



UNIVERSITAS INDONESIA

**FORMULASI POLIPROPILENA  
UNTUK APLIKASI PRODUK RINGAN  
*THERMOFORMING* KECEPATAN TINGGI**

TESIS

PANDU LANANG KINASIH

07 06 17 377 4

FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI & MATERIAL  
DEPOK  
JULI 2009



UNIVERSITAS INDONESIA

**FORMULASI POLIPROPILENA  
UNTUK APLIKASI PRODUK RINGAN  
*THERMOFORMING* KECEPATAN TINGGI**

TESIS

TESIS INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN  
PERSYARATAN MENJADI MAGISTER TEKNIK

PANDU LANANG KINASIH

07 06 17 377 4

FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI & MATERIAL  
KEKHUSUSAN DESAIN MANUFAKTUR  
DEPOK  
JULI 2009

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Pandu Lanang Kinasih

NPM : 07 06 17 377 4

Tanda Tangan :

Tanggal : 3 Juli 2009

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :  
Nama : Pandu Lanang Kinasih  
NPM : 07 06 17 377 4  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Tesis :

### FORMULASI POLIPROPILENA UNTUK APLIKASI PRODUK RINGAN *THERMOFORMING* KECEPATAN TINGGI

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

#### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil.Eng. ( )  
Pembimbing : Edi Riva'i ( )  
Penguji : Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M.Phil.Eng. ( )  
Penguji : Dr. Ir. Sotya Astutiningsih, M.Eng. ( )  
Penguji : Dr. Ir. Winarto, M.Sc. ( )

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 3 Juli 2009

## KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- a. Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono M.Phil, Eng, selaku dosen pembimbing, yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- b. Bapak Edi Riva'i, selaku pembimbing saya di lapangan, yang juga telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- c. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- d. Rekan kerja serta kawan-kawan yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

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

Depok, 3 Juli 2009

Penulis

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

---

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

Nama : Pandu Lanang Kinasih  
NPM : 07 06 17 377 4  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Tesis

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

FORMULASI POLIPROPILENA  
UNTUK APLIKASI PRODUK RINGAN  
THERMOFORMING KECEPATAN TINGGI

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 3 Juli 2009

Yang menyatakan

( Pandu Lanang Kinasih )

## ABSTRAK

Nama : Pandu Lanang Kinasih  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul :

### FORMULASI POLIPROPILENA UNTUK APLIKASI PRODUK RINGAN *THERMOFORMING* KECEPATAN TINGGI

Dalam bisnis gelas polipropilena hasil proses *thermoforming*, kualitas produk ditentukan salah satunya oleh kecepatan alir lelehan (*Melt Flow Rate*, MFR) yang rendah. Namun, tingginya harga material mendorong industri untuk menurunkan berat produk dan meningkatkan kecepatan produksinya, salah satunya dengan menggunakan MFR yang tinggi. Dalam penelitian ini, telah dilakukan pengujian mekanis lengkap dan analisis statistik untuk menentukan formulasi empiris polipropilena berdasarkan MFR, fraksi ataktik, dan kandungan etilena kopolimer. Penelitian menunjukkan bahwa performa terbaik dari uji jatuh diperoleh dari sampel dengan rentang MFR antara 2.2–2.4 gr/10min, fraksi ataktik antara 1.5–2.96 wt%, dan kandungan etilena kopolimer kurang dari 0.82 wt%. Hasil tersebut memenuhi persyaratan uji aplikasi, stabilitas proses, dan tahapan penyusunan produk.

Kata kunci:

*Thermoforming*, Polipropilena, Formulasi, Kecepatan Alir Lelehan, Fraksi Ataktik, Kandungan Etilena Kopolimer

## ABSTRACT

Name : Pandu Lanang Kinasih  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Title :

### POLYPROPYLENE FORMULATION FOR LIGHT WEIGHT PRODUCT HIGH SPEED THERFORMING PROCESS

In polypropylene thermoforming cup business, the quality of product can be achieved by the raw material with low melt flow rate (MFR). However, the high material cost condition has encouraged cup manufacturer to down gauge the cup weight and increase the productivity by using higher MFR. In this study, a series of mechanical testing and statistical analysis have been used to empirically formulate the desired polypropylene based on MFR, atactic fraction, and ethylene copolymer aspects. On the basis of the investigation, it has been found that the best performance in drop test was provided by the sample with the MFR of 2.2–2.4 gr/10min, atactic fraction of 1.5–2.96 wt%, and ethylene copolymer content <0.82 wt%. These results have fulfilled the requirement for the application test, process ability and stacking stage.

**Keywords:**

Thermoforming, Polypropylene, Formulation, Melt Flow Rate, Atactic Fraction, Ethylene Copolymer Content

## DAFTAR ISI

|  | Halaman |
|--|---------|
| PERNYATAAN KEASLIAN TESIS                        | ii      |
| PENGESAHAN                                       | iii     |
| UCAPAN TERIMAKASIH                               | iv      |
| PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI                 | v       |
| ABSTRAK  | vi      |
| ABSTRACT   | vii     |
| DAFTAR ISI                                       | viii    |
| DAFTAR GAMBAR                                    | xi      |
| DAFTAR TABEL                                     | xiii    |
| DAFTAR LAMPIRAN                                  | xiv     |
| DAFTAR SINGKATAN                                 | xv      |
| <br>   |         |
| BAB I PENDAHULUAN                                | 1       |
| 1.1 Latar Belakang                               | 1       |
| 1.2 Perumusan Masalah                            | 2       |
| 1.3 Tujuan Penelitian                            | 3       |
| 1.4 Hipotesis                                    | 4       |
| 1.5 Ruang Lingkup Penelitian                     | 5       |
| <br>   |         |
| BAB II LANDASAN TEORI                            | 7       |
| 2.1 Polipropilena                                | 7       |
| 2.1.1 Umum                                       | 7       |
| 2.1.2 Sifat-Sifat Dasar                          | 7       |
| 2.1.3 Klasifikasi                                | 9       |
| 2.1.3.1 Klasifikasi Berdasarkan Taktisitas       | 9       |
| 2.1.3.2 Klasifikasi Berdasarkan Monomer Penyusun | 10      |
| 2.1.4 Perilaku Mekanis Polipropilena             | 12      |
| 2.1.4.1 Deformasi pada Polimer                   | 12      |
| 2.1.4.2 Kekakuan dan Keuletan pada Polipropilena | 16      |
| 2.2 <i>Thermoforming</i>                         | 20      |
| 2.3 Teknik-Teknik Statistika                     | 23      |
| 2.3.1 Analisa Korelasi                           | 23      |
| 2.3.2 Regresi Linier dan <i>Trendline</i>        | 25      |
| <br>   |         |
| BAB III PENELITIAN                               | 26      |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian                      | 26      |
| 3.2 Alat dan Bahan                               | 27      |
| 3.2.1. Alat yang digunakan                       | 27      |
| 3.2.2. Bahan yang digunakan                      | 29      |
| 3.3.2.1. T2                                      | 29      |
| 3.3.2.2. M8                                      | 30      |
| 3.3.2.3. M9                                      | 30      |
| 3.3.2.4. P5                                      | 31      |

