguat pada sistem komposit. *Compatibilizer* sendiri hanya digunakan untuk mengikat dua atau lebih material yang secara alamiah tidak bisa atau sulit untuk bercampur, sebagai contoh plastik dengan material alam seperti kayu, logam dan keramik. PET dan HDPE tidak kompatibel dan pencampuran polimer-polimer tersebut akan menghasilkan fase besar dengan ikatan antar muka yang lemah dan sifat mekanik yang rendah. PET dan HDPE yang diketahui sepenuhnya tidak bercampur (*immiscible*) dan membutuhkan modifikasi antar muka (*interfacial*) untuk mendapatkan campuran yang baik dan untuk meningkatkan daya adhesi *solid-state* [6].

Pencampuran PET dan HDPE telah menarik kegiatan penelitian yang cukup besar karena kedua bahan tersebut merupakan termoplastik yang paling sering digunakan, terutama digunakan sebagai bahan pengemas plastik. PET dapat meningkatkan kekakuan (*stiffness*) HDPE pada temperatur yang lebih tinggi [7]. Penelitian terbaru yang berkaitan dengan campuran polimer PET/HDPE telah banyak dilakukan oleh para peneliti. Pencampuran PET/HDPE yang menggunakan PET/HDPE dengan menggunakan *compatibilizer polyethylene graft maleic anhydride* (PE-g-MA) sudah pernah dilakukan dengan komposisi (%) berat PET/HDPE 25/75 dengan komposisi (%) berat PE-g-MA 2, 5, 7, 10%. Hasil yang didapat oleh Kasama Jarukumjorn dkk. (2006) kekuatan tarik pada variasi PE-g-MA 2, 5, 7 dan 10% mencapai 19,65 Mpa; 21,50 Mpa; 24,05 MPa dan 24,35 MPa.

Dengan ini adanya peningkatan pada sifat mekanik setelah campuran PET/HDPE ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA [8].

Perbedaan penggunaan jenis bahan *compatibilizer* juga bisa mempengaruhi sifat mekanik campuran HDPE dan PET. Perbandingan *compatibilizer* antara *ethylene glycidyl metachrylate* (EGMA) dengan PE-g-MA. Menurut Ljerka Kratofil dkk. (2014), bahwa penggunaan PE-g-MA lebih baik daripada menggunakan *compatibilizer* EGMA dilihat dari sifat mekaniknya. Dengan kekuatan tarik campuran menggunakan PE-g-MA mencapai 21,32 sampai 28,72 MPa. Sedangkan, kekuatan tarik campuran menggunakan EGMA mencapai 16,27 sampai 21,45 MPa [9].

Pencampuran HDPE dan PET ini berpengaruh juga pada komposisi (%) berat PET dan HDPE. Variasi (%) berat PET/HDPE diantaranya, 5/95, 10/90, 15/85, dan 20/80. Menurut M.B. Yang dkk. (2014) bahwa penggunaan komposisi (%) berat PET/HDPE 15/85 memiliki sifat mekanik yang lebih tinggi dibanding komposisi lainnya. Pengamatan morfologi PET pada 15% wt ini hampir berubah menjadi serat mikro sehingga kekuatan mekaniknya lebih tinggi dibandingkan komposisi lainnya yaitu mencapai 32 MPa [10].

Penelitian ini memodifikasi dari variabel temperatur pada proses penarikan dan kecepatan penarikan. Atas dasar ini, penulis melakukan penelitian ini dengan mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh M.B. Yang, Ljerka Kratofil dan Karingamanna Jayanarayanan. Harapan dari penelitian ini, hasil dari pencampuran PET/HDPE/PE-g-MA dapat menjadi produk yang memiliki sifat mekanik yang baik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, permasalahan yang akan diangkat pada penelitian ini, yaitu:

1. bagaimana menghasilkan komposit mikrofibril dengan proses pencampuran polimer HDPE dan PET dengan menggunakan *compatibilizer* PE-g-MA?

2. bagaimana pengaruh temperatur dan perbandingan kecepatan awal dan akhir penarikan terhadap kekuatan tarik dan impak dari komposit yang dihasilkan?
3. bagaimana pengaruh penambahan *compatibilizer* PE-g-MA terhadap kekuatan tarik dan impak dari komposit?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini, yaitu:

1. untuk menghasilkan komposit mikrofibril dengan proses pencampuran polimer HDPE dan PET dengan menggunakan *compatibilizer* PE-g-MA
2. untuk mengetahui pengaruh temperatur dan perbandingan kecepatan awal dan akhir penarikan terhadap kekuatan tarik dan impak dari komposit mikrofibril yang dihasilkan.
3. untuk mengetahui pengaruh penambahan *compatibilizer* PE-g-MA terhadap kekuatan tarik dan impak dari komposit mikrofibril.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pengaruh temperatur, perbandingan kecepatan awal dan akhir penarikan, dan penambahan *compatibilizer* PE-g-MA terhadap kekuatan tarik dan impak dari komposit polimer.

1.5 Sistematika Penelitian

Bagian ini merupakan gambaran secara keseluruhan. Di dalamnya terdapat lima bab yang saling berkaitan erat. Adapun susunan kelima bab tersebut diuraikan di bawah.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi penjelasan mengenai latar belakang diadakannya penelitian, rumusan masalah yang akan dibahas, batasan masalah dari penelitian yang akan

dilakukan, tujuan dan manfaat dari dilakukannya penelitian, serta penjelasan mengenai sistematika penulisan laporan penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Memuat dasar teori mengenai polimer HDPE, polimer PET, *compatibilizer* PE-g-MA, komposit, komponen penyusun komposit, klasifikasi material komposit, komposit mikrofibril, pembuatan komposit mikrofibril, ekstruder dan karakterisasi komposit.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi penjelasan tentang waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan selama penelitian, variabel penelitian, prosedur eksperimen meliputi metode eksperimen dan langkah-langkah eksperimen.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memuat data hasil pengujian, pengolahan ataupun analisis data yang dapat berbentuk tabel serta memuat pembahasan mengenai jawaban atas rumusan masalah pada BAB I yaitu interpretasi atau penafsiran terhadap hasil pengujian atau analisis data.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran, kesimpulan memuat pernyataan singkat dan tepat yang dijabarkan dari hasil penelitian dan pembahasan untuk membuktikan hipotesis atau menjawab permasalahan. Saran dibuat berdasarkan pengalaman dan pertimbangan penulis yang ditujukan kepada para peneliti dalam bidang sejenis yang ingin melanjutkan, mengembangkan atau menerapkan penelitian yang sudah dihasilkan.

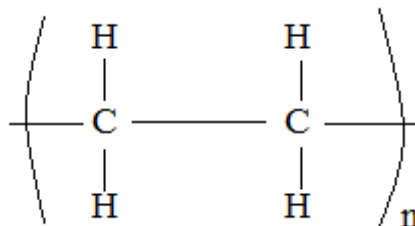
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *High Density Polyethylene (HDPE)*

Bahan komposit terdiri dari matriks dan *filler* (pengisi). Matriks dapat diartikan sebagai material yang mengikat antara serat atau partikel tetapi tidak terjadi reaksi kimia dengan bahan pengisi. Secara umum, matriks berfungsi sebagai pengikat bahan pengisi, sebagai penahan dan pelindung serat dari efek lingkungan dari kerusakan baik kerusakan secara mekanik maupun kerusakan akibat reaksi kimia, serta untuk memindahkan beban dari luar ke bahan pengisi [11].

Dalam penelitian ini, matriks yang digunakan adalah HDPE. Plastik HDPE termasuk dalam kategori termoplastik, karena memiliki ikatan antar molekul yang lurus, sehingga dapat mengalami pelunakan atau perubahan bentuk, dengan kata lain dapat meleleh jika terkena pada temperatur yang tinggi. HDPE terbentuk dari gabungan molekul-molekul kecil atau monomer yang akan membentuk makromolekul yang disebut juga polimer. Proses pembentukan polimer biasa disebut polimerisasi, dengan memisahkan ikatan dalam suatu molekul yang melibatkan energi panas dan katalisator agar molekul-molekul lain yang sejenis dapat terikat dalam suatu ikatan [12].



Gambar 2.1 Struktur Molekul Polietilena
Sumber: Avilla, 2003

HDPE berasal dari gabungan monomer jenis etilena (C_2H_4) yang mengalami proses polimerisasi dengan tekanan rendah. Sifat-sifat plastik HDPE secara umum

adalah tahan terhadap zat kimia (minyak, deterjen), ketahanan impak yang cukup baik, memiliki ketahanan terhadap suhu dan plastik HDPE stabil terhadap oksidasi udara [12]. HDPE juga lebih keras dan mampu stabil pada temperatur tinggi ($T_m = 135^\circ\text{C}$) [31]. Karakteristik HDPE dijelaskan pada Tabel 2.1.

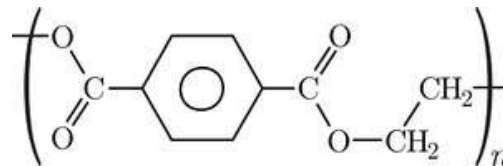
Tabel 2.1 Karakteristik HDPE

Karakteristik	Nilai
Massa jenis (gram/cm^3)	0,94
Kekuatan tarik (MPa)	20-24
Titik transisi gelas ($^\circ\text{C}$)	<-100
Titik degradasi ($^\circ\text{C}$)	498
Titik leleh ($^\circ\text{C}$)	135
Kekuatan impak (kJ/m^2)	145

Sumber: Tabel Periodik Polimer, Sentra Teknologi Polimer

2.2 Polyethylene Terephthalate (PET)

PET merupakan salah satu resin polimer termoplastik jenis polyester yang banyak digunakan dalam serat sintesis, botol minuman, wadah makanan, aplikasi *thermoforming* serta dikombinasikan dengan *fiber glass*.



Gambar 2.2 Struktur Molekul *Polyethylene Terephthalate* (PET)

Sumber: Billmeyer, 1994

PET akan bersifat amorf dan semikristalin tergantung dari cara pemrosesan dan *thermal history*. Monomer PET dapat diproduksi melalui esterifikasi asam tereftalat dengan etilen glikol dan sebagai produk sampingnya adalah air. Reaksi transesterifikasi ini dapat menghasilkan monomer PET melalui etilen glikol dengan

dimetil tereftalat dengan metanol sebagai hasil samping. Polimer PET dihasilkan melalui reaksi polimerasi kondensasi dari monomernya. Reaksi ini terjadi sesaat setelah esterifikasi/transesterifikasinya dengan etilen glikol sebagai produk samping. Kebanyakan (sekitar 60%) dari produksi PET dunia digunakan dalam serat sintesis, dan produksi botol mencapai 30% dari permintaan dunia. Sebagai bahan semi kristalin, PET bisa bersifat transparan (ukuran partikel <500nm) atau buram dan putih (ukuran partikel sampai beberapa mikron) tergantung pada struktur kristal dan ukuran partikelnya [13].

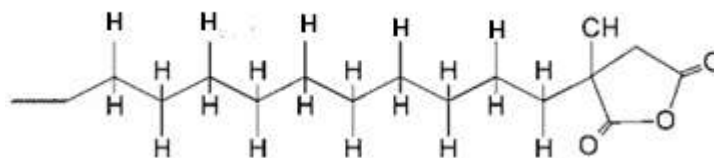
Tabel 2.2 Karakteristik PET

Karakteristik	Nilai
Massa jenis (gram/cm ³)	1,33
Kekuatan tarik (MPa)	50-60
Modulus Young (GPa)	2,1-3,1
Titik temperature gelas (°C)	70
Titik leleh (°C)	250
Kekuatan impak (kJ/m ²)	70
Daya serap air (%)	0,01

Sumber: Tabel Periodik Polimer, Sentra Teknologi Polimer

2.3 *Compatibilizer* PE-g-MA

Compatibilizer merupakan senyawa kimia yang memiliki fungsi sebagai pengikat antara matriks dan penguat pada sistem komposit. *Compatibilizer* sendiri hanya digunakan untuk mengikat dua atau lebih material yang secara alamiah tidak bisa (sulit) bercampur, sebagai contoh plastik dengan material alam seperti kayu, logam dan keramik [14].



Gambar 2.3 Struktur Molekul PE-g-MA

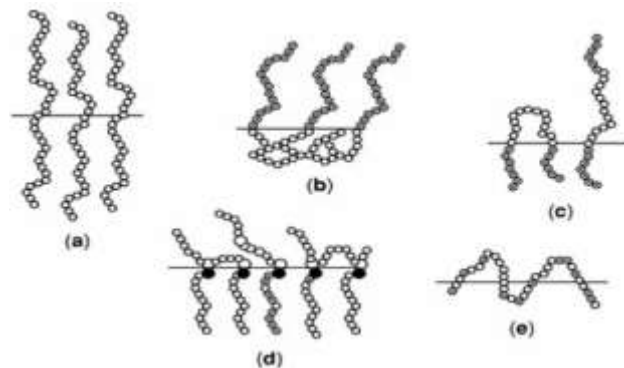
Okulasi (pencangkakan) atau interaksi PE dengan maleat anhidrida (MA) dapat dibuat secara langsung dengan menggunakan berbagai teknik mencakup termal, larutan dan tekanan antarmuka adhesi antara bahan pengisi dan matriks polimer oleh dua jenis interaksi. Kelompok MA bereaksi dengan kehadiran golongan fungsional terhadap permukaan dari pengisi untuk mengurangi tekanan *interfacial* dan meningkatkan adhesi oleh kreasi satu interaksi kutub yang spesifik ikatan hidrogen atau gaya Van der Waals, yang tergantung pada jenis bahan pengisi, berbagai fungsionalitas permukaan tersedia untuk asam atau anhidrid untuk saling berhubungan. Jenis kedua dari interaksi terdiri dari *co-crystallization*, berat molekular dengan rantai molekular dari matriks polimer memberi rintangan fisik. Oleh karena itu, *compatibilizer* harus kompatibel dengan fase tunggal (secara umum tanpa kutub) dan harus menciptakan interaksi spesifik dengan yang lain [15].

PET dan HDPE tidak kompatibel dan pencampuran mereka akan menghasilkan fase besar dengan ikatan antar muka yang lemah dan memiliki sifat mekanik yang rendah. PET dan HDPE yang diketahui sepenuhnya tidak bercampur (*immiscible*) dan membutuhkan modifikasi antarmuka untuk mendapatkan campuran yang baik dan untuk meningkatkan daya adhesi *solid-state*. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mendapatkan kompatibilizer antara PET dan HDPE dengan berbagai jenis seperti MA, asam akrilik, atau fungsionalisasi metakrilat *glycidyl*. Maleat anhidrida (MA) merupakan senyawa kimia yang pada saat ini banyak diminati para peneliti sebagai kompatibilizer termoplastik dengan material lainnya seperti PET dengan HDPE. *Compatibilizer* pada intinya molekul atau polimer yang mempunyai gugus fungsional atau memiliki ujung polar/non polar [15]. Campuran polimer yang tidak bercampur (*immiscible*) menunjukkan morfologi fasa yang tidak

stabil dan sifat mekanik yang rendah karena daya adhesi yang lemah pada permukaannya. Untuk menghasilkan campuran polimer dengan sifat-sifat yang baik maka diperlukan bahan kompatibilisasi agar dua komponen yang dicampurkan menghasilkan menyatu secara sempurna [16]. Ada 2 metode umum yang digunakan untuk mengkompatibilisasi polimer yang tidak bercampur (*immiscible*), yaitu:

1. kompatibilisasi non-reaktif (penggabungan blok yang sesuai atau pencangkokan kopolimer),
2. kompatibilisasi reaktif.

Biasanya rantai dari sebuah kopolimer blok atau cangkok (*graft*) memiliki struktur gumpal (*blocky*), yaitu satu sisi blok bercampur dengan satu komponen campurannya dan sisi blok kedua bergabung dengan campuran komponen lainnya. Struktur gumpal ini dapat dibuat dan ditambahkan ke dalam campuran polimer yang tidak bercampur (*immiscible*), tetapi mereka dapat juga dihasilkan secara *in-situ* selama proses pencampuran. Kopolimer ini akan mempunyai kecenderungan berikatan pada antarmuka antara kedua polimer. Konformasi dari perbedaan kopolimer blok, cangkok atau acak pada antar mukanya [17].



Gambar 2.4 Skema Rantai Penghubung pada Antarmuka; (a) *Diblock Copolymers*, (b) *Endgrafted Chains*, (c) *Triblock Copolymers*, (d) *Multiply Grafted Chain*, (e) *Random Copolymer*

Sumber: Wenjing, 2009

Kompatibilisasi reaktif adalah proses yang memungkinkan menghasilkan kopolimer cangkok atau blok yang bertindak sebagai *compatibilizer* secara *in-situ*

selama pencampuran leleh. Kompatibilisasi reaktif mempunyai beberapa tipe. Tipe pertama yaitu jika kedua polimer yang dicampur mengandung gugus reaktif maka reaksi mereka adalah lurus ke depan. Tipe kedua, memasukan suatu polimer reaktif dalam satu komponen campuran *miscible* dan reaktif terhadap gugus-gugus fungsional yang melekat pada campuran kedua komponen. Kopolimer cangkok atau blok dengan demikian terbentuk secara *in-situ* pada antar mukanya. Salah satu metode utama kompatibilisasi reaktif adalah pemanfaatan polimer cangkok MA. Gugus anhidrida dapat bereaksi dengan gugus ujung amina pada poliamida dan gugus ujung hidrosil pada polyester. Gugus reaktif lain seperti karboksil, *oxazoline*, isosianat dan epoksi juga bertindak sebagai penyangkok (*graft*) untuk mengkompatibilisasi campuran polimer *immiscible* [18].