|                             |   |    |
|-----------------------------|---|----|
| 3.3                         | Prosedur Penelitian   | 31 |
| 3.3.1                       | Preparasi Sampel:   | 31 |
| 3.3.1.1                     | <i>Injection Molding</i>  | 31 |
| 3.3.1.2                     | <i>Hot press machine</i>  | 32 |
| 3.3.2                       | Pengujian <i>Melt Flow Rate</i>                                       | 32 |
| 3.3.3                       | Pengujian Fraksi Ataktik ( <i>Xylene Soluble</i> )                    | 34 |
| 3.3.4                       | Pengujian Kandungan Etilena ( <i>Fourier Transform Infrared</i> )     | 36 |
| 3.3.5                       | Pengujian Kandungan Aditif ( <i>X-Ray Fluorescence</i> )              | 38 |
| 3.3.6                       | Pengujian Tarik   | 40 |
| 3.3.7                       | Pengujian Fleksural   | 42 |
| 3.3.8                       | Pengujian Impak   | 44 |
| 3.3.8.1                     | Pengujian Impak Izod  | 46 |
| 3.3.8.2                     | Pengujian Impak Gardner   | 47 |
| 3.3.9                       | Pengujian Kekerasan   | 48 |
| 3.3.10                      | Trial Aplikasi <i>Thermoforming</i>                                   | 50 |
| 3.3.10.1                    | Produksi Cup <i>Thermoforming</i>                                     | 50 |
| 3.3.10.2                    | Pengujian <i>Drop-Test</i> Gelas                                      | 51 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN |   | 53 |
| 4.1                         | Pengujian Tarik   | 53 |
| 4.1.1                       | Pengamatan Kekuatan Tarik Luluh ( <i>Tensile Strength at Yield</i> )  | 53 |
| 4.1.1.a                     | Pengaruh MFR terhadap Kekuatan Tarik                                  | 53 |
| 4.1.1.b                     | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Kekuatan Tarik                       | 55 |
| 4.1.1.c                     | Pengaruh Kandungan Etilena terhadap Kekuatan Tarik                    | 57 |
| 4.1.2                       | Pengamatan Regangan Tarik Luluh                                       | 59 |
| 4.1.2.a                     | Pengaruh MFR terhadap Regangan Tarik                                  | 59 |
| 4.1.1.b                     | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Regangan Tarik                       | 61 |
| 4.1.1.c                     | Pengaruh Kandungan Etilena terhadap Regangan Tarik                    | 63 |
| 4.2                         | Pengujian Tekuk 3-Titik ( <i>Fleksural</i> )                          | 65 |
| 4.2.a                       | Pengaruh MFR terhadap Modulus Fleksural                               | 65 |
| 4.2.b                       | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Modulus Fleksural                    | 67 |
| 4.2.c                       | Pengaruh Kandungan Etilena terhadap Modulus Fleksural                 | 70 |
| 4.3                         | Pengujian Beban Kejut ( <i>Impact Test</i> )                          | 72 |
| 4.3.1                       | Pengujian Beban Kejut Metoda Izod ( <i>Izod Impact Test</i> )         | 72 |
| 4.3.1.a                     | Pengaruh MFR terhadap Ketahanan Impak Izod                            | 72 |
| 4.3.1.b                     | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Ketahanan Impak Izod                 | 73 |
| 4.3.1.c                     | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Ketahanan Impak Izod    | 75 |
| 4.3.2                       | Pengujian Beban Kejut Metoda Gardner                                  | 77 |
| 4.3.2.a                     | Pengaruh MFR terhadap Ketahanan Impak Gardner                         | 77 |
| 4.3.2.b                     | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Ketahanan Impak Gardner              | 79 |
| 4.3.2.c                     | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Ketahanan Impak Gardner | 81 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.4 Pengujian Kekerasan ( <i>Hardness Test</i> )    | 84  |
| 4.4.a Pengaruh MFR terhadap Kekerasan               | 84  |
| 4.4.b Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Kekerasan    | 85  |
| 4.4.c Pengaruh Kandungan Etilena terhadap Kekerasan | 87  |
| 4.5 Formulasi Material                              | 88  |
| 4.5.1 <i>Melt Flow Rate</i> (MFR)                   | 89  |
| 4.5.2 Fraksi Ataktik                                | 90  |
| 4.5.3 Kandungan Etilena Kopolimer                   | 91  |
| 4.6 Trial Aplikasi <i>Thermoforming</i>             | 93  |
| <br>  |     |
| BAB V KESIMPULAN                                    | 95  |
| <br>  |     |
| DAFTAR ACUAN  | 96  |
| LAMPIRAN  | 101 |



## DAFTAR GAMBAR

|  | Halaman |
|--|---------|
| <b>Gambar 2.1</b> Struktur Kimia Polipropilena   | 7       |
| <b>Gambar 2.2</b> Berurut dari atas ke bawah, PP ataktik; PP isotaktik; dan PP sindiotaktik  | 9       |
| <b>Gambar 2.3</b> Ilustrasi <i>Chain Entanglement</i>  | 13      |
| <b>Gambar 2.4</b> Ilustrasi Tahap Deformasi pada Polimer   | 14      |
| <b>Gambar 2.5</b> Ilustrasi Pengaruh <i>Entanglement</i> Interlamela terhadap Deformasi  | 15      |
| <b>Gambar 2.6</b> Diagram Fasa Fraksi Isotaktik (mmmm) terhadap % Deformasi pada Temperatur Kamar  | 16      |
| <b>Gambar 2.7</b> Berturut-turut dari kiri ke kanan: morfologi Spherulit dari sampel $M_w=208000$ gr/mol, $M_w=268000$ gr/mol, dan $M_w=377000$ gr/mol | 18      |
| <b>Gambar 2.8</b> Grafik Tegangan-Regangan Sebenarnya terhadap (1) Pembebanan Tekan dan (2) Pembebanan Tarik   | 19      |
| <b>Gambar 2.9</b> Ilustrasi proses <i>in-line thermoforming</i>  | 20      |
| <b>Gambar 2.10</b> <i>Sheet Extruder</i>   | 21      |
| <b>Gambar 2.11</b> Mesin <i>Thermoforming</i>  | 21      |
| <b>Gambar 2.12</b> Diagram Hubungan Korelasi   | 24      |
| <b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian  | 26      |
| <b>Gambar 3.2</b> Ilustrasi Pengukuran MFR   | 33      |
| <b>Gambar 3.3</b> Pengukuran Fraksi Ataktik dengan Metode Reflux   | 34      |
| <b>Gambar 3.4</b> Skema Zona Pengukuran <i>Infrared Spectroscopy</i>   | 37      |
| <b>Gambar 3.5</b> <i>Fourier Transform Infrared</i>  | 37      |
| <b>Gambar 3.6</b> Prinsip Pengukuran dengan <i>X-Ray Fluorescent</i>   | 38      |
| <b>Gambar 3.7</b> Ilustrasi Data yang diolah XRF   | 39      |
| <b>Gambar 3.8</b> <i>Multi Testing Machine</i> dan Prinsip Pengujian Tarik   | 40      |
| <b>Gambar 3.9</b> Ilustrasi Grafik Pengujian Tarik   | 41      |
| <b>Gambar 3.10</b> Sampel <i>Dog-Bone</i> Hasil Proses <i>Injection Molding</i>  | 41      |
| <b>Gambar 3.11</b> <i>Multi Testing Machine</i> Mode Fleksural   | 42      |
| <b>Gambar 3.12</b> Ilustrasi Impak Izod dan Cara Memasang Sampel Uji Sesuai ASTM D256  | 44      |
| <b>Gambar 3.13</b> Ilustrasi Energi Impak pada Kurva Tegangan-Regangan   | 45      |
| <b>Gambar 3.14</b> Dimensi Sampel Pengujian Izod Sesuai ASTM D256  | 47      |
| <b>Gambar 3.15</b> Sampel <i>Dog-Bone</i> yang sudah di-preparasi untuk Impak Izod   | 47      |
| <b>Gambar 3.16</b> Sampel <i>Plague</i> Bulat untuk Pengujian Impak Gardner dan Kekerasan  | 48      |
| <b>Gambar 3.17</b> <i>Hardness Rockwell Tester</i> dan Indentor Rockwell   | 49      |
| <b>Gambar 3.18</b> Gelas <i>Thermoforming</i> 240ml, berat 3.25gram  | 52      |
| <b>Gambar 4.1</b> Pengaruh MFR terhadap Kekuatan Tarik   | 54      |
| <b>Gambar 4.2</b> Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Kekuatan Tarik  | 56      |
| <b>Gambar 4.3</b> Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Kekuatan Tarik   | 58      |

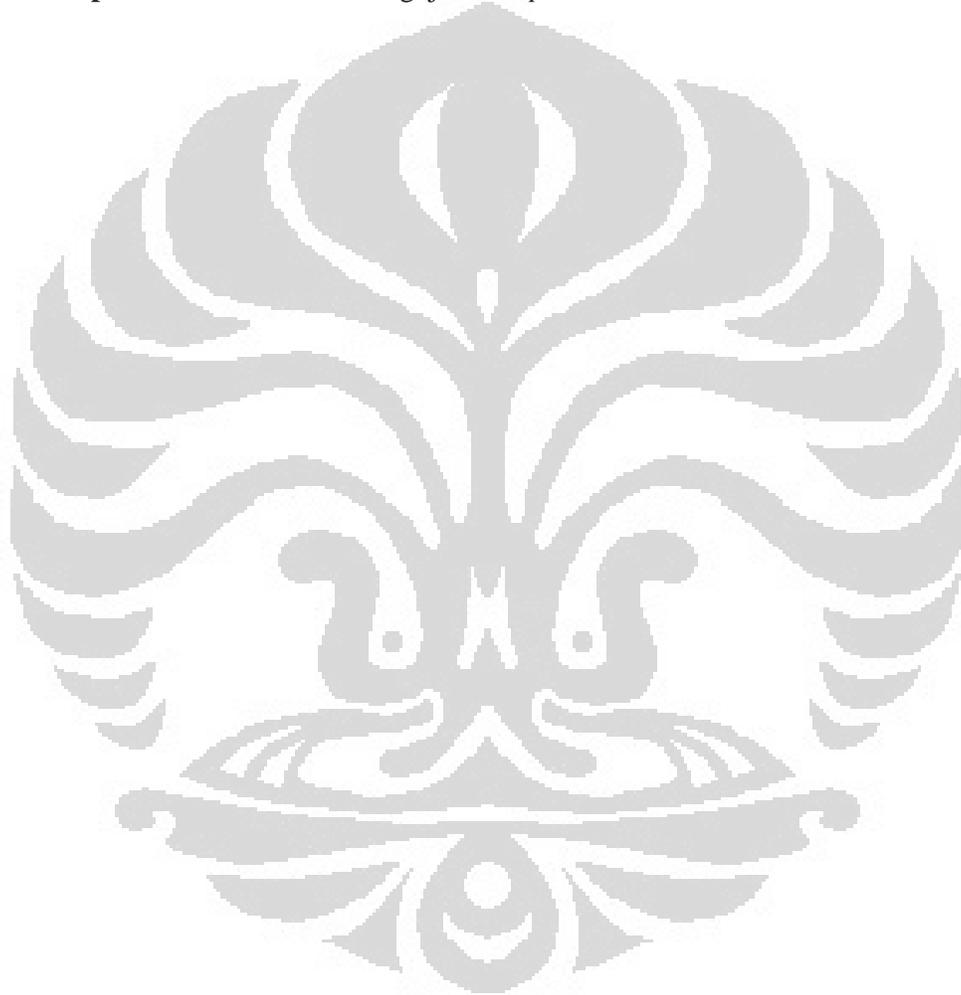
|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Gambar 4.4</b>  | Pengaruh MFR terhadap Regangan Tarik  | 60 |
| <b>Gambar 4.5</b>  | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Regangan Tarik   | 62 |
| <b>Gambar 4.6</b>  | <i>Snake Tunnel</i> , Tempat Pergerakan Rantai Molekul  | 64 |
| <b>Gambar 4.7</b>  | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Regangan Tarik  | 65 |
| <b>Gambar 4.8</b>  | Pengaruh MFR terhadap Modulus Fleksural   | 67 |
| <b>Gambar 4.9</b>  | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Modulus Fleksural  | 69 |
| <b>Gambar 4.10</b> | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Modulus Fleksural   | 71 |
| <b>Gambar 4.11</b> | Pengaruh MFR terhadap Ketahanan Impak Izod  | 73 |
| <b>Gambar 4.12</b> | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Ketahanan Impak Izod   | 74 |
| <b>Gambar 4.13</b> | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Ketahanan Impak Izod  | 76 |
| <b>Gambar 4.14</b> | Pengaruh MFR terhadap Ketahanan Impak Gardner   | 78 |
| <b>Gambar 4.15</b> | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Ketahanan Impak Gardner  | 80 |
| <b>Gambar 4.16</b> | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Ketahanan Impak Gardner   | 82 |
| <b>Gambar 4.17</b> | Pengaruh Meningkatnya Struktur Amorf terhadap Viskositas Menurut Model Curtiss-Bird                                 | 83 |
| <b>Gambar 4.18</b> | Pengaruh MFR terhadap Kekerasan   | 85 |
| <b>Gambar 4.19</b> | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Kekerasan  | 86 |
| <b>Gambar 4.20</b> | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Kekerasan   | 88 |
| <b>Gambar 4.21</b> | Diagram Batang Formulasi MFR  | 90 |
| <b>Gambar 4.22</b> | Diagram Batang Formulasi Fraksi Ataktik   | 91 |
| <b>Gambar 4.23</b> | Diagram Batang Formulasi Kandungan Etilena Kopolimer  | 92 |
| <b>Gambar 4.24</b> | a. Foto gelas kondisi biasa dan dengan kaca polar;<br>b. Foto goresan (polar);<br>c. Foto goresan (perbesaran 100x) | 94 |

## DAFTAR TABEL

|                   | Halaman  |
|-------------------|--|
| <b>Tabel 2.1</b>  | Sifat-Sifat Fisik PP 8   |
| <b>Tabel 3.1</b>  | Spesifikasi Alat saat Preparasi 27                                       |
| <b>Tabel 3.2</b>  | Spesifikasi Alat saat Pengujian 27                                       |
| <b>Tabel 3.3</b>  | Spesifikasi Mesin Aplikasi 29  |
| <b>Tabel 3.4</b>  | Spesifikasi Trilene HE2.0TF 30   |
| <b>Tabel 3.5</b>  | Pemetaan Percobaan Variasi Trilene HE2.0TF 30                            |
| <b>Tabel 3.6</b>  | Hasil Karakterisasi M8 30  |
| <b>Tabel 3.7</b>  | Hasil Karakterisasi M9 30  |
| <b>Tabel 3.8</b>  | Hasil Karakterisasi P5 31  |
| <b>Tabel 3.9</b>  | Parameter Setting yang digunakan saat memproses sampel 52                |
| <b>Tabel 4.1</b>  | Pengaruh MFR terhadap Kekuatan Tarik 53                                  |
| <b>Tabel 4.2</b>  | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Kekuatan Tarik 55                       |
| <b>Tabel 4.3</b>  | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Kekuatan Tarik 57          |
| <b>Tabel 4.4</b>  | Pengaruh MFR terhadap Regangan Tarik 59                                  |
| <b>Tabel 4.5</b>  | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Regangan Tarik 61                       |
| <b>Tabel 4.6</b>  | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Regangan Tarik 63          |
| <b>Tabel 4.7</b>  | Pengaruh MFR terhadap Modulus Fleksural 66                               |
| <b>Tabel 4.8</b>  | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Modulus Fleksural 68                    |
| <b>Tabel 4.9</b>  | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Modulus Fleksural 70       |
| <b>Tabel 4.10</b> | Pengaruh MFR terhadap Ketahanan Impak Izod 72                            |
| <b>Tabel 4.11</b> | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Ketahanan Impak Izod 74                 |
| <b>Tabel 4.12</b> | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Ketahanan Impak Izod 76    |
| <b>Tabel 4.13</b> | Pengaruh MFR terhadap Ketahanan Impak Gardner 77                         |
| <b>Tabel 4.14</b> | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Ketahanan Impak Gardner 79              |
| <b>Tabel 4.15</b> | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Ketahanan Impak Gardner 81 |
| <b>Tabel 4.16</b> | Pengaruh MFR terhadap Kekerasan 84                                       |
| <b>Tabel 4.17</b> | Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Kekerasan 85                            |
| <b>Tabel 4.18</b> | Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Kekerasan 87               |
| <b>Tabel 4.19</b> | Matriks korelasi karakteristik material dengan performa fisik 89         |
| <b>Tabel 4.20</b> | Hubungan karakteristik material dengan performa fisik 89                 |
| <b>Tabel 4.21</b> | Spesifikasi sampel hasil formulasi 93                                    |
| <b>Tabel 4.22</b> | Kesimpulan trial 93  |