2.4 Komposit

Bidang material komposit akhir-akhir ini terus mendapat perhatian yang serius dari para ilmuwan, sehingga hampir setiap hari produk baru maupun inovasi dan modifikasi produk yang telah ada terus bermunculan. Hal itu disebabkan material komposit diperlukan di segala bidang, seperti bidang elektronik, transportasi, kedokteran/medis, biologi dan sebagainya. Sehingga para peneliti dituntut untuk terus menghadirkan produk terbaik yang dibutuhkan di pasaran. Material komposit merupakan material yang terbentuk dari kombinasi antara dua atau lebih material pembentuknya melalui pencampuran yang tidak homogen, yaitu sifat mekanik dari masing-masing material pembentuknya berbeda. Jadi komposit adalah perpaduan dari bahan yang dipilih berdasarkan sifat masing-masing bahan penyusun untuk menghasilkan material baru dengan sifat yang unik dibandingkan sifat material dasar sebelum dicampur dan terjadi ikatan permukaan masing-masing material penyusun. Berdasarkan definisi tersebut maka kondisi ikatan permukaan sangat berpengaruh terhadap kekuatan komposit.

Menurut Matthews di tahun 1993, komposit itu merupakan suatu material yang terbentuk dari kombinasi dua atau lebih material pembentuknya melalui

campuran yang tidak homogen, dimana sifat mekanik dari masing-masing material pembentuknya berbeda. Dari campuran tersebut akan dihasilkan material komposit yang mempunyai sifat mekanik dan karakteristik yang berbeda dari material pembentuknya [19]. Material komposit mempunyai sifat dari material konvensional pada umumnya dari proses pembuatannya melalui percampuran yang tidak homogen, sehingga kita leluasa merencanakan kekuatan material komposit yang kita inginkan dengan jalan mengatur komposisi dari material pembentuknya. Komposit merupakan sejumlah sistem multifasa sifat dengan gabungan, yaitu gabungan antara bahan matriks atau pengikat dengan penguat.

Persyaratan dasar kekuatan komposit terletak pada kekuatan antar muka matriks dan penguat. Ikatan antar muka inilah yang menjadi jembatan transmisi tegangan luar yang diberikan dari matriks menuju partikel penguat. Jika ikatan antarmuka terjadi dengan baik maka transmisi tegangan ini dapat berlangsung dengan baik pula. Material komposit tersusun atas 2 (dua) bagian yang berbeda yaitu matriks dan penguat. Matriks merupakan fasa utama dan kontinu, berfungsi menahan fasa penguat dan meneruskan beban. Sedangkan penguat merupakan fasa kedua dan diskontinu yang dimasukkan kedalam matriks. Material komposit memiliki sifat mekanik yang lebih bagus daripada logam, memiliki kekuatan bisa diatur yang tinggi (*tailorability*), memiliki kekuatan lelah (*fatigue*) yang baik, memiliki kekuatan jenis (*strength/weight*) dan kekakuan jenis (*modulus young/density*) yang lebih tinggi daripada logam, tahan korosi, memiliki sifat isolator panas dan suara serta dapat dijadikan sebagai penghambat listrik yang baik dan dapat juga digunakan untuk menambal kerusakan akibat pembebanan dan korosi.

Penjelasan lain tentang komposit juga diutarakan buku *Natural Fibre Composites*, oleh Van Rijswijk, M.Sc di tahun 2001 mengenai komposit bahan hibrida yang terbuat dari resin polimer diperkuat dengan serat, menggabungkan sifat-sifat mekanik dan fisik [20]. Ada tiga faktor yang menentukan sifat-sifat dari material komposit, yaitu:

1. material pembentuk

Sifat-sifat intrinsik material pembentuk memegang peranan yang sangat penting terhadap pengaruh sifat kompositnya.

2. susunan struktural komponen

Susunan structural komponen yaitu bentuk serta orientasi dan ukuran tiap-tiap komponen penyusun struktur dan distribusinya merupakan faktor penting yang memberi kontribusi dalam penampilan komposit secara keseluruhan.

3. interaksi antar komponen

Komposit merupakan campuran atau kombinasi komponen-komponen yang berbeda baik dalam hal bahannya maupun bentuknya, maka sifat kombinasi yang diperoleh pasti akan berbeda.

2.5 Komponen Penyusun Komposit

Secara umum material komposit tersusun dari dua komponen utama yaitu matriks (bahan pengikat) dan *filler* (bahan pengisi). *Filler* adalah bahan pengisi yang digunakan dalam pembuatan komposit, biasanya berupa serat atau serbuk. Sedangkan matriks dalam struktur komposit bisa berasal dari bahan polimer, logam, maupun keramik. Matriks secara umum berfungsi untuk mengikat serat menjadi satu struktur komposit dengan bantuan bahan penunjang yaitu *coupling agent* [21].

2.5.1 Matriks

Matriks berfungsi untuk menjaga bahan penguat agar tetap pada tempatnya di dalam struktur, membantu distribusi beban, melindungi filamen di dalam struktur, mengendalikan sifat elektrik dan kimia dari komposit, serta membawa regangan interlaminer. Matriks yang paling umum dipakai adalah logam, keramik dan polimer, baik polimer termoset, maupun polimer termoplastik. Matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volume terbesar (dominan). Matriks polimer biasanya digunakan dalam pembuatan komposit.

Menurut Gibson di tahun 1994, bahwa matriks dalam struktur komposit dapat berasal dari bahan polimer, logam, maupun keramik. Syarat pokok matriks yang

digunakan dalam komposit adalah matriks harus bisa meneruskan beban, sehingga serat harus bisa melekat. Komposit dibentuk dari dua jenis material yang berbeda, yaitu [22]:

1. penguat (*reinforcement*), yang mempunyai sifat kurang *ductile* tetapi lebih *rigid* serta lebih kuat.
2. matriks, umumnya lebih *ductile* tetapi mempunyai kekuatan dan rigiditas yang lebih rendah.

Pada material komposit sifat unsur pendukungnya masih terlihat dengan jelas, sedangkan pada paduan *alloy* sudah tidak terlihat lagi unsur-unsur pendukungnya. Salah satu keunggulan dari material komposit bila dibandingkan dengan material lainnya adalah penggabungan unsur-unsur yang unggul dari masing-masing unsur pembentuknya tersebut. Sifat material hasil penggabungan ini diharapkan dapat saling melengkapi kelemahan-kelemahan yang ada pada masing-masing material penyusunnya. Sifat-sifat yang dapat diperbaharui, yaitu:

1. kekuatan (*strength*)
2. ketahanan korosi (*corrosion resistance*)
3. ketahanan gesek/aus (*wear resistance*)
4. berat (*weight*)
5. ketahanan lelah (*fatigue life*)
6. meningkatkan konduktivitas panas
7. tahan lama.

Secara alami kemampuan tersebut, tidak ada semua pada waktu yang bersamaan. Sekarang ini perkembangan teknologi komposit mulai berkembang dengan pesat. Komposit sekarang ini digunakan dalam berbagai variasi komponen antara lain untuk otomotif, pesawat terbang, pesawat luar angkasa, kapal dan alat-alat olah raga seperti ski, *golf*, raket tenis dan lain-lain, Pada matriks dan kompatibel antara serat dan matriks. Umumnya matriks dipilih yang mempunyai ketahanan panas yang tinggi [23].

Matriks yang digunakan dalam komposit adalah harus mampu meneruskan beban sehingga serat harus bisa melekat pada matriks dan kompatibel antara serat dan matriks artinya tidak ada reaksi yang mengganggu. Menurut Diharjo, pada bahan komposit matriks mempunyai kegunaan, yaitu[24]:

1. matriks memegang dan mempertahankan serat pada posisinya,
2. pada saat pembebanan, merubah bentuk dan mendistribusikan tegangan ke unsur utamanya yaitu serat.

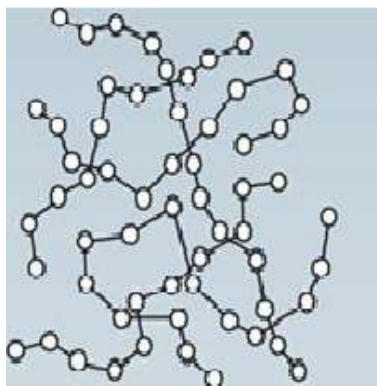
Berdasarkan sifat terhadap pemanasan matriks polimer dibedakan menjadi dua, yaitu [25]:

1. Termoplastik

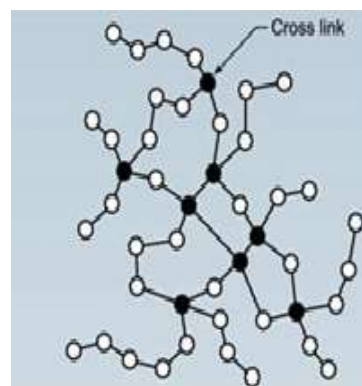
Termoplastik adalah polimer yang bersifat kenyal atau jika dipanaskan akan meleleh, akan mengeras jika didinginkan dan dapat dibentuk menurut pola yang diinginkan melalui pemanasan ulang. Setelah dingin, polimer menjadi keras dan kehilangan sifat kekenyalannya. Contoh: polietilena, PVC, seluloida, polistirena, polipropilena, asetal, vinil, nilon dan *perspex*.

2. Termoset

Polimer termoset adalah polimer yang apabila dipanaskan bersifat kenyal saat dipanaskan, tetapi setelah dingin tidak dapat dilunakkan kembali. Jika pecah, polimer tersebut tidak dapat disambungkan kembali dengan pemanasan. Contoh: bakelit, uretana, epoksi, polyester, *phenol formaldehyde* dan formika.



(a) Termoplastik



(b) Termoset

Gambar 2.5 Perbedaan Struktur Termoplastik dan Termoset
 Sumber: Supardi, 2011

Dijelaskan bahwa struktur termoplastik terdiri dari rantai panjang yang dihasilkan oleh penggabungan monomer. Polimer ini diperlunak dan dibentuk dengan aliran viskous pada temperatur tinggi sifatnya fleksibel. Sedangkan struktur termoset terdiri dari rantai panjang yang mempunyai struktur *cross-linked*, yaitu polimer yang terbentuk karena beberapa rantai polimer saling berikatan satu sama lain pada rantai utamanya. Jika sambungan silang terjadi ke berbagai arah maka akan terbentuk sambung silang tiga dimensi yang sering disebut polimer jaringan memiliki sifat lebih rigid, kuat tetapi getas dibanding bahan termoplastik.

Tabel 2.3 Sifat dan Kegunaan Polimer

No.	Polimer	Monomer	Sifat	Kegunaan
1.	Polietilena	Etilena	Lentur	Botol semprot, tas plastik, kabel, ember, tempat sampah dan film plastik.
2.	Polipropilen	Propilen	Keras dan titik leleh tinggi	Karpet, tali dan wadah plastik.
3.	Polivinil klorida	Vinil klorida	Kaku dan keras	Pipa air dan pipa kabel listrik.
4.	Polistirena (polifenil etena)	Fenil etena	Tahan terhadap tekanan tinggi	Plastik pada kendaraan dan pesawat terbang, genting.
5.	Poliamida (nilon)	Asam adipat dan heksametilen diamine	Kuat (tidak cepat rusak) dan halus	Pakaian, peralatan camping, laboratorium, rumah tangga, dapur, parasut, layar perahu.
6.	Politetrafluoro Etena (PTFE)	Tetrafluoro etena	Keras, kaku, tahan panas dan bahan kimia	Pelapis dan wajan anti lengket
7.	Bakelit	Formaldehid dan fenol	Termoset	Peralatan listrik (saklar), perlengkapan elektronik.

Sumber: Supardi, 2011

2.5.2 Reinforcement atau Filler

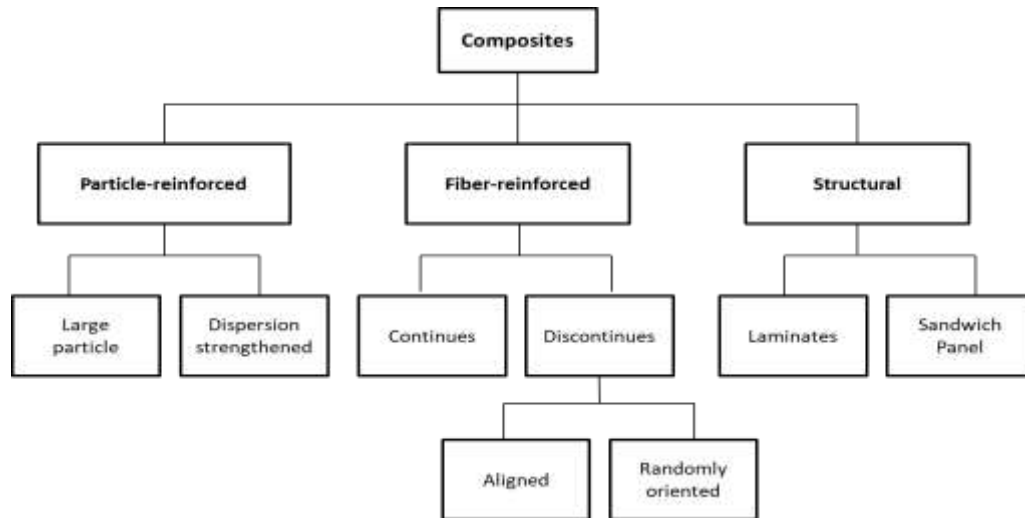
Salah satu bagian utama dari komposit adalah *reinforcement* (penguat) yang berfungsi sebagai penanggung beban utama pada komposit. Semakin kecil bahan (diameter *filler* mendekati ukuran kristal) maka semakin kuat bahan tersebut, karena minimnya cacat pada material. *Reinforcement* juga berfungsi sebagai penguat atau kerangka darisuatu komposit. Biasanya *reinforcement* ini berupa fiber atau logam yang memiliki fase diskontinyu. Berikut ini adalah beberapa *reinforcement* yang paling banyak digunakan antara lain: *fiber glass*, kertas, katun atau linen, fiber organik, aramid dan lain-lain.

2.6 Klasifikasi Material Komposit

Berdasarkan penguatan yang digunakan, material komposit dapat dibagi atas tiga kelas, yaitu: (1) komposit serat (*fibrous composites*), (2) komposit partikel (*particulate composites*), dan (3) struktural. Komponen komposit terdiri dari matriks (bahan pengikat) yang berjenis *metal matrix composites* (MMC), *ceramic matrix composites* (CMC), dan *polymer matrix composites* (PMC) dan sebagai penguat dapat berupa serat atau partikel atau struktur.

Gambar 2.6 menjelaskan material komposit dapat digolongkan ke dalam jenis berdasarkan struktur penguatnya, yaitu a) *particle reinforced* merupakan jenis komposit yang menggunakan partikel/butiran sebagai *filler* (pengisi). Partikel berupa logam atau non logam dapat digunakan sebagai *filler*. Partikel *filler* sebagai penguat dalam komposit dibedakan berdasarkan besar kecilnya ukuran juga dispersinya di dalam komposit itu sendiri. b) *Fiber-reinforced* (komposit serat) merupakan komposit yang terdiri dari dua komponen penyusun yaitu matriks dan serat. Serat yang ada di dalam komposit ini dapat berupa serat *continue* lurus memanjang atau secara *discontinue* dengan orientasi teratur maupun acak dan c) *structural composite*, komposit ini terdiri dari sekurang-kurangnya dua material berbeda yang direkatkan

bersama-sama. Proses pelapisan dilakukan dengan mengkombinasikan aspek terbaik dari masing-masing lapisan untuk memperoleh bahan yang berguna.



Gambar 2.6 Klasifikasi Komposit
Sumber: Calister, 2000

2.6.1 Komposit Serat (*Fiber Composite*)

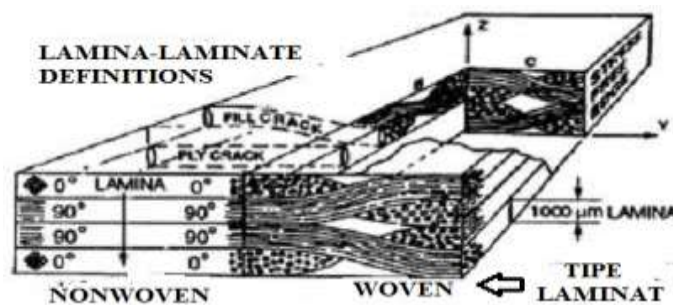
Komposit serat merupakan jenis komposit yang menggunakan serat sebagai penguat. Dimana komposit yang terdiri dari serat dan bahan dasar yang diproduksi secara fabrikasi, misalnya serat dan resin sebagai bahan perekat, sebagai contoh adalah FRP (*Fiber Reinforce Plastic*) plastik diperkuat dengan serat dan banyak digunakan, yang sering disebut *fiber glass*. Serat yang digunakan biasanya berupa serat gelas, serat karbon, serat aramid, serat alam dan sebagainya. Serat ini bisa disusun secara acak maupun dengan orientasi tertentu bahkan bisa juga dalam bentuk yang lebih kompleks seperti anyaman. Komposit yang diperkuat dengan serat dapat digolongkan menjadi dua bagian yaitu:

1. komposit serat pendek (*short fiber composite*)
2. komposit serat panjang (*long fiber composite*)

2.6.2 Komposit Laminat (*Laminated Composite*)

Komposit laminat merupakan jenis komposit yang terdiri dari dua lapis atau

lebih yang digabungkan menjadi satu dan setiap lapisannya memiliki karakteristik khusus. Komposit laminat ini terdiri dari empat jenis yaitu komposit serat kontinyu, komposit serat anyam, komposit serat acak dan komposit serat hibrid. Proses pembentukan lamina menjadi *laminat* dinamakan proses *la-minai*. Sebagai elemen dari sebuah struktur, lamina yang serat penguatnya searah saja (*unidirectional lamina*) pada umumnya tidak menguntungkan karena memiliki sifat yang buruk. Untuk itulah struktur komposit dibuat dalam bentuk *laminat* yang terdiri dari beberapa macam lamina atau lapisan yang diorientasikan dalam arah yang diinginkan dan digabungkan bersama sebagai sebuah unit struktur. Mikrostruktur lamina dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Mikrostruktur Lamina

Sumber: Courtney, 1999

Menurut Courtney (1999), terdapat beberapa jenis lamina, yaitu [26]:

1. *continous fiber laminate*

Lamina jenis *continous fiber laminate* mempunyai lamina penyusun dengan serat yang tidak terputus hingga mencapai ujung-ujung lamina. *Continous fiber laminate* terdiri dari:

- a. *unidirectional laminate* (satu arah), yaitu bentuk *laminat* dengan tiap lamina mempunyai arah serat yang sama. Kekuatan terbesar dari komposit lamina ini adalah arah seratnya,
- b. *crossplien quasi-isotropoic* (silang) lamina ini mempunyai susunan serat yang saling silang tegak lurus satu sama lain antara lamina,
- c. *random/woven fiber composite*, lamina ini mempunyai susunan serat yang

tidak beraturan satu sama lain.

2. *discontinuous fiber composite*

Lamina jenis *discontinuous fiber composite* berbeda dengan jenis sebelumnya maka *laminate* ini pada masing-masing lamina terdiri dari potongan serat pendek yang terputus dan mempunyai dua jenis yaitu:

- a. *short aligned fiber*, potongan serat tersusun dalam arah tertentu, sesuai dengan keperluan setiap lamina.
- b. *in-plane random fiber*, potongan serat disebarakan secara acak atau arahnya tidak teratur.

2.6.3 Komposit Partikel (*Particulated Composite*)

Komposit partikel merupakan komposit yang menggunakan partikel atau serbuk sebagai penguatnya dan terdistribusi secara merata dalam matriks. Komposit yang terdiri dari partikel dan matriks yaitu butiran (batu, pasir) yang diperkuat semen yang kita jumpai sebagai beton, senyawa kompleks ke dalam senyawa kompleks. Komposit partikel merupakan produk yang dihasilkan dengan menempatkan partikel-partikel dan sekaligus mengikatnya dengan suatu matriks bersama-sama dengan satu atau lebih unsur-unsur perlakuan seperti panas, tekanan, kelembaban, katalisator dan lain-lain. Komposit partikel ini berbeda dengan jenis serat acak sehingga bersifat isotropis. Kekuatan komposit serat dipengaruhi oleh tegangan koheren di antara fase partikel dan matriks yang menunjukkan sambungan yang baik. Pada umumnya komposit mengandung serat, baik serat pendek maupun serat panjang yang dibungkus dengan matriks. Fungsi daripada serat adalah menahan bahan yang diberikan sedang fungsi matriks adalah membungkus serat sekaligus melindunginya dari kerusakan baik mekanis maupun kimia.

Aplikasi dan pemakaian komposit yang diperkuat dengan serat secara luas dipakai industri otomotif, industri kapal terbang, industri kapal laut, peralatan militer dan industri perabotan rumah tangga. Hal ini menunjukkan perkembangan pesat dari material komposit, karena mempunyai sifat yang lebih unggul, antara lain sebagai

isolator yang baik. Ketahanannya baik terhadap air dan zat kimia. Dengan demikian bahan komposit tidak dapat berkarat, anti rayap dan tahan lembab. Bahan komposit alam umumnya berharga murah. Bahan komposit termasuk bahan yang ringan dan kuat.

2.6.4 Komposit Serpihan (*Flake Composite*)

Pengertian dari serpihan adalah partikel kecil yang telah ditentukan sebelumnya yang dihasilkan dalam peralatan yang khusus dengan orientasi serat sejajar permukaannya. Komposit serpihan terdiri atas serpihan-serpihan yang saling menahan dengan mengikat permukaan atau dimasukkan ke dalam matriks. Sifat-sifat khusus yang dapat diperoleh dari serpihan adalah bentuknya besar dan datar sehingga dapat disusun dengan rapat untuk menghasilkan suatu bahan penguat yang tinggi untuk luas penampang lintang tertentu. Pada umumnya serpihan-serpihan saling tumpang tindih pada suatu komposit sehingga dapat membentuk lintasan fluida ataupun uap yang dapat mengurangi kerusakan mekanis karena penetrasi atau perembesan.

2.6.5 Komposit Rangka (Komposit Terisi)

Komposit rangka (komposit terisi) yang terdiri dari matriks rangka yang terisi dengan bahan kedua. Komposit dapat dibagi berdasarkan sifat dan dimensi tersebarnya, yaitu:

1. mikrokomposit

Dimensi ukuran partikel penyusun mikrokomposit memiliki ukuran antara 10^{-10} - 10^{-6} m. Mikrokomposit ini dapat dibagi atas tiga bagian berdasarkan ukuran dan bentuk tersebarnya, yaitu:

- a. mikrokomposit menggunakan penguat sebaran.
- b. mikrokomposit menggunakan penguat partikel.
- c. mikrokomposit menggunakan penguat serat.

2. makrokomposit

Biasanya dimensi ukuran partikel penyusun makrokomposit memiliki ukuran di atas 10^{-6} m. Bahan komposit pada umumnya terdiri dari dua unsur, yaitu matriks yang berfungsi sebagai pengikat serat dan serat yang berfungsi sebagai penguat. Matriks harus memiliki kecocokan yang baik dengan serat. Beberapa jenis matriks polimer yang sering digunakan ialah matriks termoset (poliester, epoksi, *phenolics*, dan poliamida) dan matriks termoplastik (polietilena, polipropilena, nilon, polikarbonat dan *polyether-ether keton*) [27].

2.7 Komposit Mikro fibril

Komposit mikro fibril adalah komposit yang berpenguat serat dengan berukuran mikro. Komposit mikro fibril ini termasuk komposit in situ, karena pembentukan serat terbentuk pada proses pencampuran polimer berlangsung. Selama proses pelelehan pada proses ekstrusi, molekul termoplastik secara umum mengalami relaksasi. Oleh karena itu, orientasi molekul yang baik sulit didapatkan. Untuk mengatasi masalah ini, Fakirov dan Evstatiev membuat sebuah konsep baru dalam hal pengembangan untuk pembentukan komposit yang diperkuat benang secara langsung selama proses pencampuran polimer berlangsung. Komposit tersebut dikenal dengan komposit berpenguat mikro fibril (*microfibrillar reinforced composites*) [28]. Berbeda dengan komposit makro-klasik (misalnya, makro-komposit diperkuat *fiber glass*), komposit polimer jenis ini diperkuat dengan benang polimer dari yang berbentuk seperti bola-bola kecil. Kombinasi polimer untuk membuat komposit berpenguat mikro fibril (MFC) harus memenuhi beberapa persyaratan, yaitu:

1. terdiri dari dua (atau bahkan lebih) polimer yang *immiscible*,
2. memiliki perbedaan temperatur leleh antara kedua polimer,
3. pasangan polimer memiliki tingkat pembentukan yang baik.

Pencampuran polimer adalah metode yang efektif untuk mengembangkan bahan-bahan polimer agar polimer individu dapat menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik. Kemampuan untuk menggabungkan polimer yang ada menjadi komposisi

baru dengan meningkatkan sifat mekanik dan sebagai suatu pengembangan alternatif pengganti serat kaca yang biasanya digunakan sebagai penguat dalam pembuatan komposit [29].

Jenis polimer campuran sangat luas, dari yang sederhana yaitu campuran biner untuk kombinasi kopolimer dan homopolimer, sistem reaktif *compatibilizer*, molekul komposit, mengubah dampak polimer, pengemulsi campuran, rekayasa polimer campuran dan banyak sistem lain. Perbedaan utama dari polimer campuran dihubungkan dengan fase struktur mereka yaitu, campuran sepenuhnya, campuran sebagian dan campuran yang tidak tercampur. Dalam termodinamis kelarutan campuran pada campuran sepenuhnya, campuran diamati pada skala nanometer dan tingkat molekuler. Jenis campuran ini menunjukkan, hanya sekali mengalami transisi temperatur, yang terletak antara transisi temperatur kedua komponen campuran dalam komposisi campuran. Pada campuran sebagian, dari satu komponen dilarutkan ke dalam campuran yang lain. Kedua fasa campuran bersifat homogen dan memiliki transisi temperatur sendiri. Bagaimanapun, transisi temperatur akan bergeser dari nilai-nilai komponen murni terhadap transisi temperatur komponen lainnya pada campuran [29].

Sebagian besar polimer campuran dikenal sebagai sistem fasa terpisah. Bergantung pada parameter interaksi materi yang kompleks dan kondisi pengoperasian, berbagai jenis morfologi yang berguna dapat diperoleh untuk campuran tertentu. Mengenai sifat morfologi akan menghasilkan sifat-sifat akhir yang berbeda, seperti kekuatan dan ketangguhan yang tinggi, ditambah dengan kekakuan, sifat penghalang yang baik, dan titik leleh yang tinggi [30].

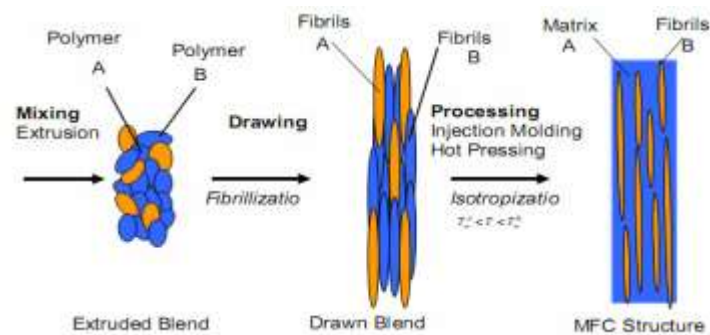
Polymer blend diklasifikasikan sebagai *miscible* atau *immiscible* tergantung pada struktur dari komponen polimer tunggal. Proses pencampuran polimer biasanya dilakukan dengan pencampuran dalam kondisi meleleh. Morfologi campuran *immiscible* dapat diubah dengan menambahkan kompatibilisasi. Kopolimer jenis blok atau cangkok dengan segmen tertentu mampu berinteraksi dengan komponen

campuran yang ditambahkan. Kopolimer ini didesain sedemikian rupa sehingga mampu bercampur antar dua muka dari campuran komponen sehingga dua komponen dasarnya dapat terikat. Efek utama modifikasi antar muka adalah untuk mengurangi ukuran partikel dan untuk memperkecil ukuran distribusi partikel. Penurunan ukuran partikel dapat menurunkan tegangan antar muka dan koalesensi berkurang.

2.8 Pembuatan Komposit Mikrofibril

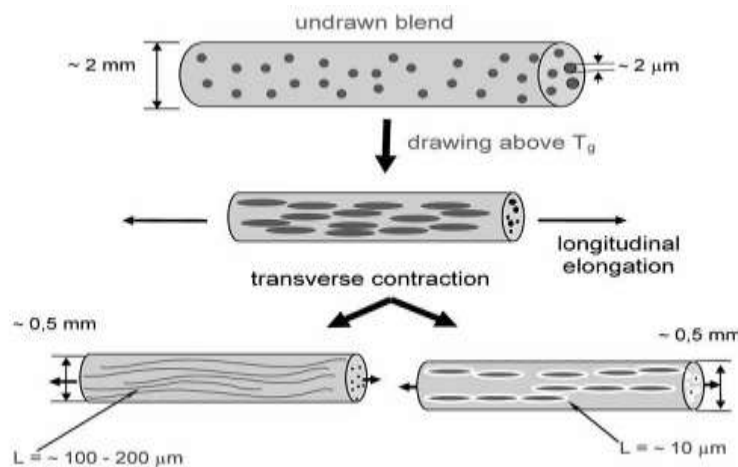
Pembuatan komposit berpenguat mikrofibril (MFC) mencakup tiga langkah dasar, yaitu:

1. pencampuran dan ekstrusi, yaitu proses ekstrusi campuran secara meleleh dari polimer *immiscible* yang mempunyai perbedaan temperatur leleh (T_m) yang menghasilkan campuran filamen yang kontinyu.
2. pembentukan mikrofibril, yaitu penarikan dalam keadaan temperature menurun untuk mendapatkan orientasi dari kedua fase. Langkah ini menghasilkan orientasi mikrofibril yang lurus membentuk benang.
3. pembentukan spesimen, yaitu membentuk sebuah spesimen dimana matriks berada pada titik leleh sedangkan penguat yang sudah terbentuk benang di dalam matriks berada di bawah titik leleh untuk mempertahankan orientasi benang di dalam matriks.



Gambar 2.8 Metode Pembuatan Komposit Mikrofibril
 Sumber: Wenjing, 2009

Selama dalam proses penarikan dan pembentukan benang, kedua polimer berubah menjadi keadaan yang memiliki kecenderungan tinggi. Pada saat proses penarikan, polimer sebagai penguat yang awalnya membentuk partikel bola berubah menjadi lonjong. Proses selanjutnya dalam bentuk lonjong ini menjadi lebih tipis dan akhirnya berubah menjadi berbentuk silinder [35].



Gambar 2.9 Skema Mekanisme Pembentukan Mikrofilibril

Sumber: Wenjing, 2009

Komposit mikrofilibril memiliki banyak kelebihan bila dibandingkan dengan komposit polimer yang lainnya, yaitu:

1. penguat mikrofilibril terbentuk secara langsung dalam proses pencampuran,
2. prosesnya yang cukup mudah,
3. berat lebih ringan dibandingkan dengan komposit berpenguat serat gelas,
4. dapat diproses secara kontinyu.

2.9 Ekstrusi

Ekstrusi adalah proses secara *continue* pada material sampai meleleh akibat panas dan kemudian dialirkan ke *die* oleh *screw*, kemudian produk dibentuk sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Teknik ini dapat digunakan untuk memproses sebagian besar polimer termoplastik dan beberapa jenis polimer termoset. Proses ekstrusi ini dapat menghasilkan beberapa produk seperti film, plastik, tali rafia, pipa, peletan, lembaran plastik, fiber, filamen, selubung kabel dan beberapa produk dapat

juga dibentuk. Proses pembuatan komposit serat alam dengan termoplastik juga dapat dilakukan dengan proses ekstrusi. Alat untuk proses ekstrusi disebut ekstruder. Ekstruder mampu melakukan proses pencampuran dengan baik yaitu bertujuan untuk bahan tercampur dengan homogen dan terdispersi dengan baik [36].

Prinsip dasar kerja ekstruder adalah memasukkan bahan baku yang akan diolah kemudian didorong keluar melalui suatu lubang cetakan *die* dalam bentuk yang diinginkan. Adapun bagian utama dari mesin ekstruder terdiri dari *hopper/feeder*, *barrel/screw* dan *die* [37].

2.9.1 Hopper

Semua ekstruder mempunyai tempat untuk memasukkan bahan baku yang nantinya mengalir dalam dinding-dinding ekstruder tersebut. *Hopper* biasanya terbuat dari lembaran baja atau stainless steel yang dibentuk untuk menampung sejumlah bahan baku untuk persediaan beberapa jam selama pemrosesan. *Hopper* ada yang tersedia pemanas awal jika diperlukan proses pelet yang memerlukan pemanasan awal sebelum pelet memasuki ekstruder.

2.9.2 Screw

Screw berfungsi mengalirkan polimer dan serat ke *die* setelah mengalami proses homogenisasi pada lelehan polimer tersebut. Ekstruder pada umumnya terbagi atas dua jenis, yaitu *single screw* dan *twin screw*. Ada beberapa pertimbangan dalam merancang sebuah *screw* untuk jenis material tertentu, yang terpenting adalah kedalaman kanal. Walaupun *screw* memiliki fungsi sama secara umum, namun untuk mendapatkan hasil yang terbaik harus dirancang sesuai tipe material yang digunakan.

2.9.3 Die

Salah satu kunci dalam beragamnya hasil produk ekstrusi terletak pada bagian *die*, karena dari sinilah bahan atau sampel akan didorong keluar. Fungsi *die* dalam pembuatan produksi polimer adalah untuk menghasilkan produk dengan berbagai macam bentuk, kandungan air dan konsistensi [37].

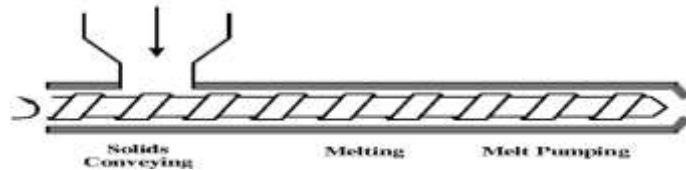
Berdasarkan konstruksi alatnya, ekstruder dibagi menjadi dua jenis yaitu jenis ekstruder ulir tunggal (*Single Screw Extruder/SSE*) dan ekstruder ulir ganda (*Twin Screw Extruder/TSE*).

1. Ekstruder Ulir Tunggal (*Single Screw Extruder/SSE*)

Bagian ekstruder ulir tunggal (*Single Screw Extruder/SSE*), antara lain:

- a. *feed section*, suatu bagian dimana bahan-bahan yang akan diekstrusi dimasukkan ke dalam ekstruder melalui suatu lubang masukan (*inlet*).
- b. *compression section* atau *transition section*, dimana terdapat ulir (*screw*) yang terletak dalam dinding selubung (*barrel*) mesin ekstruder dan pada umumnya memiliki ukuran yang semakin mengecil ke arah bahan keluar (tergantung spesifikasi ekstruder).
- c. *metering section*, merupakan bagian yang paling dekat dengan lubang tempat bahan keluar (*die*) dari ekstruder. Seringkali bagian ini memiliki luas jalur yang sempit/kecil yang akan menyebabkan daya tekan mekanis pada bahan berlangsung efektif dan meningkat kemampuannya hingga batas tertentu sesuai dengan tingkat kecepatan putaran dari ulir ekstruder tersebut [38].