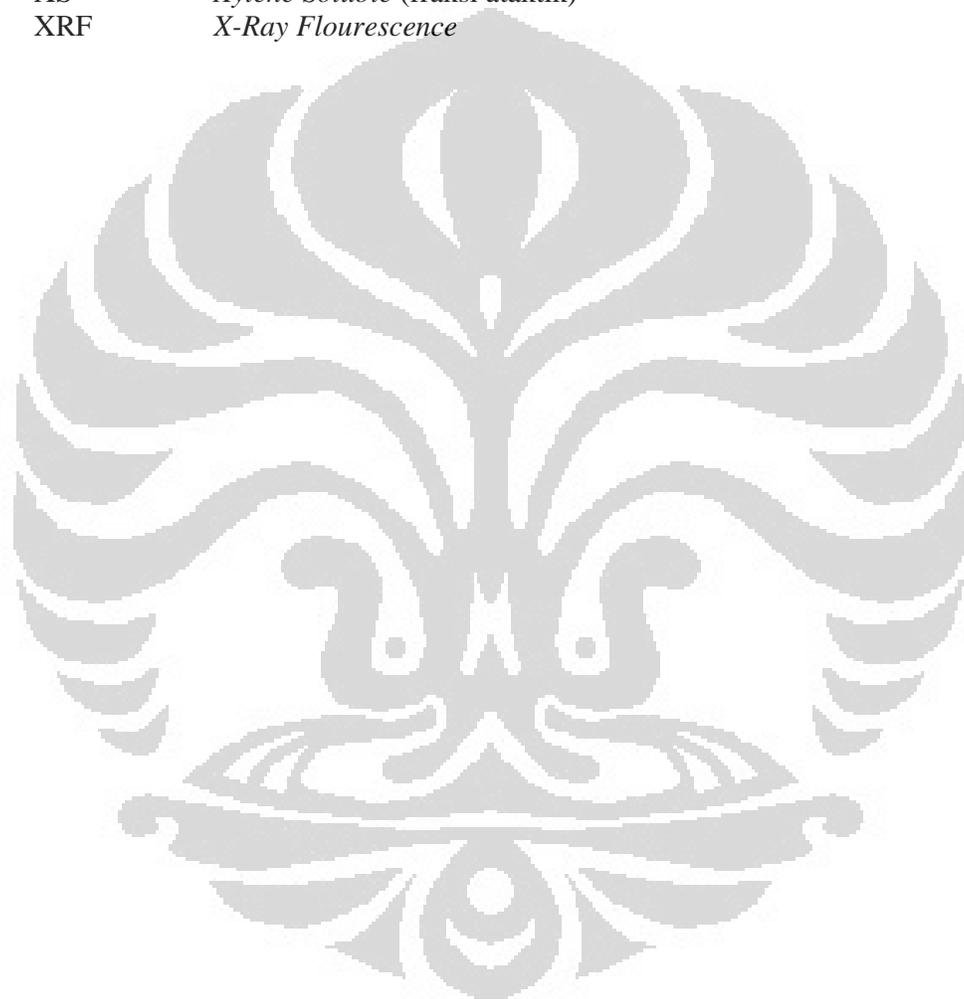
## DAFTAR LAMPIRAN

|  | Halaman |
|--|---------|
| <b>Lampiran 1</b> Karakterisasi Sampel                   | 101     |
| <b>Lampiran 2</b> Pengolahan Data Pengujian Tarik        | 102     |
| <b>Lampiran 3</b> Pengolahan Data Pengujian Fleksural    | 103     |
| <b>Lampiran 4</b> Pengolahan Data Pengujian Impak        | 104     |
| <b>Lampiran 5</b> Pengolahan Data Pengujian Kekerasan    | 107     |
| <b>Lampiran 6</b> Data Detail Pengujian <i>Drop-Test</i> | 108     |



## DAFTAR SINGKATAN

|      |  |
|------|--|
| Et   | Kandungan Etilena Kopolimer                    |
| FTIR | <i>Fourier Transform Infrared</i>              |
| MFR  | <i>Melt Flow Rate</i> (kecepatan alir lelehan) |
| PE   | Polietilena                                    |
| PP   | Polipropilena                                  |
| XS   | <i>Xylene Soluble</i> (fraksi ataktik)         |
| XRF  | <i>X-Ray Flourescence</i>                      |



# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 LATAR BELAKANG

Tingginya harga bahan dan kompetisi yang semakin ketat di antara industri plastik dan kemasan menuntut industri untuk terus melakukan inovasi pada produk yang dihasilkannya. Salah satunya adalah dilakukan dengan efisiensi penggunaan bahan baku.

*Thermoforming* adalah suatu proses manufaktur yang membentuk lembaran atau film polimer menjadi produk jadi dengan menggunakan panas dan tekanan<sup>[1]</sup>. Salah satu kelebihan proses ini ialah kemampuannya memproduksi produk tipis. Dalam konteks kemasan plastik dan hubungannya dengan efisiensi penggunaan bahan baku, walaupun pada proses *thermoforming*, produk yang dihasilkan sudah lebih tipis dibandingkan proses produksi lainnya<sup>[2]</sup>. Tetapi, pada proses ini juga diaplikasikan penurunan berat produk. Sebagai contoh, gelas *thermoforming* ukuran 240 ml yang awalnya memiliki kisaran berat 4–5 gram, kini sebagian besar industri berusaha memproduksi gelas *thermoforming* pada kisaran berat 3–3.25 gram atau sekitar 1.5 kali lebih ringan dibanding berat awal.

Pada kenyataannya pada industri *thermoforming*, performa material yang baik sangat diperhatikan. Karena pada proses ini, dibutuhkan keseimbangan antara kekakuan yang cukup sehingga mudah diproses dan juga keuletan yang sangat dibutuhkan dari performa produk gelas<sup>[3]</sup>. Seiring dengan *down gauging* berat produk tersebut, maka performa material dituntut agar lebih baik lagi. Karena dengan spesifikasi performa produk yang tetap, maka produk yang lebih ringan akan menjadi lebih sensitif terhadap beban mekanis dan sebagai konsekuensinya memiliki tuntutan performa yang lebih tinggi dibanding sebelumnya.

Penurunan berat ini selain akan mempengaruhi performa (sifat fisik) dari produk, juga mempengaruhi aspek kemampuan prosesnya (*process ability*). Selain dengan efisiensi penggunaan bahan baku, inovasi yang banyak dilakukan oleh industri adalah dengan meningkatkan kecepatan produksinya<sup>[1]</sup>, sehingga industri dapat menghasilkan kuantitas produk yang lebih banyak. Kelebihan proses *thermoforming* dibandingkan proses manufaktur lainnya, terutama karena proses ini memiliki kapasitas output yang besar.