Bentuk ekstruder ulir tunggal disajikan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Ekstruder Ulir Tunggal (*Single Screw*)

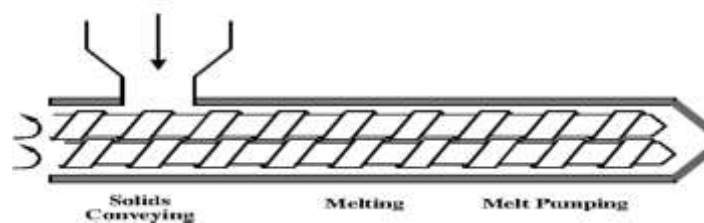
Sumber: Linko, 1982

2. Ekstruder Ulir Ganda (*Twin screw extruder/TSE*)

Bagian ekstruder ulir ganda (*Twin screw extruder/TSE*), antara lain:

- a. *feed zone*, dimulai dengan memasukan bahan ke dalam ekstruder secara terus menerus. Ketika ulir mulai berputar, ekstruder akan menggiling material dan mencampur material secara menyeluruh.

- b. *cooking zone*, pada tahap ini campuran diberi perlakuan panas yang diperoleh dari berbagai sumber, tergantung dari hasil produk yang diinginkan dan spesifikasi mesin. Kepadatan gerigi-gerigi dan jarak ulir, pengaturan arah putaran dan tekanan dapat menghasilkan panas mekanis. Panas konveksi dihantarkan langsung dari dinding *barrel* pada campuran.
- c. *forming zone*, merupakan tempat produk akan dibentuk sesuai dengan kebutuhan. Ketika produk keluar dari ekstruder melalui *die*, perubahan dari tekanan atmosfer akan menyebabkan kelembaban di dalam bahan berubah menjadi uap. Hasil yang keluar berupa pellet padat dengan bentuk yang beragam [35]. Bentuk ekstruder ulir ganda disajikan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Ekstruder Ulir Ganda (*Twin Screw*)

Sumber: Linko, 1982

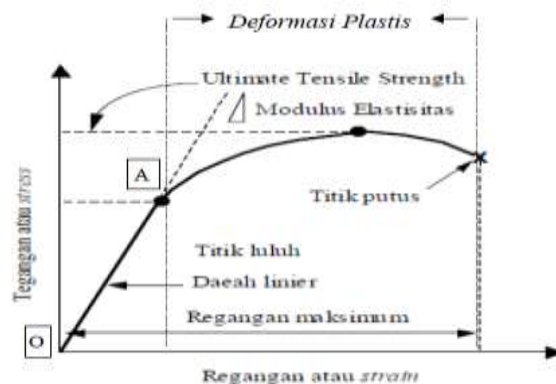
2.10 Karakterisasi Komposit

2.10.1 Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*)

Kekuatan tarik adalah kekuatan yang dibutuhkan untuk mematahkan suatu sampel. Kekuatan tarik penting untuk polimer yang akan ditarik, contohnya serat, harus mempunyai kekuatan tarik yang baik. Kekuatan tarik adalah salah satu sifat dasar dari bahan. Hubungan tegangan-regangan pada tarikan memberikan nilai yang cukup berubah tergantung pada laju tegangan, temperatur, kelembaban, dan seterusnya. Kekuatan tarik diukur dengan menarik sekeping sampel dengan dimensi yang seragam [38].

Kemampuan maksimum bahan dalam menahan beban disebut *Ultimate Tensile Strength* disingkat dengan UTS. Untuk semua bahan, pada tahap sangat awal uji tarik, hubungan antara beban atau gaya yang diberikan berbanding lurus dengan

perubahan panjang bahan tersebut. Ini disebut daerah linier atau *linearzone*. Di daerah ini, kurva pertambahan panjang vs beban mengikuti aturan Hooke, yaitu rasio tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) adalah konstan [38].

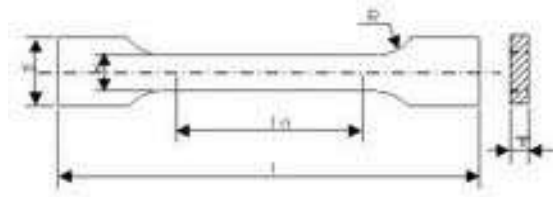


Gambar 2.12 Kurva Hubungan Tegangan dan Regangan

Sumber: Calister, 2007

Kurva pada Gambar 2.12 menunjukkan bahwa, bila sebuah bahan diberi beban sampai pada titik A, kemudian bebannya dihilangkan, maka bahan tersebut akan kembali ke kondisi semula (tepatnya hampir kembali ke kondisi semula) yaitu regangan nol pada titik O. Tetapi bila beban ditarik sampai melewati titik A, hukum Hooke tidak lagi berlaku dan terdapat perubahan permanen dari bahan tersebut. Terdapat konvensi batas regangan permanen (*permanent strain*) sehingga disebut perubahan elastis yaitu kurang 0,03%, tetapi sebagian referensi menyebutkan 0,005% [38].

Titik luluh atau batas proporsional merupakan titik dimana suatu bahan apabila diberi suatu beban memasuki fase peralihan deformasi elastis ke plastis, yaitu titik sampai di mana penerapan Hukum Hooke masih bisa toleransi. Dalam praktik, biasanya batas proporsional sama dengan batas elastis. Bentuk spesimen uji yang digunakan untuk uji tarik seperti pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Bentuk Spesimen Pengujian Kekuatan Tarik

Sumber: Callister, 2007

2.10.2 Kekuatan Impak

Pengujian impact bertujuan untuk mengukur berapa energi yang dapat diserap suatu material sampai material tersebut patah. Pengujian impact merupakan respon terhadap beban kejut atau beban tiba-tiba (beban impact). Dalam pengujian impact terdiri dari dua teknik pengujian standar yaitu *Charpy* dan *Izod* [39].

Kekuatan impact adalah suatu kriteria penting untuk mengetahui kegetasan bahan polimer. Sifat material pada umumnya mempunyai nilai impact yang berbanding terbalik dengan nilai kekuatan material tersebut. Umumnya kekuatan impact bahan polimer lebih kecil dibandingkan bahan logam. Sampel dibuat sesuai standar baik dengan cara membuat takik (*notched*) ataupun tanpa takik (*unnotched*) pada komposit, takik ditujukan sebagai pemusatan beban (*stress concentration*). Untuk metode *Charpy*, spesimen dikenakan beban dengan dua buah penyangga pada dua sisi spesimen. Sedangkan untuk metode *Izod*, penyangga spesimen hanya terdapat pada salah satu sisinya.

Prinsip pengujian impact ini adalah menghitung energi yang diberikan beban dan menghitung energi yang diserap oleh spesimen. Saat beban dinaikkan pada ketinggian tertentu, beban memiliki energi potensial, kemudian saat menumbuk spesimen energi kinetik mencapai maksimum. Energi yang diserap spesimen akan menyebabkan spesimen mengalami kegagalan. Bentuk kegagalan itu tergantung pada jenis materialnya, apakah patah getas atau patah ulet. Dengan mengetahui besarnya energi potensial yang diserap oleh material maka kekuatan impact benda uji dapat dihitung (ISO/DIS 179-1) dengan penjelasan sebagai berikut:

1. material yang getas, bentuk patahannya akan bermukaan merata, hal ini menunjukkan bahwa material yang getas akan cenderung patah akibat tegangan normal.
2. material yang ulet akan terlihat meruncing, hal ini menunjukkan bahwa material yang ulet akan patah akibat tegangan geser.
3. semakin besar posisi sudut β akan semakin getas, demikian sebaliknya. Artinya pada material getas, energi untuk mematahkan material cenderung semakin kecil, demikian sebaliknya.

2.10.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Electron Microscopy (EM) adalah salah satu teknik yang digunakan untuk karakterisasi material komposit. Dua teknik utama EM dibedakan menjadi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Transmission Electron Microscopy* (TEM). SEM merupakan metode yang tepat untuk mengkarakterisasi material komposit dengan batas maksimum resolusi mikroskop elektron 10 nm. Metode mikroskopi dapat secara cepat menunjukkan ukuran nominal dan bentuk serat. Permukaan spesimen yang akan diuji, di-*scan* dengan pancaran berkas elektron dan pantulan dari elektron ditangkap, kemudian ditampilkan di atas tabung sinar katoda. Bayangan yang tampak di atas layar menampilkan gambaran permukaan dari spesimen. Teknik SEM pada hakekatnya merupakan pemeriksaan dan analisis permukaan. Data yang diperoleh merupakan data dari permukaan atau lapisan yang tebalnya sekitar 20 μm dari permukaan. Gambar permukaan yang diperoleh merupakan topografi dengan segala tonjolan, lekukan dan lubang pada permukaan gambar topografi diperoleh dengan penangkapan elektron sekunder yang dipancarkan oleh spesimen [10].

Fungsi mikroskop elektron *scanning* atau SEM adalah dengan memindai terfokus balok halus elektron ke sampel. Elektron berinteraksi dengan sampel komposisi molekul. Energi dari elektron menuju ke sampel secara langsung dalam proporsi jenis interaksi elektron yang dihasilkan dari sampel. Serangkaian energi elektron terukur dapat dihasilkan yang dianalisis oleh sebuah mikroprosesor yang

canggih yang menciptakan gambar tiga dimensi atau spektrum elemen yang unik yang ada dalam sampel dianalisis. Ini adalah rangkaian elektron yang dibelokkan oleh tumbukan dengan elektron sampel. Sebelum menjelajahi jenis elektron dihasilkan oleh SEM khas, pemahaman dasar dari teori elemen yang dikelilingi diklasifikasikan tabel periodik perlu disebutkan.

Tergantung pada jenis informasi analisis yang tertarik pada jenis elektron satu studi. Setiap elektron yang dihasilkan dari berkas elektron primer yang dihasilkan oleh SEM ketika melanggar sampel yang diberikan menghasilkan elektron energi tertentu yang dapat diukur. Jenis-jenis elektron yang dihasilkan untuk setiap contoh yang diberikan perlu terlebih dahulu dieksplorasi. Elektron yang dihasilkan dari komposisi molekul sampel diklasifikasikan sebagai baik dan elektron inelastis elastis.

Elektron inelastik adalah elektron energi rendah dibelokkan dari sampel. Kebanyakan diserap oleh spesimen, tetapi mereka yang melarikan diri dekat permukaan. Elektron ini disebut elektron sekunder, yaitu energi elektron muncul kurang dari 50eV, 90% dari elektron sekunder memiliki energi kurang dari 10eV, sebagian besar dari 2 sampai 5 eV. Elektron sekunder memberikan informasi topografi permukaan dan putih, tiga dimensi gambar hitam sampel. Ini adalah gambar paling umum kebanyakan orang mengasosiasikan dengan SEM. Elektron elastis adalah setiap elektron yang berinteraksi dengan berkas elektron utama untuk menghasilkan energi spesifik dari tabrakan dan menahan sebagian besar energinya.

Sebuah SEM khas memiliki kemampuan untuk menganalisa suatu sampel tertentu menggunakan salah satu metode yang disebutkan di atas. Sayangnya, setiap jenis analisis dianggap merupakan tambahan perangkat aksesori untuk SEM. Yang paling umum aksesori dilengkapi dengan SEM adalah dispersif energi x-ray detektor atau EDX (kadang-kadang disebut sebagai EDS). Jenis detektor memungkinkan pengguna untuk menganalisis sampel komposisi molekul.

Prinsip kerja SEM yaitu bermula dari *electron beam* yang dihasilkan oleh sebuah filamen pada *electron gun*. Pada umumnya *electron gun* yang digunakan adalah *tungsten hairpin gun* dengan filamen berupa lilitan *tungsten* yang berfungsi sebagai katoda. Tegangan diberikan kepada lilitan yang mengakibatkan terjadinya pemanasan. Anoda kemudian akan membentuk gaya yang dapat menarik elektron melaju menuju ke anoda. Kemudian *electron beam* difokuskan ke suatu titik pada permukaan sampel dengan menggunakan dua buah *condenser lens*. *Condenser lens* kedua (atau biasa disebut dengan lensa objektif) memfokuskan beam dengan diameter yang sangat kecil, yaitu sekitar 10-20nm. Hamburan elektron, baik *Secondary Electron* (SE) atau *Back Scattered Electron* (BSE) dari permukaan sampel akan dideteksi oleh detektor dan dimunculkan dalam bentuk gambar pada layar CRT [10].

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Pengambilan data penelitian dilaksanakan di laboratorium Sentra Teknologi Polimer (STP), Balai Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan, pada bulan Maret hingga bulan Juli 2017.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

- a. ekstruder *Twin Screw*
- b. mesin *Injection Molding*
- c. *roller*
- d. *water bath*
- e. *pelletizer*
- f. neraca
- g. *oven*

3.2.2 Bahan

- a. *Polyethylene Terephthalate* (PET) (SKY PET BL-8050 produksi SK Keris IV : 0.80 dl/g)
- b. *High Density Polyethylene* (HDPE) (HD5301AA produksi Lotte Titan Chemical)
- c. *Polyethylene-graft-Maleic Anhydride* (PE-g-MA) (*Polyethylene-graft-Maleic Anhydride* produksi Sigma-Aldrich viskositas 500 cP 140°C)
- d. air

3.3 Variabel

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi proses pembuatan komposit mikrofibril antara lain, perbandingan massa HDPE dan PET, temperatur, kecepatan penarikan. Namun karena keterbatasan waktu maka variabel yang diamati adalah temperatur, kecepatan penarikan, dan penambahan kompatibiliser. Variasi temperatur

air pada proses *cool drawing* dilakukan untuk mengetahui perbedaan sifat mekanik yang dihasilkan dari pembuatan komposit mikrofibril. Penggunaan variasi temperatur dan kecepatan penarikan dilakukan agar menemukan kondisi

yang terbaik pada produksi komposit mikrofibril. Mengenai variasi yang dilakukan pada penelitian ini untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3.1 tentang matriks penelitian.

Tabel 3.1 Matriks Penelitian PET-HDPE

Rasio Kecepatan Putaran Roller	Temperatur Air Cool Drawing (°C)
1:2	75
	80
	85
1:3	75
	80
	85
1:4	75
	80
	85
1:5	75
	80
	85

Setelah melakukan percobaan dengan menggunakan pencampuran polimer PET-HDPE yang dipengaruhi temperatur dan perbandingan kecepatan penarikan maka, dilakukan percobaan pencampuran polimer PET-HDPE yang ditambahkan dengan kompatibiliser PE-g-MA dengan dipengaruhi temperatur air pada proses *cool drawing*. Mengenai variasi yang dilakukan pada penelitian ini untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3.2 tentang matriks penelitian PET-HDPE-PE-g-MA.

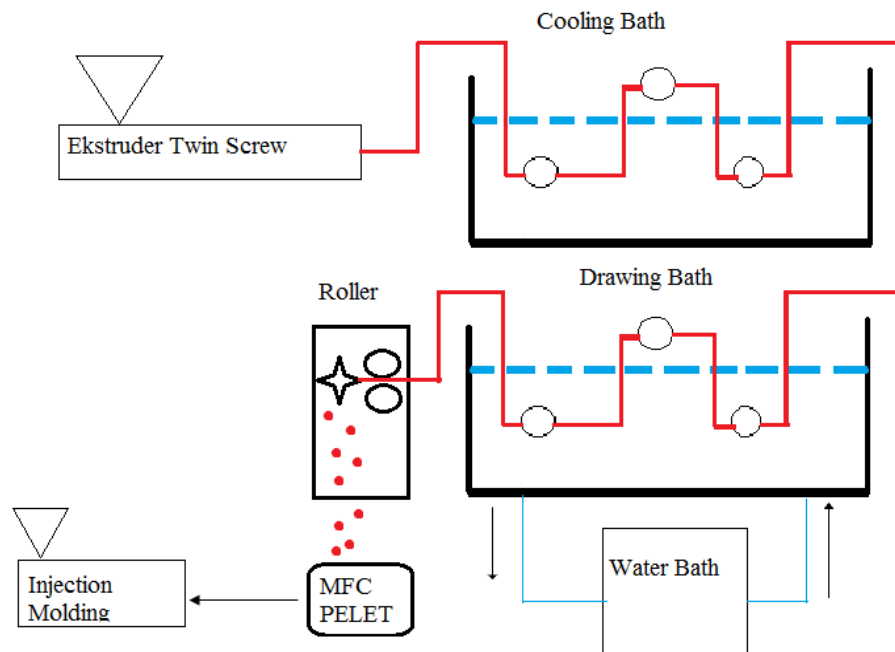
Tabel 3.2 Matriks Penelitian PET-HDPE-PE-g-MA.