Pada industri gelas *thermoforming*, kecepatan (*cycle time*) mesin *thermoforming* yang digunakan industri umumnya adalah 25 cycle/min. Namun sekarang Gabler, salah satu industri penghasil mesin *thermoforming* dunia berhasil menciptakan mesin Gabler M98 dengan kecepatan 50 cycle/min<sup>[3]</sup>. Pada prakteknya, industri di Indonesia menjalankan Gabler M98 ini pada 31.8 cycle/min. Itupun bukan hanya menggunakan cetakan dengan 24–27 cavity, melainkan menggunakan 32 cavity. Sehingga secara umum, kuantitas produk yang dihasilkan menjadi sekitar 1.5 kali lebih banyak dibanding mesin pada umumnya.

Perkembangan tuntutan performa produk yang diikuti oleh perkembangan mesin dan teknologi pemrosesan material ini juga turut memaksa aspek bahan baku untuk memiliki spesifikasi yang sesuai dengan tuntutan tersebut. Salah satu material yang banyak digunakan pada aplikasi gelas *thermoforming* ini ialah polipropilena (PP). Kelebihan material ini sehingga banyak digunakan pada aplikasi *thermoforming* adalah karena PP merupakan material termoplastik semi kristalin dengan massa jenis yang rendah<sup>[4]</sup>. Yang berarti, material ini dapat mengalami proses pembentukan kedua, mudah diatur karakteristik kekakuan dan keuletannya, dan juga ekonomis baik dari sisi berat produk yang dihasilkan maupun segi kemudahan dan harga bahan baku.

## 1.2 PERUMUSAN MASALAH

Material polipropilena komersial *thermoforming* grade pada umumnya hanya menekankan pada karakteristik berat molekul tinggi (kecepatan alir lelehan rendah/*melt flow rate* rendah) sebagai pembentuk performa mekanis dari bahan. Padahal dalam produksi kontinu skala reaktor, hal ini sudah menjadi kurang ekonomis, mengingat banyaknya transisi yang terjadi apabila akan dan sesudah melakukan produksi dengan spesifikasi tersebut.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa terjadi kondisi yang saling kontradiksi antara produsen dan konsumen material ini yaitu kebutuhan proses aplikasi akan performa produk yang baik (seperti halnya dengan menggunakan kecepatan alir lelehan rendah), namun tuntutan faktor efisiensi yang memaksa produsen material untuk menghasilkan produk dengan kecepatan alir lelehan yang lebih tinggi.

Sebenarnya selain daripada kecepatan alir lelehan, material polipropilena memiliki karakteristik lain yang dapat ditinjau lebih lanjut untuk meningkatkan performa material, yaitu susunan atau struktur rantai molekulnya. Struktur ini terkait dengan posisi gugus metil tertier pada rantai utama polipropilena atau yang lebih dikenal dengan nama taktisitas<sup>[5]</sup>. Selain itu, modifikasi rantai molekul polipropilena juga dapat dilakukan dengan menambahkan etilena sebagai kopolimer.

Mengingat pentingnya aspek tersebut, maka pada penelitian ini, akan dilakukan formulasi secara empiris melalui pengujian sifat mekanis untuk mendapatkan formulasi material polipropilena dari aspek berat molekul (kecepatan alir lelehan), kandungan fraksi ataktik, dan juga kandungan etilena kopolimer yang optimal, yang mampu memenuhi kebutuhan konsumen dan sesuai kemampuan produsen.

### **1.3 TUJUAN PENELITIAN**

Sehingga secara singkat adapun tujuan dari penelitian ini antara lain adalah untuk mempelajari hubungan antara karakteristik material seperti kecepatan alir lelehan, fraksi ataktik, dan kandungan etilena kopolimer dengan performa mekanis.

Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan formulasi material polipropilena dari sisi kecepatan alir lelehan, fraksi ataktik, dan kandungan etilena kopolimer yang optimal untuk aplikasi produk ringan proses *thermoforming* berkecepatan tinggi, namun tetap ekonomis untuk diaplikasikan dalam produksi kontinu skala reaktor (*reactor scale*).

## 1.4 HIPOTESIS

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, pada penelitian ini akan dipelajari hubungan yang lebih spesifik antara karakteristik material dan performa mekanis yang akan dihasilkannya. Karakteristik material yang dimaksud adalah kecepatan alir lelehan, fraksi ataktik dan kandungan etilena kopolimer. Sedangkan performa mekanis yang dimaksud meliputi kekuatan tarik pada titik luluh, regangan tarik pada titik luluh, modulus fleksural, ketahanan impak izod dan gardner, dan juga kekerasan material.

Kecepatan alir lelehan polimer berkaitan dengan panjang rantai molekul dari material tersebut. Semakin panjang rantai molekul polimer, maka dibutuhkan energi yang semakin tinggi untuk menggerakkan molekul tersebut atau dengan kata lain, semakin kental material tersebut atau semakin rendah kecepatan alir lelehan polimer tersebut<sup>[5-8]</sup>. Atau dengan kata lain, umumnya diilustrasikan, semakin panjang rantai molekul (atau semakin rendah kecepatan alir lelehannya) maka perilaku saling terkait (*molecular entanglement*) akan semakin banyak terjadi<sup>[9-11]</sup>.

Kondisi saling terkait dalam struktur polimer ini akan menjadi penahan terjadinya deformasi lanjutan<sup>[12]</sup> dan juga sebagai penyerap energi pembebanan (*energy absorber*)<sup>[13]</sup>. Akibatnya umumnya hal ini terukur dalam kekakuan dan ketangguhan yang meningkat.

Mengingat pentingnya korelasi tersebut, pada penelitian ini akan dipelajari lebih lanjut performa kekakuan dan ketangguhan mana yang terutama dipengaruhi oleh kecepatan alir lelehan dan seberapa besar pengaruhnya terhadap performa tersebut. Kemudian lebih jauh hal ini akan digunakan dalam melakukan formulasi material untuk menjawab permasalahan industri yang sudah dijelaskan pada subbab Perumusan Masalah.

Tinjauan lain dari karakteristik material yang akan dipelajari pada penelitian ini ialah fraksi ataktik dan kandungan etilena kopolimer. Karakteristik fraksi ataktik dan penambahan etilena kopolimer pada molekul PP, berkaitan dengan struktur kristal yang akan terbentuk akibat interaksi antar rantai molekul tersebut. Secara umum, ataktik berarti ketidak teraturan susunan gugus samping pada rantai utama polimer<sup>[14-16]</sup>. Sedangkan penambahan etilena kopolimer dalam

rantai molekul PP juga akan menyebabkan ketidak-seragaman dan juga ketidak-teraturan dalam rantai molekul<sup>[5, 8,17]</sup>.

Karena ketidak teraturan itu, maka ketika berinteraksi antar molekul yang berdekatan, maka struktur yang terbentuk ialah struktur yang terbentuk adalah acak (amorf)<sup>[8,14]</sup>. Karena berbentuk acak dan renggang, maka struktur ini akan berfungsi seperti pegas yang ulet<sup>[7]</sup> dan juga akan menyerap energi atau beban yang diberikan kepadanya<sup>[17,18]</sup>. Dengan kata lain, semakin tinggi fraksi ataktik dan/atau kandungan etilena kopolimer dalam molekul PP, maka performa keuletan dan ketahanan beban kejut akan meningkat.