% Berat PE-g-MA	Rasio Kecepatan Putaran Roller	Temperatur Air Cool Drawing (°C)
3	1:2	75
		80
		85

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan untuk menyelesaikan pengambilan data, sehingga mendapatkan hasil yang diharapkan melalui beberapa tahapan, yaitu

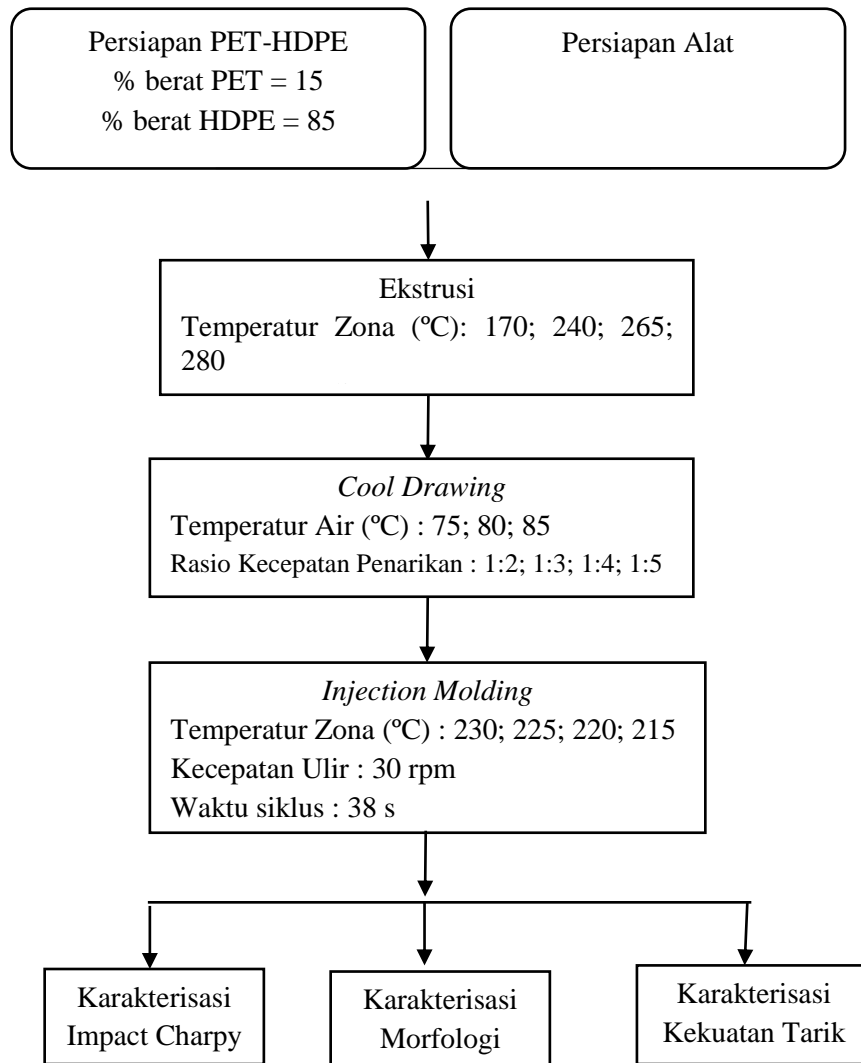
persiapan bahan baku, pencampuran polimer PET-HDPE dan penarikan untuk pembentukan mikrofibril serta pengujian spesimen untuk diuji karakterisasi sifat mekaniknya, dimana sampai tahapan ini akan didapatkan kondisi paling baik produksi komposit mikrofibril. Berikut adalah rancangan penelitian yang akan digunakan:



Gambar 3.1 Rancangan Penelitian

Pada gambar 3.1 ini menjelaskan skema atau rancangan penelitian yang akan dipakai pada penelitian komposit mikrofibril. Dalam skema dijelaskan bahwa bahan baku akan memasuki tahap pencampuran dengan ekstruder jenis twin screw, lalu hasil akan keluar melalui die dan masuk ke bak penampungan air yang bertujuan untuk pendinginan pada hasil pencampuran tersebut. Kemudian setelah memasuki bak penampungan air, lalu memasuki bak penampungan kedua dimana pada bak penampungan kedua ini terdapat air yang suhunya bervariasi. Dengan ini bertujuan untuk dilakukannya penarikan PET yang pada temperatur lebih dari 60°C ini, PET bersifat *rubber* yaitu mudah untuk dibentuk memanjang dan lentur seperti karet.

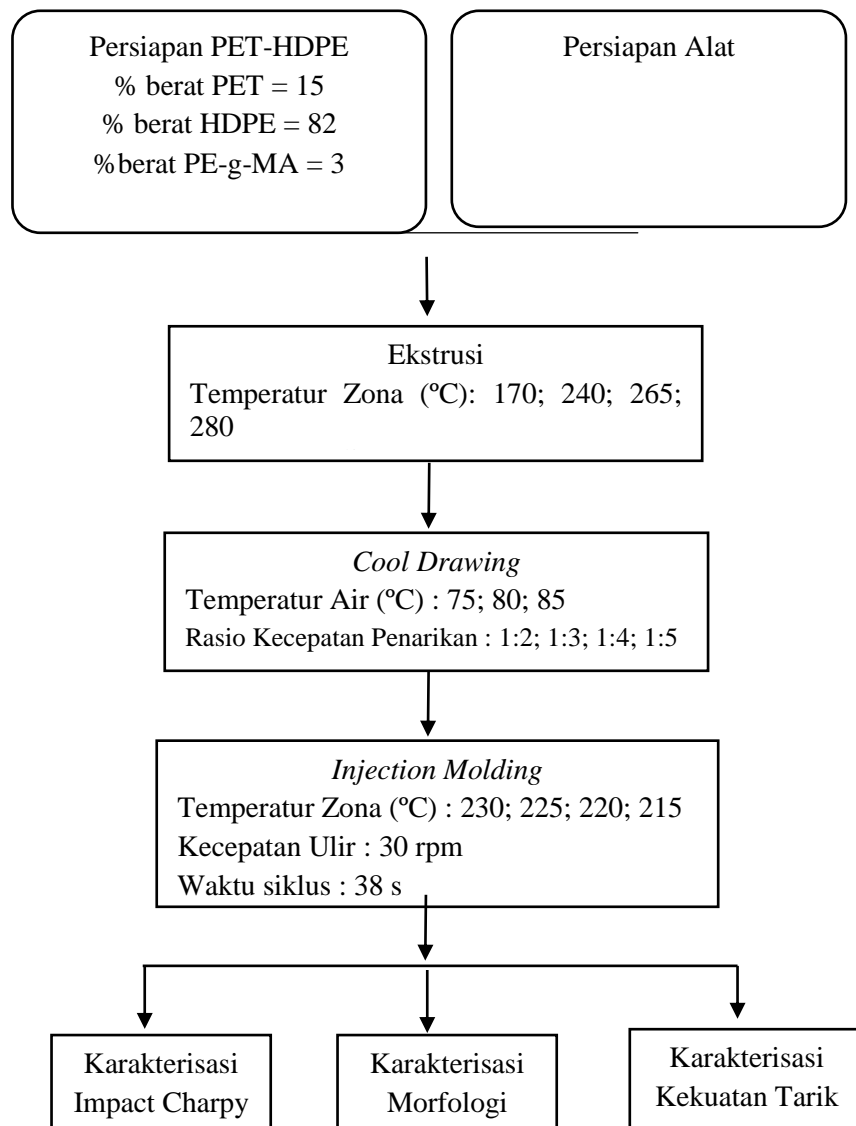
Kemudian setelah itu, memasuki alat *roller* yang bertujuan untuk memotong komposit menjadi pelet. Setelah berbentuk pelet dikeringkan selama sehari dan dibuat specimen tulang anjing (*dog bone*) untuk dikarakterisasi sifat mekanik komposit. Untuk lebih jelasnya, berikut ini tahapan – tahapan penelitian yang akan dilakukan:



Gambar 3.2 Tahapan Penelitian Komposit Mikrofibribil PET-HDPE

Gambar 3.2 menjelaskan pembuatan komposit mikrofibribil terbagi dalam beberapa tahap yaitu, tahap persiapan bahan baku PET/HDPE, tahap pencampuran,

tahap pembentukan fibril, tahap pembentukan pelet, tahap pembentukan spesimen dan tahap pengujian. Selanjutnya, dianalisis hasil pengujian sifat mekanik komposit mikrofibril tersebut dan pada kondisi yang terbaik sifat mekanik tersebut akan dicampurkan dengan *compatibilizer* PE-g-MA. Berikut tahapan penelitian pencampuran komposit mikrofibril PET/HDPE/PE-g-MA.



Gambar 3.3 Tahapan Penelitian Komposit Mikrofibril dengan PE-g-MA

Gambar 3.3 menjelaskan pembuatan komposit mikrofibril terbagi dalam beberapa tahap yaitu, tahap persiapan bahan baku PET/HDPE/PE-g-MA, tahap

pencampuran, tahap pembentukan fibril, tahap pembentukan pelet, tahap pembentukan spesimen dan tahap pengujian. Tahap-tahap tersebut akan dijelaskan dalam langkah-langkah penelitian.

3.4.1 Persiapan Bahan Baku PET/HDPE/PE-g-MA

PET merupakan termoplastik yang digunakan pada penelitian ini sebagai penguat komposit mikrofibril. PET dipanaskan terlebih dahulu sebelum diekstrusi dengan temperatur 110°C selama 24 jam. Material *compatibilizer* dipanaskan terlebih dahulu dengan temperatur 80°C selama 1 jam.

3.4.2 Tahap Pencampuran

PET, HDPE, dan PE-g-MA yang sudah disiapkan langsung masuk ke proses ekstrusi dengan ekstruder ulir ganda (*twin screw*) dengan *setting* parameter temperatur zona 170, 240, 265 dan 280°C dengan kecepatan putaran 40rpm. Proses pencampuran material dilakukan selama satu kali.

3.4.3 Tahap Pembentukan Fibril

Tahap ini membentuk fibril di *cool drawing* dengan variasi temperatur yaitu 75, 80 dan 85°C. Untuk menjaga temperatur, digunakan alat pemanas yang disebut *waterbath*. Proses ini terjadi adanya penarikan kompon yang dihasilkan pada proses ekstrusi yang ditarik dengan variasi rasio kecepatan *roller* untuk penarikan 2, 3, 4, dan 5 kali lebih cepat dibanding kecepatan awal.

3.4.4 Tahap Pembentukan Pelet

Tahap ini serat/benang yang terbentuk pada *cool drawing* akan didistribusikan ke alat *pelletizer*. Serat ini akan dipotong-potong dan berubah wujud menjadi pelet yang nantinya akan dibuat spesimen melalui proses pencetakan.

3.4.5 Tahap Pembentukan Spesimen

Pelet MFC yang sudah dihasilkan pada proses peletisasi akan dibentuk spesimen dengan proses *injection molding* yang akan membentuk seperti tulang anjing (*dog bone*). Spesimen ini nantinya akan diuji dengan analisa karakterisasi

kekuatan tarik (*tensile strength*), kekuatan impak (*impact strength*), dan *scanning electron microscopy* (SEM).

3.5 Tahap Pengujian atau Karakterisasi

Pengujian atau karakterisasi sampel yang diuji untuk mengetahui sifat mekanik dari komposit mikrofibril. Pengujian yang akan diuji yaitu kekuatan tarik dan kekuatan impak.

3.5.1 Pengujian Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*)

Pengujian kuat tarik yang dilakukan mengacu pada standar pengujian ISO 527-2. Ukuran spesimen memiliki ketebalan sekitar 4 mm sesuai petunjuk pengujian ISO 527-2 tipe 1A, dimana sampel yang diuji dicetak dalam mesin *injection molding*. Sebelum diuji kuat tarik, sampel uji terlebih dahulu dikondisikan pada temperatur 23°C dengan kelembaban 50% selama 40 jam. Pengujian kuat tarik dilakukan pada kondisi temperatur ruang temperatur 24,3°C dan kelembaban relatif 55,5% dengan kecepatan tarik ditetapkan pada 20 mm/menit, nilai kuat tarik tercatat dalam sistem komputer yang dilengkapi grafik.

3.5.2 Pengujian Kekuatan Impak (*Impact Strength*)

Sampel uji dipreparasi dengan menggunakan mesin *injection molding* untuk mendapatkan dimensi yang sesuai untuk pengujian *impact charpy*. Sebelum diuji dilakukan sampel dikondisikan pada temperatur 23°C dengan kelembaban relatif 50% selama 48 jam. Pengujian dilakukan pada posisi *edgewise* dengan energi pendulum 7,5J dengan percepatan impak 2,9 m/det². Spesimen dalam pengujian *impact charpy* ini tidak memiliki *notch* karena pengujian ini mengacu pada ISO 179-1-2010 *charpy unnotched impact strength*. Kondisi ruang pada saat pengujian dilakukan adalah temperatur 24,2°C dan kelembaban relatif 54%.

3.5.3 Analisis Morfologi menggunakan SEM

Sampel uji yang diamati menggunakan SEM terdapat dua jenis yaitu sampel hasil patahan dari uji kekuatan tarik (UTM) dan pengamatan sampel bentuk spesimen *dogbone*. Sampel uji sebelumnya dipotong kecil dengan ukuran

(0,5x0,5)cm. Sampel kemudian dietsa dengan pelarut *xylene* panas pada suhu 130°C selama 10 jam. Selanjutnya sampel dilapisi dengan logam emas (Au) selama 100 detik.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposit yang dihasilkan pada penelitian ini diuji dengan beberapa pengujian untuk mengetahui karakteristik komposit PET/HDPE. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah uji sifat mekanik yang meliputi uji kekuatan tarik dan uji kekuatan impak serta uji morfologi menggunakan alat SEM.

4.1 Pengujian Kekuatan Tarik

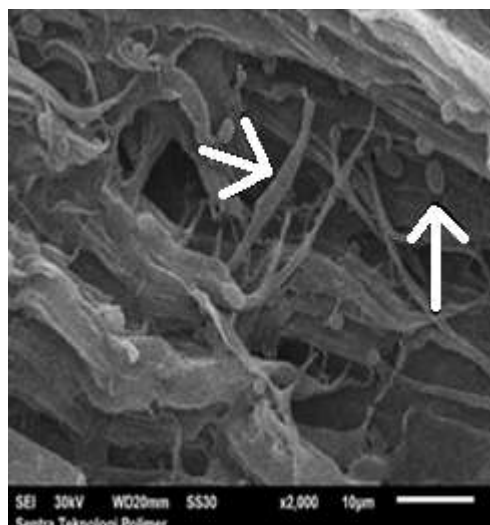
Kekuatan tarik adalah salah satu sifat dasar dari suatu bahan. Untuk mengetahui hasil pembuatan komposit PET/HDPE telah dilakukan uji tensil dari beberapa parameter yang telah dibuat dalam penelitian ini. Hasil pengujian tensil komposit PET/HDPE dapat dilihat pada tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Kekuatan Tarik

Sampel	Massa PET/HDPE (%)	Temperatur Air (°C)	Rasio Kecepatan Penarikan	Kekuatan Tarik (MPa)
1	15/85	75	1:2	22,05
2	15/85	75	1:3	21,58
3	15/85	75	1:4	21,44
4	15/85	75	1:5	21,92
5	15/85	80	1:2	23,71
6	15/85	80	1:3	22,90
7	15/85	80	1:4	22,72
8	15/85	80	1:5	23,08
9	15/85	85	1:2	24,60
10	15/85	85	1:3	24,02
11	15/85	85	1:4	24,13
12	15/85	85	1:5	24,00
13	HDPE	–	–	21,03
14	PET	–	–	53,07

Tabel 4.1 menunjukkan nilai kekuatan tarik komposit dari masing-masing variasi. Nilai kekuatan tarik yang dihasilkan adalah nilai rata-rata dari lima spesimen yang diuji. Kemudian, data hasil uji kekuatan tarik dianalisa berdasarkan pengaruh dari masing-masing variasi, seperti pengaruh temperatur serta rasio kecepatan awal dan akhir penarikan.

Dari hasil uji tarik tabel 4.1 terlihat bahwa nilai kekuatan tarik komposit PET/HDPE yang dihasilkan, secara umum masih rendah dari nilai tensile PET murni. Hal ini dimungkinkan karena campuran PET-HDPE tidak tercampur secara kompatibel sehingga peningkatan kekuatan tarik yang dihasilkan tidak meningkatkan kekuatan mekaniknya. Campuran antara PET yang bersifat polar dan HDPE bersifat non polar tidak dapat bercampur secara *miscible*, inilah yang mengakibatkan kekuatan mekanik menjadi menurun dibandingkan dengan kekuatan mekanik PET murni.

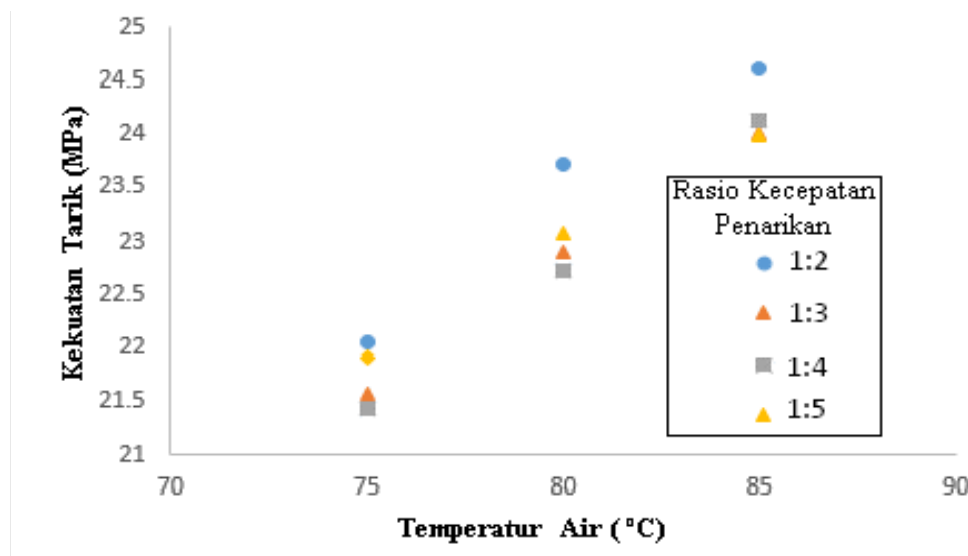


Gambar 4.1 Foto SEM Sampel Komposit Mikrofibril PET-HDPE pada Spesimen Uji *Dogbone* dengan Perbesaran 2000 kali

Gambar 4.3 terlihat bahwa struktur mikro PET dalam campuran PET-HDPE yang terbentuk tidak terlalu banyak seperti yang diharapkan tetapi berbentuk *droplet* (bulatan-bulatan kecil) PET. Namun sifat mekanik campuran PET-HDPE secara umum meningkat bila dibandingkan dengan HDPE murni. Tidak banyak

terbentuknya *fiber* dalam pencampuran ini dimungkinkan karena selama proses ekstrusi kurang mengalami penarikan sehingga orientasi polimer PET dari *droplet* menjadi benang tidak terjadi karena kedua bahan memiliki kepolaran yang berbeda dan ikatan antara matriks dengan pengisi tidak kompatibel atau *immiscible*.

4.1.1 Pengaruh Temperatur

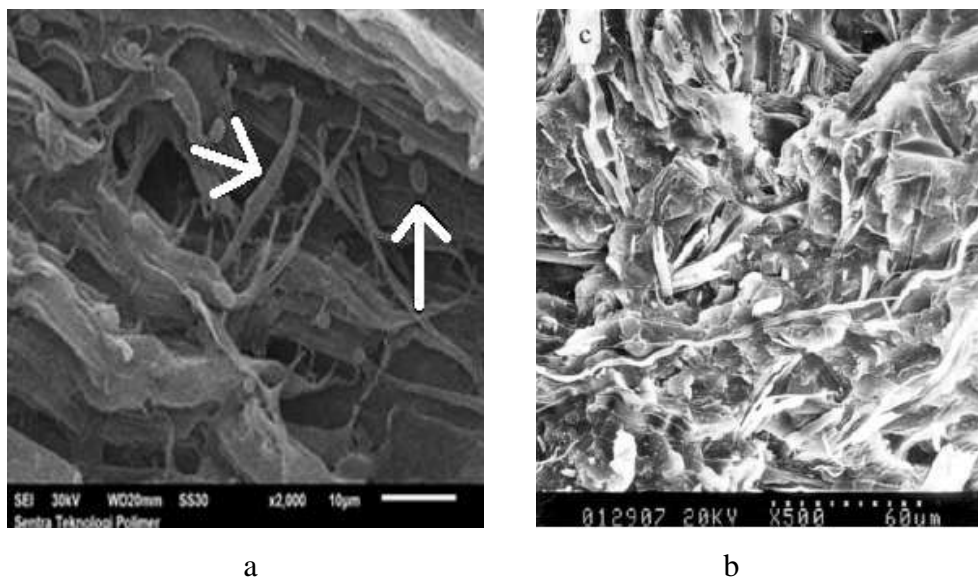


Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Tarik Komposit PET-HDPE

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa pengaruh temperatur terhadap kekuatan tarik komposit PET-HDPE mengalami peningkatan dan penurunan pada kondisi operasi tertentu. Peningkatan nilai kekuatan tarik terjadi pada kondisi operasi penarikan dua kali dari penarikan awal. Hal ini dipengaruhi oleh temperatur yang tinggi sehingga PET mudah untuk dibentuk fibril. Sedangkan, penurunan nilai kekuatan tarik ditemukan pada kondisi operasi kecepatan penarikan empat kali lebih cepat dari kecepatan awal. Penurunan nilai kekuatan tarik disebabkan oleh semakin rendahnya temperatur yang pada kondisi tersebut memiliki peluang untuk membentuk fibril yang rendah. Berdasarkan Gambar 4.1 nilai kekuatan tarik terbaik

yang dihasilkan pada kondisi temperatur air 85°C dan kecepatan penarikan dua kali lebih cepat dari kecepatan awal dengan nilai yaitu sebesar 24,6 MPa.

Data di atas bila dibandingkan dengan dengan kekuatan tarik dan modulus dari HDPE murni berada di atasnya. Secara teori penambahan PET dapat menambah kekuatan tarik dan dalam penelitian ini mengalami peningkatan kekuatan tarik. Namun dalam pencampuran polimer ini nilai kekuatan tarik lebih rendah dari PET murni. Ini disebabkan karena komposisi campuran HDPE lebih besar daripada PET dan campuran ini memiliki ikatan antara matriks dengan pengisi yang tidak kompatibel atau tidak tercampur secara homogen karena kedua bahan memiliki sifat kepolaran yang berbeda. Hal ini dapat dijelaskan pada analisa morfologi SEM pada campuran PET-HDPE (Gambar 4.2).

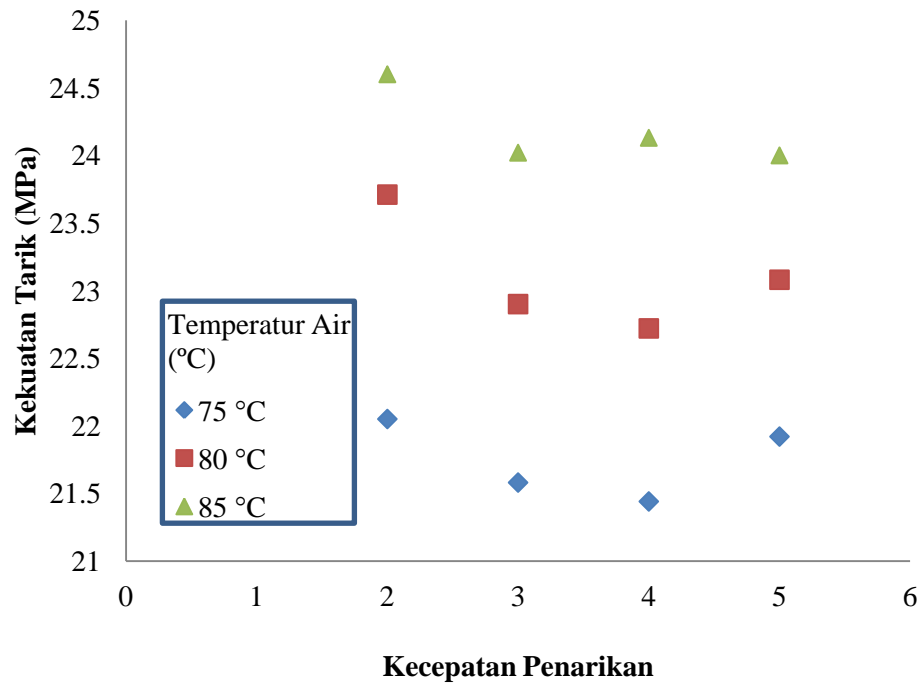


Gambar 4.3 Foto SEM Sampel Komposit Mikrofibril PET-HDPE pada Spesimen Uji *Dogbone* dengan Perbesaran 2000 kali:(a)Sampel 9 PET-HDPE, (b)Sampel PET-HDPE dari Jurnal *Poly(Ethylene Terephthalate)/Polyethylene Composite Based on in-situ*, Z. M. Li, M. B. Yang, R. Huang, dan W. Yang, 2014.

Gambar 4.3 terlihat bahwa struktur mikro PET dalam campuran PET-HDPE yang terbentuk tidak terlalu banyak seperti yang diharapkan tetapi berbentuk *droplet* (bulatan-bulatan kecil) PET. Namun sifat mekanik campuran PET-HDPE secara

umum meningkat bila dibandingkan dengan HDPE murni. Tidak banyak terbentuknya *fiber* dalam pencampuran ini dimungkinkan karena selama proses ekstrusi kurang mengalami penarikan sehingga orientasi polimer PET dari *droplet* menjadi benang tidak terjadi karena kedua bahan memiliki kepolaran yang berbeda dan ikatan antara matriks dengan pengisi tidak kompatibel atau *immiscible*. Bila dibandingkan dengan hasil gambar SEM yang terdapat pada jurnal terkait hampir sama, terbentuknya serat berukuran mikro dan masih terdapat butiran-butiran kecil dalam komposit mikrofibril tersebut. Sifat mekanik *tensile strength* pada sampel 9 PET-HDPE paling tinggi dibandingkan dengan sampel lainnya. Fenomena ini diterangkan dari Gambar 4.2 menyatakan bahwa pada sampel 9 PET-HDPE terbentuk *fiber* yang relatif banyak sehingga fiber ini sebagai penguat pada *blending* yang mengakibatkan sifat mekanik kuat tariknya menjadi besar. Pada sampel 3 PET-HDPE memiliki sifat mekanik kuat tarik paling kecil karena secara morfologi benang PET yang terbentuk lebih sedikit dan cenderung membentuk butiran-butiran bulat (*droplet*) sehingga menyebabkan sifat mekaniknya menjadi turun.

4.1.2 Pengaruh Kecepatan Akhir Penarikan



Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Kecepatan Akhir Penarikan terhadap Kekuatan Tarik Komposit PET-HDPE

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa pengaruh kecepatan penarikan akhir terhadap kekuatan tarik komposit PET-HDPE mengalami peningkatan dan penurunan pada kondisi operasi tertentu. Peningkatan nilai kekuatan tarik terjadi pada kondisi temperatur air 85°C. Hal ini dipengaruhi oleh kecepatan penarikan yang meningkat dua kali lebih cepat dari kecepatan awal sehingga penarikan lebih stabil dan teratur. Sedangkan penurunan nilai kekuatan tarik ditemukan pada kondisi temperatur air 75°C. Penurunan nilai kekuatan tarik disebabkan oleh semakin tingginya kecepatan penarikan maka penarikan komposit tidak stabil. Berdasarkan Gambar 4.3, nilai kekuatan tarik terbaik yang dihasilkan pada kondisi temperatur air 85°C dan kecepatan penarikan dua kali lebih cepat dari kecepatan awal dengan nilai yaitu sebesar 24,6 MPa. Hal ini dikarenakan proses pembentukan komposit lebih baik atau sedikit kompatibel karena penarikan pada temperatur yang tinggi lebih baik

pembentukan fibrilnya. Selain itu pada proses penarikan penarikan, penurunan temperatur pada pendinginannya tidak terlalu ekstrim sehingga bentuk struktur atau ikatan di dalam komposit tidak amorf.

4.2 Pengujian Kekuatan Impak

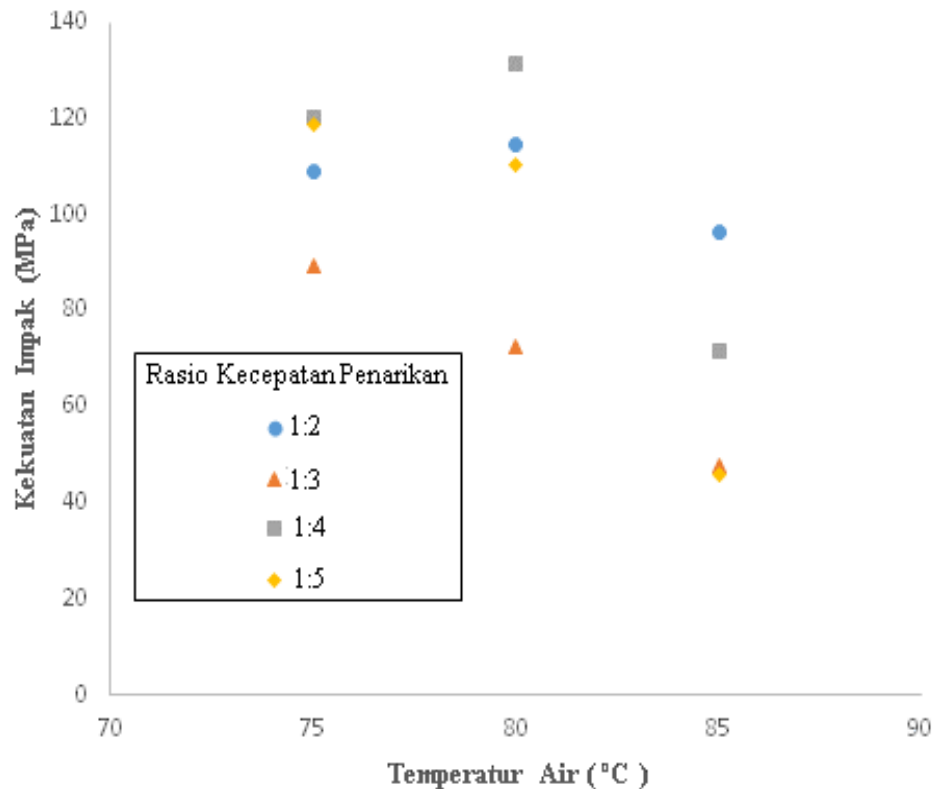
Kekuatan impak suatu material dapat diketahui dengan melakukan pengujian dengan uji impak terhadap material komposit tersebut. Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui ketangguhan suatu bahan.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kekuatan Impak

Sampel	Massa PET/HDPE (%)	Temperatur Air (°C)	Rasio Kecepatan Penarikan	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1	15/85	75	1:2	109,18
2	15/85	75	1:3	89,34
3	15/85	75	1:4	120,18
4	15/85	75	1:5	118,94
5	15/85	80	1:2	114,59
6	15/85	80	1:3	72,37
7	15/85	80	1:4	131,49
8	15/85	80	1:5	110,40
9	15/85	85	1:2	96,40
10	15/85	85	1:3	47,59
11	15/85	85	1:4	71,46
12	15/85	85	1:5	45,89
13.	HDPE	-	-	146,84
14.	PET	-	-	77,53

Tabel 4.2 menunjukkan nilai kekuatan impak komposit dari masing-masing variasi. Nilai kekuatan impak yang dihasilkan merupakan nilai rata-rata dari sepuluh spesimen yang diuji. Kemudian data hasil uji kekuatan impak dianalisa berdasarkan pengaruh dari masing-masing variasi, seperti temperatur dan kecepatan akhir penarikan. Penurunan dan kenaikan nilai impak disebabkan karena proses pencampuran yang tidak kompatibel antara matriks dengan pengisi yang memiliki perbedaan kepolaran kedua bahan. Selain itu, kandungan persen massa HDPE lebih banyak daripada PET sehingga kekuatan impak naik turun.

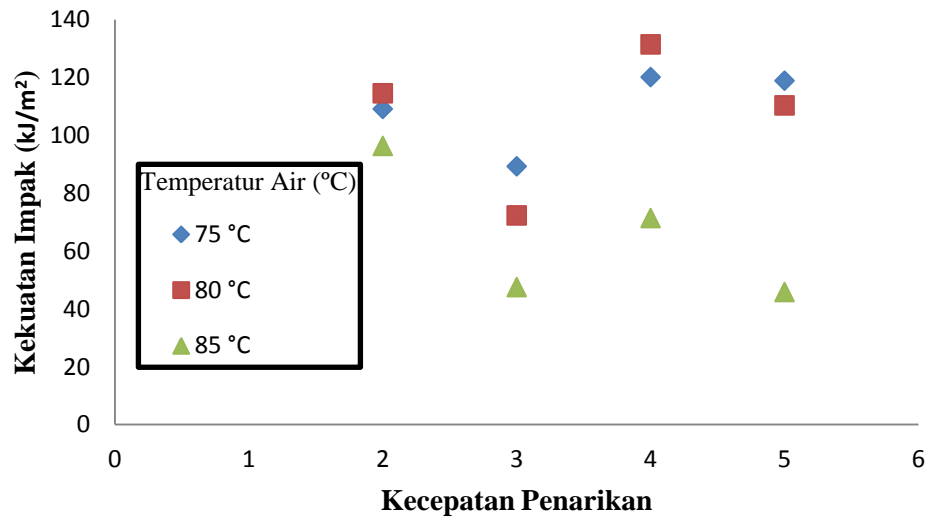
4.2.1 Pengaruh Temperatur



Gambar 4.5 Grafik Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Impak Komposit PET-HDPE

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa pengaruh temperatur terhadap kekuatan impact komposit PET-HDPE mengalami peningkatan dan penurunan pada kondisi operasi tertentu. Nilai kekuatan impact meningkat pada kondisi operasi dengan kecepatan akhir empat kali lebih cepat dari kecepatan awal. Sedangkan penurunan nilai kekuatan impact ditemukan pada kondisi operasi dengan kecepatan lima kali lebih cepat dari kecepatan awal. Nilai kekuatan impact terbaik ditemukan pada kondisi operasi temperatur air 80°C dan kecepatan penarikan empat kali lebih cepat dari kecepatan awal dengan nilai kekuatan impact sebesar 131,9 kJ/m².

4.2.2 Pengaruh Kecepatan Penarikan Akhir



Gambar 4.6 Grafik Pengaruh Kecepatan Akhir Penarikan terhadap Kekuatan Impak Komposit PET-HDPE

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa pengaruh kecepatan penarikan terhadap kekuatan impak komposit PET-HDPE mengalami peningkatan dan penurunan pada kondisi operasi tertentu. Peningkatan nilai kekuatan impak banyak ditemukan pada kondisi operasi temperatur air 80°C. Sedangkan penurunan nilai kekuatan lentur banyak ditemukan pada kondisi operasi temperatur air 85°C. Nilai kekuatan impak terbaik ditemukan pada kondisi operasi temperatur air 80°C dan kecepatan penarikan empat kali lebih cepat dari kecepatan awal dengan nilai kekuatan impak sebesar 131,9kJ/m². Hal ini dikarenakan pencampuran polimer tidak kompatibel antara matriks dengan pengisi karena kedua bahan yang dicampurkan memiliki kepolaran yang berbeda. Selain itu kandungan persen massa HDPE lebih banyak dibandingkan persen massa PET sehingga kekuatan impak cenderung mendekati kekuatan impak HDPE murni walaupun tidak mengalami kenaikan dibandingkan dengan kekuatan impak HDPE murni.