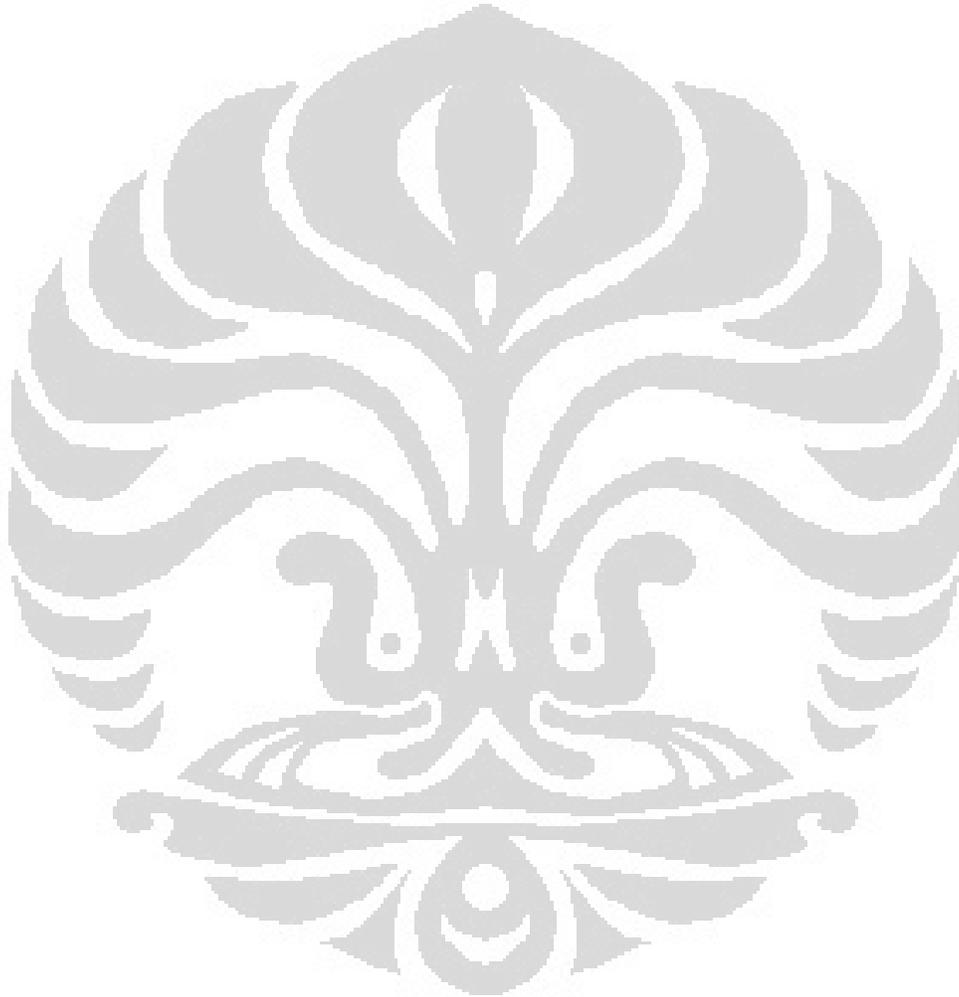
Sama seperti sebelumnya, mengingat hubungan ini sangat prinsipil dan banyak dijadikan acuan dalam modifikasi spesifikasi material. Maka dalam penelitian ini juga akan dipelajari performa keuletan dan ketahanan benturan mana yang terutama dipengaruhi oleh masing-masing karakteristik tersebut. Agar pada proses desain material selanjutnya, dapat diketahui spesifikasi material yang seharusnya diubah, jika pembuat material ingin meningkatkan performa mekanis tertentu. Selain itu sebagai awal, hubungan ini akan digunakan lebih jauh sebagai dasar melakukan formulasi material.

## 1.5 RUANG LINGKUP PENELITIAN

Pada penelitian ini, akan diformulasikan karakteristik bahan PP yang dapat memenuhi tuntutan aplikasi gelas *thermoforming* produk ringan (3.25 gram) yang diproduksi dengan kecepatan tinggi (31.8 cycle/min). Karakteristik material yang akan dipelajari adalah dari sisi kecepatan alir lelehan, konsentrasi penambahan etilena kopolimer, dan jumlah fraksi struktur ataktik dalam homopolimer PP.

Pada penelitian ini, sifat fisik bahan akan diuji menggunakan pengujian mekanis lengkap, yang disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi, yaitu kekakuan (disimulasikan melalui pengujian tarik, fleksural, dan kekerasan) untuk memenuhi persyaratan kecepatan produksi yang tinggi dan juga keuletan (disimulasikan melalui pengujian tarik dan dampak) untuk memenuhi kebutuhan performa produk akhir.

Selanjutnya, hasil setiap pengujian di atas akan digunakan untuk menentukan formulasi secara empiris dengan metode statistik. Untuk mengamati performa produk akhir hasil formulasi ini, sesuai kebutuhan pengujian kontrol kualitas gelas *thermoforming* umumnya, akan dilakukan pengujian *drop test* (1.5 meter) dan kemampuan proses dari material untuk membandingkan formulasi awal sebelum penelitian.



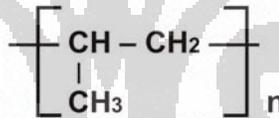
## BAB 2 LANDASAN TEORI

### 2.1 POLIPROPILENA

#### 2.1.1 Umum

Polipropilena (PP) adalah polimer dengan penggunaan ketiga terbesar di dunia setelah PE dan PVC<sup>[8]</sup>. Polimer ini memiliki keseimbangan sifat yang baik sehingga dapat kita temui di berbagai aplikasi, mulai dari kemasan makanan, perlengkapan rumah tangga, part otomotif, hingga peralatan elektronik.

Secara bahasa, polipropilena berasal dari kata “*poly*” yang berarti banyak dan “*propylene*” yang berarti senyawa hidrokarbon yang memiliki atom karbon berjumlah tiga dan atom hidrogen berjumlah enam dengan satu ikatan rangkap pada atom karbonnya dengan rumus molekul C<sub>3</sub>H<sub>6</sub><sup>[7]</sup>. Sehingga polipropilena dapat diartikan sebagai suatu molekul besar dengan banyak unit berulang yang mana setiap unitnya identik dengan propilena. Di bawah ini Gambar 2.1 mengilustrasikan struktur molekul PP secara umum.



Gambar 2.1 Struktur Kimia Polipropilena<sup>[7]</sup>

#### 2.1.2 Sifat-Sifat Dasar

Secara umum, PP memiliki sifat mekanis yang baik dengan massa jenis yang rendah, ketahanan panas dan kelembaban, serta memiliki kestabilan dimensi yang baik<sup>[5-8]</sup>. Seperti polimer pada umumnya, PP merupakan *isolator* panas dan listrik yang baik, serta mudah dibentuk. PP memiliki ketahanan kimia dan fatik yang baik. PP memiliki kejernihan *translucent* (pertengahan antara tembus pandang dan buram). PP adalah material dengan perbandingan kekuatan dengan berat jenis paling tinggi di antara material-material lain, sehingga berdasarkan sifat ini PP menjadi polimer yang paling banyak digunakan<sup>[7]</sup>. Detail karakteristik umum PP dapat dilihat dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat-Sifat Fisik PP<sup>[5-8]</sup>

| <i>Sifat</i>                                 | <i>Nilai</i>                  |
|--|-------------------------------|
| Kekuatan tarik                               | 31 - 38 Mpa                   |
| Kekuatan impak                               | 34 - 58 J                     |
| Elongasi saat putus                          | 100 - 600 %                   |
| Modulus fleksural                            | 1,170 - 1,730 Mpa             |
| Berat jenis                                  | 0.89 - 0.92 g/cm <sup>3</sup> |
| <i>Heat Distorsion Temperature</i> , 455 kPa | 107 - 121 °C                  |
| Temperatur leleh                             | 160 - 174 °C                  |
| Kejernihan                                   | <i>Translucent</i>            |
| <i>Mold shrinkage</i>                        | 0.015-0.025 cm/cm             |

PP merupakan suatu polimer termoplastik, artinya polimer yang apabila dipanaskan pada temperatur tertentu dapat meleleh. Sifat termoplastik ini menyebabkan PP dapat diproses dengan pemanasan sampai di atas temperatur lelehnya kemudian dapat dibentuk dan setelah pemakaian dapat didaur ulang kembali menjadi produk baru.