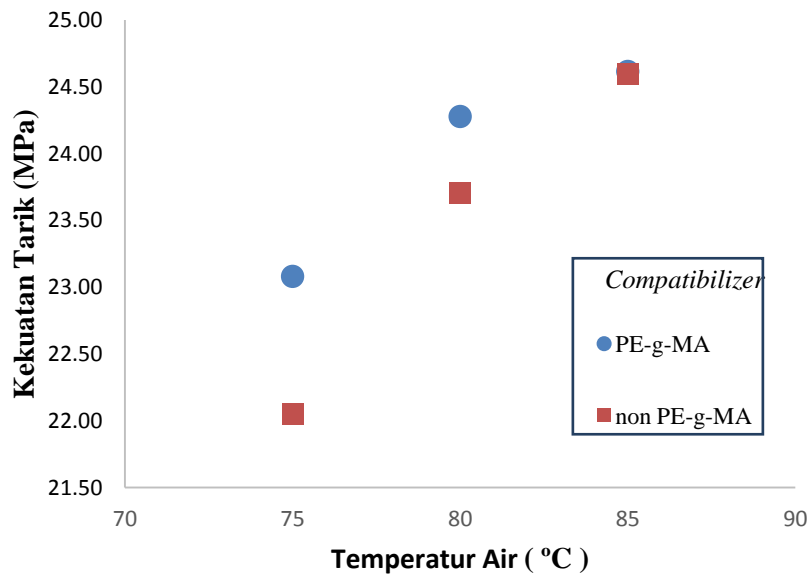
4.3 Pengaruh Penambahan *Compatibilizer* PE-g-MA terhadap Sifat Mekanik

Pada komposit mikrofibril dengan tidak ditambahkan *compatibilizer* memiliki sifat mekanik yang rendah. Hal ini dikarenakan, sifat PET yang polar dan sifat HDPE yang tidak polar, ketika dicampurkan menjadi campuran yang *immiscible*. Akibat dari campuran yang *immiscible* ini, kekuatan tarik dan kekuatan impact berbanding terbalik. Oleh karena itu, polimer PET dan HDPE dicampurkan dengan PE-g-MA agar memperoleh hasil sifat mekanik yang baik. Fungsi adanya *compatibilizer* ini untuk mengikat matriks dan fibril yang sulit tercampur karena ada perbedaan sifat dari kedua bahan. Sifat kekuatan tarik pada campuran yang sudah ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA mengalami peningkatan dibandingkan dengan sebelum ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA. Ini dikarenakan penambahan *compatibilizer* dapat mengikat kedua bahan yang sifatnya berbeda menjadi campuran yang homogen sehingga kekuatan tariknya meningkat. Tabel 4.3 menjelaskan perbedaan hasil penelitian pencampuran polimer PET-HDPE dengan ditambahkan dan tidak ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA.

Tabel 4.3 Pengaruh Penambahan PE-g-MA pada Komposit PET-HDPE

Sampel	Massa PET/HDPE (%)	Massa PE-g-MA (%)	Temperatur Air (°C)	Rasio Kecepatan Penarikan	Kekutan Tarik (MPa)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1	15/85	–	75	1:2	22,05	109,18
2	15/85	–	75	1:2	23,71	89,34
3	15/85	–	75	1:2	24,60	120,18
4	15/85	3	75	1:2	23,08	118,94
5	15/85	3	80	1:2	24,28	114,59
6	15/85	3	80	1:2	24,62	72,37

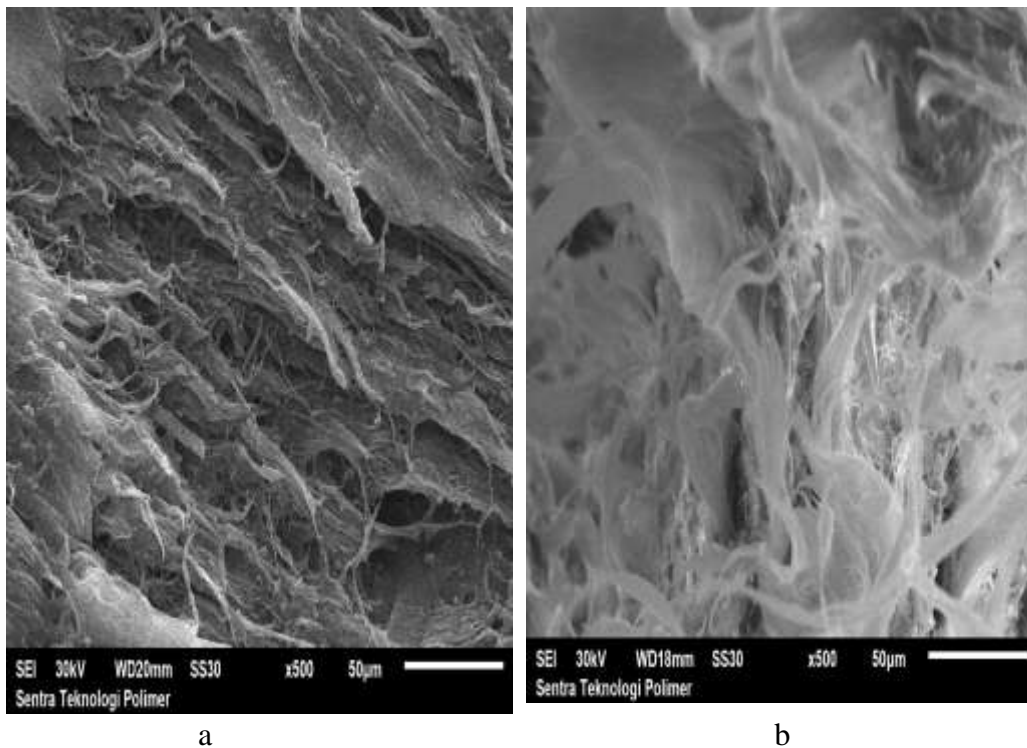
4.3.1 Pengujian Kekuatan Tarik



Gambar 4.7 Grafik Pengaruh Penambahan *Compatibilizer* PE-g-MA terhadap Kekuatan Tarik Komposit Mikrofibril

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa pengaruh penambahan *compatibilizer* dan tidak ada penambahan *compatibilizer* PE-g-MA terhadap kekuatan tarik komposit PET-HDPE mengalami perbedaan. Dalam penambahan PE-g-MA dapat meningkatkan kekuatan tarik komposit mikrofibril dari yang sebelum ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA. Hal ini dikarenakan, campuran tersebut menjadi tercampur secara merata dimana rantai polimer PET dan HDPE saling mengikat karena adanya penambahan *compatibilizer* tersebut. Sifat kekuatan tarik yang paling baik pada kondisi temperatur air 85°C.

Data di atas bila dibandingkan dengan kekuatan tarik campuran PET-HDPE murni berada di atasnya. Secara teori penambahan PE-g-MA dapat menambah kekuatan tarik dan dalam penelitian ini mengalami peningkatan kekuatan tarik. Hal ini dapat dijelaskan pada analisa morfologi SEM pada campuran PET-HDPE (Gambar 4.8).

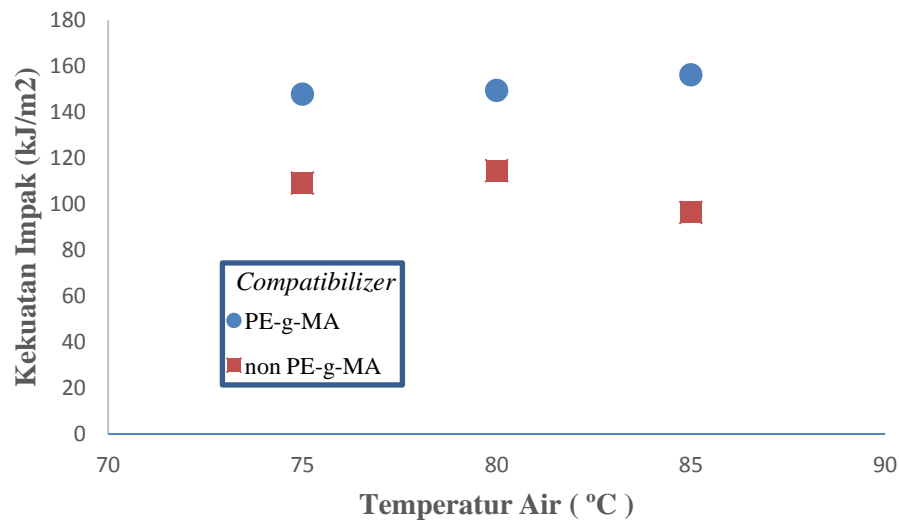


Gambar 4.8 Foto SEM Sampel Komposit Mikrofibril PET-HDPE pada Spesimen Uji *Dogbone* dengan Perbesaran 500 kali: (a)Sampel PET-HDPE non-PE-g-MA, (b)Sampel PET-HDPE dengan PE-g-MA

Gambar 4.8 terlihat bahwa struktur mikro PET dalam campuran PET-HDPE yang sudah ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA dapat memberikan interaksi yang lebih kompatibel antara matriks dengan fibril dibandingkan dengan sebelum ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA yang banyak berbentuk *droplet* (bulatan-bulatan kecil) PET. Sehingga sifat mekanik kekuatan tarik campuran PET-HDPE yang ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA meningkat bila dibandingkan dengan campuran PET-HDPE yang belum ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA. Fenomena

ini diterangkan dari Gambar 4.7 menyatakan bahwa pada sampel PET-HDPE dengan menggunakan *compatibilizer* PE-g-MA terbentuk *fiber* yang relatif banyak sehingga fiber ini sebagai penguat pada *blending* yang mengakibatkan sifat mekanik kuat tariknya menjadi besar. Pada sampel PET-HDPE yang tidak ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA memiliki sifat mekanik kuat tarik paling kecil karena secara morfologi benang PET yang terbentuk lebih sedikit dan cenderung membentuk butiran-butiran bulat (*droplet*) sehingga menyebabkan sifat mekaniknya menjadi turun

4.3.2 Pengujian Kekuatan Impak



Gambar 4.9 Grafik Pengaruh Penambahan *Compatibilizer* PE-g-MA terhadap Kekuatan Impak Komposit Mikrofibril

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa pengaruh penambahan *compatibilizer* dan tidak ada penambahan *compatibilizer* PE-g-MA terhadap kekuatan impak komposit PET-HDPE mengalami perbedaan. Dalam penambahan PE-g-MA dapat meningkatkan kekuatan impak komposit mikrofibril dari yang sebelum ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA. Hal ini dikarenakan, campuran tersebut menjadi tercampur secara merata dimana rantai polimer PET dan HDPE saling mengikat karena adanya

penambahan *compatibilizer* tersebut. Sifat kekuatan impak yang paling baik pada kondisi temperatur air 85°C. Dengan adanya penambahan *compatibilizer* ini dapat meningkatkan sifat kekuatan tarik dan kekuatan impak dibandingkan dengan sebelum ditambahkan *compatibilizer*, dimana pada kondisi yang sebelum ditambahkan *compatibilizer* kedua sifat saling berbanding terbalik.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian serta analisis data, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. temperatur mempengaruhi nilai kekuatan tarik dan impak komposit mikrofibril, semakin tinggi temperatur dapat meningkatkan kekuatan tarik komposit mikrofibril, namun dapat menurunkan kekuatan impak komposit mikrofibril. Kecepatan penarikan memiliki pengaruh meningkatkan serta menurunkan kekuatan tarik dan impak komposit mikrofibril tergantung kepada kondisi operasi tertentu.
2. penambahan *compatibilizer* PE-g-MA mempengaruhi nilai kekuatan tarik dan impak komposit mikrofibril. Dengan ditambahkan *compatibilizer* PE-g-MA, nilai kekuatan tarik meningkat dan kekuatan impaknya meningkat juga dibandingkan sebelum ditambahkan PE-g-MA yang kekuatan impaknya cenderung menurun.

5.2 Saran

Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik lagi penulis menyarankan terkait pelaksanaan penelitian, yaitu digunakan temperatur air pada proses penarikan antara 75°C sampai 80°C, karena hasil kekuatan tarik dan impak komposit tidak menunjukkan hasil yang lebih baik pada temperatur diatas 80°C.

DAFTAR PUSTAKA

1. Evstatiev, M., Fakirov, S. 1992: *Microfibrillar Reinforcement of Polymer Blends*. *Polymer* 33.
2. Elias L, Fenouillot F, Majeste J.C., Alcouffe P, Cassagnau P. 2008. *Immiscible Polymer Blends Stabilized with Nano-Silica Particles: Rheology and Effective Interfacial Tension*, *Polymer*, 49, 4378–4385.
3. Shields, R. J., Bhattacharyya D., Fakirov, S. 2008. *Oxygen Permeability Analysis of Microfibril Reinforced Composites from PE/PET Blends*. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing* 39, pp. 940-949.
4. Kalfoglou, N. K., Kallitsis, J. K., Lambert, J. C., Vanderstappen, L., Skafidas D. S. 1995 : *Comparison of Compatibilizer Effectiveness for PET/HDPE Blends*. *Polymer* 36
5. Kim DH, Park KY, Kim JY, Suh KD. 2000. *Improved Compatibility of High-Density Polyethylene/ Poly(Ethylene Terephthalate) Blend by the use of Blocked Isocyanate Group*.
6. Pawlak A, Perkins WG, Massey FL, Hiltner A, Baer E. 1999. *Mechanical properties of poly(ethylene terephthalate) modified with functionalized polymers*.
7. Pracella M, Rolla L, Chionna D, Galeski A. 2002. *Compatibilization and Properties of Poly(Ethylene Terephthalate)/Polyethylene Blends Based on Recycled Materials*.
8. Jarukumjorn K, Chareunkvun S. 2006. *Compatibilization of Recycled High Density Polyethylene (HDPE)/Polyethylene Terephthalate (PET) Blends*.
9. Kratofil Ljerka,. 2014, *Study of Masterbatch Effect on Miscibility and Morphology in PET/ HDPE Blends*.
10. Yang. M. B, Li. Z. M. 2014, *Poly(Ethylene Terephthalate)/Polyethylene Composite Based on in-situ Microfiber Formation*.
11. Avila, A. F., Duarte, M. V. 2003. : *A Mechanical Analysis on Recycled PET/HDPE Composites*. *Polymer Degradation and Stability* 80, pp. 373-382.

12. Lange, B. J., Wyser Y. 2003. : *Recent Innovations in Barrier Technologies for Plastic Packaging-a Review*. Packaging Technology and Science 16, pp. 149-158.
13. Mark, H. F. 2005. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, New York : John Wiley & Sons.
14. Koning, C., Van Duin, M., Pagnoulle, C., Jerome, R. 1998: *Strategies for Compatibilization of Polymer Blends*.
15. Wenjing Li, Alois K.Schlarb, Michael Evstatiev. 2009. *Study of PET/PP/TiO₂ Microfibrillar Structured Composites, Part 2: Morphology, and Mechanical Properties*. Journal of Applied Polymer Science, 113,3300-3306.
16. Wenjing Li, Alois K.Schlarb, Michael Evstatiev. 2009. *Influence of Processing Window and Weight Ratio on the Morphology of the Extruded and Drawn PET/PP Blends*. *Polymer Engineering and Science*, 49, 1929-1936.
17. Matthews, F.L dan Rawlings, RD.1993.*Composite Material Engineering And Science*, Imperial College Of Science, Technology And Medicine, London, UK.
18. K. van Rijswijk, M.Sc, et.al.2001.*Natural Fibre Composites Structures and Materials*. Laboratory Faculty of Aerospace Engineering Delft University of Technology.
19. Kim, J.G, Ilbeum C and Dai G.L..2011.*Flame and Silane Treatments For Improving The Adhesive Bonding Characteristics Of Aramid/Epoxy Composites, Composite Structures Vol. 93 2696–2705*. School of Mechanical Aerospace & System Engineering, Daejeon, Republic of Korea.
20. Shinichi Shibata, Yong Cao, Takuya Kamiyam and Isao Fukumoto.2006. *Lightweight Laminate Composite Made From Kenaf and Polypropylene Fibers*.Faculty of Engineering Department of Mechanical Systems Engineering. University of the Ryukyus.
21. Gibson, Ronald, 1994. *Principles of Composite Material Mechanics*. New York : Mc Graw Hill,Inc.
22. Matthews, F.L., Rawlings, RD., 1993, *Composite Material Engineering and Science*, Imperial College Of Science, Technology And Medicine, London, UK.
23. R.M. Jones, 1975, *Mechanics of Composite Material*, McGraw-Hil

kogakusha,LTD,Wangingthon D.C.

24. Gibson, Ronald, 1994. *Principles of Composite Material Mechanics*. New York : Mc Graw Hill,Inc.
25. Wenjing Li, Jozsef Karger-Kocsis, Ralf Thomann. 2009. *Compatibilization Effect of TiO₂ Nanoparticles on the Phase Structure of PET/PP/TiO₂ Nanocomposites*. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Vol. 47, 1616–1624.
26. Mayu Si, Tohru Araki, Harald Ade, A. L. D. Kilcoyne, Robert Fisher, Jonathan C. Sokolov, and Miriam H. Rafailovich. 2006. *Compatibilizing Bulk Polymer Blends by Using Organoclays*. *Macromolecules*, 39, 4793-4801.
27. Austin, J. R., Kontopoulou, M. 2006. *Effect of Organoclay Content on the Rheology, Morphology and Physical Properties of Polyolefin Elastomers and Their Blends with Polypropylene*. *Polymer Engineering and Science*, 46, 1491-1501.
28. Ke Wang, Cong Wang, Jiang Li, Juanxia Su, Qin Zhang, Rongni Du, Qiang Fu. 2007. *Effects of Clay on Phase Morphology and Mechanical Properties in Polyamide 6/EPDM-g-MA/Organoclay Ternary Nanocomposites*, *Polymer*, 48,2144-2154.
29. O.Evstatiev, M.Evstaiiev, K.Friedrich. 2005. *Effect of Compatibilizer on the Properties of Microfibrillar Reinforced Composites Based on PET and PP*, Report for Max Buchner Stiftung, Germany.
30. Zaeni, Akhmad. 2009. *Modification of Fly Ash Color from Grey Black to Near White and Incorporation of Fly Ash in Polypropylene Polymer*, Dissertation of Doctor in Philosophy in Material Science and Engineering, University of New South Wales, Australia
31. Li, Z. M., Yang, M. B., Huang, R. 2002: *Poly(Ethylene Terephthalate)/Polyethylene Composite Based on in-situ Microfiber formation*. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 41, pp. 19-32.
32. Fakirov, S., Kamo, H., Evstatiev, M., Friedrich, K. 2004. *Microfibrillar Reinforced Composites from PET/LDPE Blends: Morphology and Mechanical Properties*. *Journal of Macromolecular Science Part B: Physics* 43 , pp. 775-789.
33. Lin, X. D., Jia, D., Leung, F. K. P., Cheung, W. L. 2004. *Study on Poly(Ethylene*

- Terephthalate)/Polypropylene Microfibrillar Composites. II. Solid-State Drawing Behavior*. Journal of Applied Polymer Science 93, pp. 1989-2000.
34. Oktavia, D.A. 2007. Kajian SNI 01-2886-2000 *Makanan Ringan Ekstrudat*. Jurnal Standardisasi Vol. 9. No. 1. P 1 – 9
 35. Linko, P., Y.Y.Linko, J. Olkku. 1982. *Extrusion Cooking and Bioconversions dalam Ronald Jowitt (edt.). Extrusion Cooking Technology*. Elsevier Applied Science Publishers , London.
 36. Li, Z. M., Yang, W., Huang, R., Fang, X. P., Yang, M. B. 2004: *Essential Work of Fracture Parameters of in-situ Microfibrillar Poly(Ethylene Terephthalate)/Polyethylene Blend: Influences of Blend Composition*. Macromoleculer Materials and Engineering 289, pp. 426-433.
 37. Clegg, P. S. 2008: *Fluid-Bicontinuous Gels Stabilized by Interfacial Colloids: Low and High Molecular Weight Fluids*. Journal of Physics: Condensed Matter 20, pp. 113101.
 38. Standard Test Method for Determination of Tensile Properties -- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics, ISO 527-2:2010.
 39. *Plastics – Determination of Charpy Impact Strength – Part 1: Non – instrumented impact test*, ISO/DIS 179-1:2010.

Lampiran A
Gambar Alat dan Bahan yang Digunakan



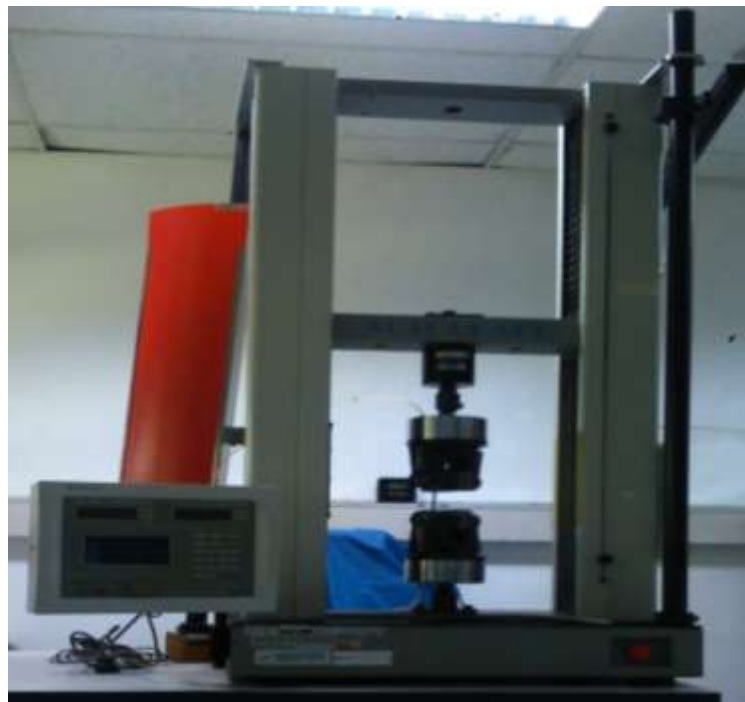
Mesin Ekstruder *Twin Screw*



Oven



Mesin *Injection Molding*



Alat Uji Kekuatan Tarik



Alat Uji Kekuatan Impak



Alat pemotong/Gerinda



Resin HDPE



Resin PET



Kompatibiliser (PE-g-MA)

PE-HD	
<100 °C	0.94 to 0.96 g/cm ³
150	(na)
(na)	(na)
(na)	(na)
1.55	
kJ/g	°C
MPa	*10 ³ K
J/(g·K)	
PET	
70 ⁽³⁾ to 80 °C	1.33 to 1.45 g/cm ³
250 to 260 °C	0.24 W/(m·K)
140	425
to	to
440	3100
°C	MPa
80	100
to	to
1.04	1.17
kJ/g	*10 ³ K
J/(g·K)	

Tabel Karakteristik PET

Tabel Karakteristik HDPE



Spesimen Untuk Uji *Impact Charpy*

LAMPIRAN C

Rumus menghitung kekuatan impak *charpy* pada setiap sampel.

$$\text{Kekuatan Impak (kJ/m}^2\text{)} = \frac{\text{Energi (J)} - \text{Faktor Koreksi (J)}}{\text{Tebal (mm)} \times \text{Lebar (mm)}} \times 1000$$

- Sampel 1 pada temperatur 75°C dengan kecepatan penarikan akhir 2 kali lebih cepat dari kecepatan awal.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,84	9,95	2,72	15	0,05	69,88
2.	3,83	9,90	3,21	15	0,05	83,34
3.	3,81	9,93	5,29	15	0,05	138,50
4.	3,89	9,91	2,40	15	0,05	60,96
5.	3,85	9,91	2,94	15	0,05	75,75
6.	3,82	9,95	3,07	15	0,05	79,45
7.	3,94	9,90	2,18	15	0,05	54,61
8.	3,87	9,94	2,52	15	0,05	64,21
9.	3,91	9,91	4,63	15	0,05	118,20
10.	3,91	9,92	5,81	15	0,05	148,50
Rata-rata						89,34

- Sampel 2 pada temperatur 75°C dengan kecepatan penarikan akhir 3 kali lebih cepat dari kecepatan awal.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,84	9,92	5,74	15	0,05	149,37
2.	3,84	9,93	7,10	15	0,05	184,89
3.	3,99	9,91	3,46	15	0,05	86,24
4.	3,87	9,94	3,54	15	0,05	90,73
5.	3,95	9,93	3,66	15	0,05	92,04
6.	3,86	9,94	2,70	15	0,05	69,07
7.	3,87	9,93	1,52	15	0,05	38,25

8.	3,91	9,89	2,95	15	0,05	74,99
No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
9.	3,92	9,92	5,23	15	0,05	133,21
10.	3,85	9,91	6,65	15	0,05	172,99
Rata-rata						109,18

- Sampel 3 pada temperatur 75°C dengan kecepatan penarikan akhir 4 kali lebih cepat dari kecepatan awal.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,92	9,93	6,15	15	0,05	156,71
2.	3,96	9,94	4,55	15	0,05	114,32
3.	3,87	9,93	3,42	15	0,05	87,69
4.	3,98	9,91	4,74	15	0,05	118,91
5.	3,80	9,91	1,84	15	0,05	47,53
6.	3,99	9,93	6,71	15	0,05	168,09
7.	3,91	9,91	6,57	15	0,05	168,27
8.	3,96	9,91	7,15	15	0,05	180,92
9.	3,99	9,91	3,00	15	0,05	74,61
10.	3,94	9,94	3,37	15	0,05	84,77
Rata-rata						120,18

- Sampel 4 pada temperatur 75°C dengan kecepatan penarikan akhir 5 kali lebih cepat dari kecepatan awal.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,88	9,93	1,14	7,5	0,02	29,07
2.	3,77	9,86	4,67	7,5	0,02	125,09
3.	3,92	9,92	5,72	7,5	0,02	146,58
4.	3,92	9,94	4,67	7,5	0,02	119,34
5.	3,82	9,90	4,34	7,5	0,02	114,23
6.	3,83	9,92	4,84	7,5	0,02	126,86
7.	3,90	9,94	4,79	7,5	0,02	123,05

8.	3,84	9,93	5,82	7,5	0,02	152,11
No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
9.	3,86	10,00	4,60	7,5	0,02	118,65
10.	3,88	9,91	5,19	7,5	0,02	134,46
Rata-rata						118,94

- Sampel 5 pada temperatur 80°C dengan kecepatan penarikan akhir 2 kali lebih cepat dari kecepatan awal.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,98	9,94	5,00	15	0,05	125,12
2.	3,81	9,92	1,98	15	0,05	51,06
3.	3,95	9,94	5,58	15	0,05	140,84
4.	3,97	9,95	2,36	15	0,05	58,48
5.	3,82	9,97	5,74	15	0,05	149,40
6.	3,94	9,94	3,18	15	0,05	79,92
7.	3,82	9,92	5,12	15	0,05	133,79
8.	3,89	9,93	5,33	15	0,05	136,69
9.	3,92	9,94	5,22	15	0,05	132,68
10.	3,90	9,91	5,38	15	0,05	137,91
Rata-rata						114,59

- Sampel 6 pada temperatur 80°C dengan kecepatan penarikan akhir 3 kali lebih cepat dari kecepatan awal.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,90	9,94	3,33	15	0,05	84,61
2.	3,90	9,96	3,84	15	0,05	97,57
3.	3,91	9,93	1,08	15	0,05	26,53
4.	3,88	9,95	5,55	15	0,05	142,46
5.	3,94	9,95	4,39	15	0,05	110,71
6.	3,94	9,95	0,92	15	0,05	22,19
7.	3,94	9,92	1,31	15	0,05	32,24

8.	3,91	9,94	1,80	15	0,05	45,03
No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
9.	3,90	9,93	3,17	15	0,05	80,56
10.	3,85	9,91	3,17	15	0,05	81,77
Rata-rata						72,37

- Sampel 7 pada temperatur 80°C dengan kecepatan penarikan akhir 4 kali lebih cepat dari kecepatan awal.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,92	9,94	5,84	15	0,05	148,60
2.	3,94	9,95	6,09	15	0,05	154,07
3.	3,90	9,92	5,03	15	0,05	128,72
4.	3,88	9,94	4,99	15	0,05	128,09
5.	3,81	9,92	5,09	15	0,05	133,35
6.	3,90	9,91	4,93	15	0,05	126,26
7.	3,86	9,92	5,31	15	0,05	137,37
8.	3,91	9,91	4,89	15	0,05	124,91
9.	3,90	9,95	5,33	15	0,05	136,06
10.	3,94	9,92	3,86	15	0,05	97,48
Rata-rata						131,49

- Sampel 8 pada temperatur 80°C dengan kecepatan penarikan akhir 5 kali lebih cepat dari kecepatan awal.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,78	9,93	5,44	15	0,05	143,60
2.	3,81	9,93	4,12	15	0,05	107,58
3.	3,91	9,92	5,59	15	0,05	142,83
4.	3,94	9,92	5,47	15	0,05	138,67
5.	3,86	9,94	5,49	15	0,05	141,78
6.	3,87	9,96	2,15	15	0,05	54,48
7.	3,93	9,92	1,80	15	0,05	44,89

8.	3,89	9,94	2,72	15	0,05	69,05
No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
9.	3,98	9,92	6,26	15	0,05	157,29
10.	3,91	9,93	4,08	15	0,05	103,79
Rata-rata						110,40

- Sampel 9 pada temperatur 85°C dengan kecepatan penarikan akhir 2 kali lebih cepat dari kecepatan awal.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,84	9,92	1,70	7,5	0,02	44,10
2.	3,91	9,98	1,74	7,5	0,02	44,08
3.	3,91	9,93	4,42	7,5	0,02	113,33
4.	3,87	9,93	5,12	7,5	0,02	132,71
5.	3,96	9,91	2,41	7,5	0,02	60,90
6.	3,85	9,96	5,40	7,5	0,02	140,30
7.	3,91	9,94	5,60	7,5	0,02	143,57
8.	3,93	9,93	1,34	7,5	0,02	33,82
9.	3,94	9,91	4,99	7,5	0,02	127,29
10.	3,85	9,96	4,77	7,5	0,02	123,87
Rata-rata						96,40

- Sampel 10 pada temperatur 85°C dengan kecepatan penarikan akhir 3 kali lebih cepat dari kecepatan awal.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,98	9,93	2,23	15	0,05	55,16
2.	3,90	9,92	1,88	15	0,05	47,30
3.	3,92	9,93	2,96	15	0,05	74,76
4.	3,84	9,95	3,20	15	0,05	82,44
5.	3,89	9,93	0,74	15	0,05	17,86
6.	3,83	9,96	1,17	15	0,05	29,36
7.	3,95	9,94	3,01	15	0,05	75,39

8.	3,94	9,93	1,15	15	0,05	28,12
No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
9.	3,91	9,92	1,55	15	0,05	38,67
10.	3,83	9,93	1,07	15	0,05	26,82
Rata-rata						47,59

- Sampel 11 pada temperatur 85°C dengan kecepatan penarikan akhir 4 kali lebih cepat dari kecepatan awal.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,87	9,96	1,58	7,5	0,02	40,47
2.	3,84	9,93	1,67	7,5	0,02	43,27
3.	3,89	9,96	3,43	7,5	0,02	88,01
4.	3,80	9,93	1,87	7,5	0,02	49,03
5.	3,94	9,92	4,01	7,5	0,02	102,09
6.	3,87	9,91	5,11	7,5	0,02	132,72
7.	3,84	9,93	2,02	7,5	0,02	52,45
8.	3,91	9,92	1,83	7,5	0,02	46,66
9.	3,90	9,95	4,54	7,5	0,02	116,48
10.	3,89	9,95	1,70	7,5	0,02	43,40
Rata-rata						71,46

- Sampel 12 pada temperatur 85°C dengan kecepatan penarikan akhir 5 kali lebih cepat dari kecepatan awal.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	Hammer (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,93	9,92	1,71	15	0,05	42,58
2.	3,89	9,97	1,38	15	0,05	34,29
3.	3,88	9,96	1,88	15	0,05	47,35
4.	3,95	9,93	1,68	15	0,05	41,56
5.	3,84	9,93	2,11	15	0,05	54,02
6.	3,98	9,96	1,89	15	0,05	46,42
7.	3,83	9,90	1,33	15	0,05	33,76

8.	3,86	9,99	2,14	15	0,05	54,20
No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	<i>Hammer</i> (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
9.	3,93	9,92	1,11	15	0,05	27,19
10.	3,97	9,91	3,10	15	0,05	77,52
Rata-rata						45,89

- Sampel pada temperatur 75°C dengan kecepatan penarikan akhir 2 kali lebih cepat dari kecepatan awal, dan 3% PE-g-MA.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	<i>Hammer</i> (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,94	9,93	5,63	15	0,05	142,62
2.	3,87	9,90	5,14	15	0,05	132,85
3.	3,93	9,93	6,58	15	0,05	167,33
4.	3,87	9,92	5,47	15	0,05	141,18
5.	3,94	9,92	6,62	15	0,05	168,10
6.	4,00	9,93	6,63	15	0,05	165,66
7.	3,92	9,93	6,22	15	0,05	158,51
8.	3,93	9,94	4,99	15	0,05	126,46
9.	3,88	9,94	5,87	15	0,05	150,91
10.	4,08	9,91	5,11	15	0,05	125,15
Rata-rata						147,88

- Sampel pada temperatur 80°C dengan kecepatan penarikan akhir 2 kali lebih cepat dari kecepatan awal, dan 3% PE-g-MA.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	<i>Hammer</i> (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,95	9,96	5,07	15	0,05	127,60
2.	3,98	10,03	6,26	15	0,05	155,56
3.	3,94	9,99	5,64	15	0,05	142,02
4.	3,84	9,93	5,40	15	0,05	140,31
5.	3,94	9,93	6,65	15	0,05	168,69
6.	3,91	9,97	5,44	15	0,05	138,27
7.	3,98	9,95	5,92	15	0,05	148,23

8.	3,99	9,95	6,31	15	0,05	157,68
No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	<i>Hammer</i> (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
9.	4,00	9,92	6,26	15	0,05	156,50
10.	3,86	9,97	6,22	15	0,05	160,33
Rata-rata						149,52

- Sampel pada temperatur 85°C dengan kecepatan penarikan akhir 2 kali lebih cepat dari kecepatan awal, dan 3% PE-g-MA.

No.	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Energi (J)	<i>Hammer</i> (J)	Faktor Koreksi (J)	Kekuatan Impak (kJ/m ²)
1.	3,84	9,92	6,75	15	0,05	175,89
2.	3,98	9,94	5,03	15	0,05	125,88
3.	3,84	9,91	5,27	15	0,05	137,17
4.	3,87	9,91	6,83	15	0,05	176,78
5.	3,90	9,90	7,22	15	0,05	185,70
6.	3,87	9,95	4,89	15	0,05	125,69
7.	3,97	9,99	6,02	15	0,05	150,53
8.	3,95	9,95	5,84	15	0,05	147,32
9.	3,87	9,92	6,59	15	0,05	170,36
10.	3,95	9,91	6,61	15	0,05	167,58
Rata-rata						156,29