PP adalah polimer semi-kristalin, yang mana terdiri dari campuran dua bagian, yaitu fasa kristalin dan fasa amorf. Fasa kristalin adalah bagian di mana rantai-rantai molekul PP tersusun secara teratur, sedangkan fasa amorf adalah bagian di mana rantai-rantai molekul tersusun secara acak dan tidak beraturan. Fasa kristalin merupakan fasa dengan berat jenis lebih berat dibandingkan dengan fasa amorf<sup>[14]</sup>. Fasa kristalin memberikan kekuatan, kekakuan, dan kekerasan pada PP, namun di sisi lain fasa kristalin juga menyebabkan PP menjadi lebih getas sehingga mengurangi ketangguhan dan mudah pecah terutama pada temperatur rendah<sup>[14]</sup>.

Sebagai polimer semi-kristalin, PP memiliki dua temperatur transisi, yaitu temperatur transisi gelas ( $T_g$ ) dan temperatur leleh ( $T_m$ ). Temperatur transisi gelas adalah temperatur di mana terjadi perubahan sifat, tanpa melewati perubahan fasa, dari sifat seperti gelas atau *rigid* (kaku) menjadi sifat seperti karet (kekaretan, lentur)<sup>[5]</sup>. Sedangkan temperatur leleh adalah temperatur di mana PP mulai mengalami perubahan fasa, dari padat menjadi lelehan kental.

Pembentukan inti kristal pada PP terjadi pada saat pendinginan dari temperatur kristalisasi sampai temperatur transisi gelas atau sampai kristal yang telah tumbuh saling menyentuh kristal yang lain<sup>[5,8]</sup>. Temperatur kristalisasi

adalah temperatur di antara temperatur transisi gelas dan temperatur leleh, yang mana pada temperatur ini mulai terjadi pertumbuhan inti kristal<sup>[5]</sup>.

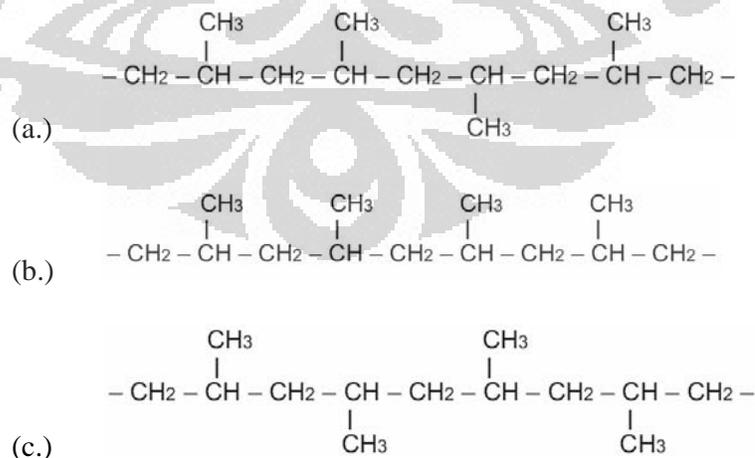
### 2.1.3 Klasifikasi

#### 2.1.3.1 Klasifikasi Berdasarkan Taktisitas

Taktisitas adalah letak alkil secara molekular pada sisi rantai utama polimer<sup>[5]</sup>. Pada PP yang merupakan alkil adalah gugus metil yang berada rantai polimer tersebut. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.2, berikut ialah klasifikasi PP berdasarkan taktisitasnya<sup>[5-8]</sup>.

- PP isotaktik, yaitu PP dengan gugus-gugus metil seluruhnya tersusun di salah satu sisi dari rantai utamanya.
- PP sindiotaktik, yaitu PP dengan gugus-gugus metil tersusun pada kedua sisi dari rantai utama secara bergantian (*alternating*).
- PP ataktik, yaitu PP dengan gugus-gugus metil terletak tidak beraturan (*random*) pada kedua sisi dari rantai utama.

Pada produksi PP, taktisitas ini diatur dari jenis dan jumlah katalis, kokatalis, dan *Selective Control Agent* (SCA) yang ditambahkan. PP yang dijual secara komersial, umumnya terdiri dari 95–98 % isotaktik dan 2–5wt% ataktik<sup>[15]</sup>. Tren industri PP sekarang adalah memproduksi fraksi ataktik dengan serendah mungkin. Sehingga sekarang ini, rentang yang dapat diproduksi dengan menggunakan katalis generasi terbaru, yaitu 1.5–7wt% fraksi ataktik.



Gambar 2.2 Taktisitas pada PP (a.) PP ataktik; (b.) PP isotaktik; dan (c.) PP sindiotaktik<sup>[8]</sup>

Adanya fasa isotaktik dalam PP dapat meningkatkan derajat kristalinitas karena secara molekular memiliki letak gugus-gugus metil yang teratur pada salah satu sisi rantai utama, sehingga memungkinkan untuk dapat tersusun secara beraturan membentuk suatu kisi kristal pada saat dilakukan pemanasan sampai temperatur kristalisasi. Kemampuan pembentukan struktur kristalin ini menyebabkan fraksi ini menyebabkan sifat mekanis yang kaku, penyusutan yang besar, dan sifat optis yang buram namun mengkilap<sup>[18]</sup>.

Fasa ataktik pada PP tidak dapat tersusun secara teratur karena secara tingkat molekularnya sudah tidak beraturan, sehingga fasa ini akan membentuk fasa amorf pada PP. Sifat bahan yang ulet dan bening adalah performa yang dihasilkan fraksi ataktik<sup>[18]</sup>.

Sedangkan yang terakhir, fasa sindiotaktik adalah salah satu perkembangan terbaru dari material polimer. Fasa ini dapat menghasilkan struktur kristalin yang sangat teratur akibat susunan gugus alkilnya. Material polimer yang sudah banyak dikembangkan dengan sistem ini adalah polietilena. Fasa ini tidak dapat dibentuk dengan sistem katalis Ziegler-Natta seperti biasanya, namun harus menggunakan sistem katalis *Metallocene*<sup>[8]</sup>.

### 2.1.3.2 Klasifikasi Berdasarkan Monomer Penyusun<sup>[5-8]</sup>

Berdasarkan monomer penyusunnya, PP dibedakan menjadi:

#### a. *Polypropylene-homopolymer*

- Terdiri dari satu jenis monomer, yaitu propilena.
- Skema: —PPPPPPPPPPPPPPPPPPPPPP—
- Pembuatannya dilakukan di dalam sebuah reaktor.
- Sifat-sifat PP-homopolimer umumnya kuat, kaku, keras, kurang fleksibel, getas, mudah pecah pada temperatur rendah, kejernihannya sedang (*translucent*).

b. *Polypropylene-random-copolymer*

- Terdiri dari dua jenis monomer, yaitu propilena dan etilena. Monomer etilena secara acak di dalam rantai molekul PP sehingga mengurangi derajat kristalinitas.
- Skema: —PPEPPPEPPPEPPEPPPEPP—
- Pembuatan *PP-random-copolymer* dilakukan di dalam sebuah reaktor dengan penambahan etilena 2–8wt% dari jumlah propilena.
- Sifat-sifat *PP-random-copolymer* antara lain fleksibel, kekuatannya dan kekerasannya kurang dibandingkan dengan *PP-homopolymer*, kejernihannya dan *seal-ability* baik.

c. *Polypropylene-block-copolymer*

- Terdiri dari dua jenis monomer, yaitu propilena dan etilena. *PP-block-copolymer* ini tersusun atas dua fasa, yaitu PP-homopolimer dan *ethylene-propylene-rubber (EPR)*.
- Skema: —PPP-PEEEP-PP-PEEEP-PPP-PEEEP-PP—
- Pembuatan *PP-block-copolymer* dilakukan dengan dua tahap, masing-masing tahap membutuhkan sebuah reaktor. Tahap pertama adalah memproduksi PP-homopolimer dengan berat molekul rendah, kemudian mengalirkan PP-homopolimer ini ke reaktor kedua untuk kemudian dikopolimerisasikan dengan etilena dengan perbandingan etilena dengan propilena 2:3, sehingga menghasilkan *PP-block-copolymer*.
- Sifat-sifat *PP-block-copolymer* antara lain tangguh, kekuatan impaknya tinggi, tidak mudah pecah pada temperatur tinggi, sangat fleksibel, *opaque* dan berwarna putih susu. Kemudian, ciri khas lain material ini adalah akan menghasilkan fenomena *stress-whitening* saat mengalami deformasi plastis.

### 2.1.4 Perilaku Mekanis Polipropilena

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, polipropilena termasuk polimer semikristalin. Artinya memiliki 2 macam struktur, yaitu struktur amorf dan struktur kristalin. Ketika menerima pembebanan, respon dari kedua struktur inilah yang menjadi perilaku mekanis dari polipropilena<sup>[26]</sup>.

Seperti material semi kristalin pada umumnya, struktur kristalin dan amorf pada polipropilena tersusun dalam morfologi spherulit<sup>[26]</sup>. Didalam spherulit, struktur kristalin berbentuk lamela dengan ketebalan sekitar 10 nm, dengan rantai molekul PP yang tersusun acak tidak beraturan (amorf) dan saling terkait (*entangled*) diantara lamela-lamela tersebut<sup>[27,28]</sup>.

Karena panjang rantai molekul polimer dalam fasa kristalin diarahkan tegak lurus terhadap dimensi lateral dari lamela dan panjang rantai polimer jauh lebih panjang dibanding ketebalan lamela, maka banyak rantai molekul yang keluar-masuk beberapa butir kristalin dan daerah amorf<sup>[27,28]</sup>. Rantai molekul yang keluar-masuk butir kristalin dan menghubungkan beberapa butir dengan daerah amorf disebut *tie chain*<sup>[28]</sup>. Sejak tahun 2000-an, *tie* molekul ini menjadi pusat perhatian pada peneliti kimia polimer<sup>[27-30]</sup>. Tinjauan lebih lengkap mengenai *tie* molekul ini akan dilakukan pada subbab selanjutnya.

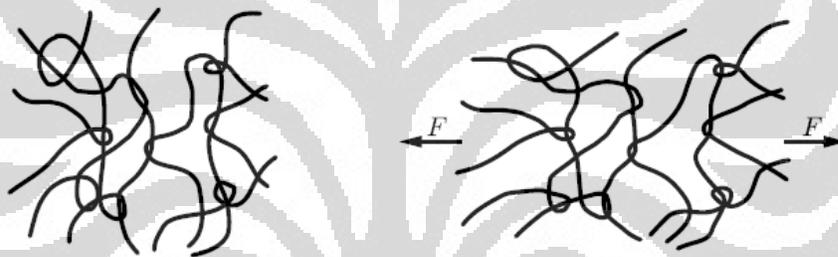
#### 2.1.4.1 Deformasi pada Polimer

Perilaku tegangan-regangan dari material polimer sebenarnya sangat kompleks. Sebab tergantung pada berbagai aspek dari karakteristik molekuler material tersebut, seperti berat molekul, *polydispersity*, mikrostruktur dari rantai (termasuk konsentrasi dan distribusi *stereodefekt* dan *regiodefekt*, *constitutional defect* seperti keberadaan komonomer), *packing*, *chain entanglement*, kristalinitas, heterogenitas, cacat kristal (seperti dislokasi, cacat titik, dan *structural disorder*), dan beberapa parameter pembentukan seperti temperatur, tekanan, kecepatan pembebanan, dan juga bentuk produk jadi<sup>[28]</sup>.

Deformasi elastis pada polimer terutama dipengaruhi oleh ikatan antar rantai molekul pada daerah amorf dibanding ikatan kovalen dalam rantai molekul<sup>[29]</sup>. Sehingga ketika menerima pembebanan elastis, maka yang terjadi pada material polimer adalah penekukan atau peregangan pada struktur amorf,

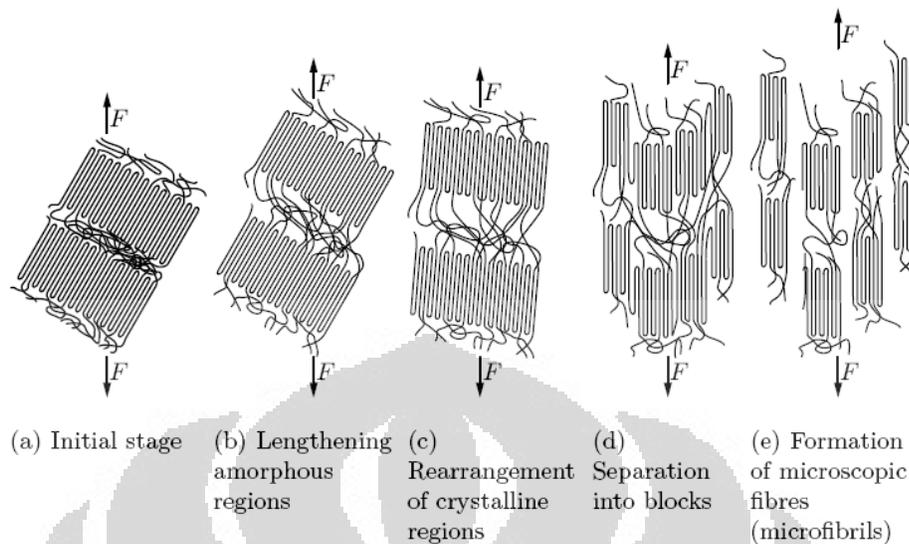
sementara struktur kristalin diam mempertahankan strukturnya. Hal inilah yang menghambat deformasi lebih lanjut.

Selain itu, struktur amorf juga diperkuat oleh interaksi *chain entanglement* antar rantai molekul<sup>[29,30]</sup>. Yang dimaksud dengan *chain entanglement* adalah suatu interaksi dimana rantai molekul saling terikat satu dengan yang lainnya pada titik-titik tertentu. Karena kondisi tersebut, maka ketika menerima pembebanan maka titik-titik ikatan ini akan menghambat pergerakan rantai molekul, sehingga deformasi tidak dapat berlanjut, seperti pada Gambar 2.3. Sehingga secara umum pada polipropilena, hambatan deformasi elastis dipengaruhi oleh keberadaan struktur kristalin dan juga *chain entanglement*<sup>[26]</sup>.



Gambar 2.3 Ilustrasi *Chain Entanglement*<sup>[29]</sup>

Jika menerima pembebanan melebihi batas elastis-nya, maka akan terjadi deformasi plastis pada material. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4, ketika struktur amorf sudah tidak mampu lagi menahan pembebanan, maka akan terjadi pergerakan pada struktur kristalin. Sehingga akan terjadi proses *sliding* dan *tilting* struktur kristalin pada material<sup>[31]</sup>. Ketika pergerakan tersebut juga tidak mampu menahan pembebanan, maka akan terjadi deformasi pada struktur tersebut. Inilah yang menjadi awal deformasi plastis pada polimer.



Gambar 2.4 Ilustrasi Tahap Deformasi pada Polimer<sup>[26,29,31]</sup>

Sejak dulu, sifat mekanis dari polimer semi kristalin sering dikaitkan dengan kristalinitas, morfologi struktur kristalin, orientasi rantai amorf, serta distribusi dan konsentrasi dari *tie chain* dalam daerah amorf diantara lamela<sup>[27-35]</sup>. Diantara kesemua faktor tersebut, *tie chain* merupakan konsep yang paling akhir dikembangkan.

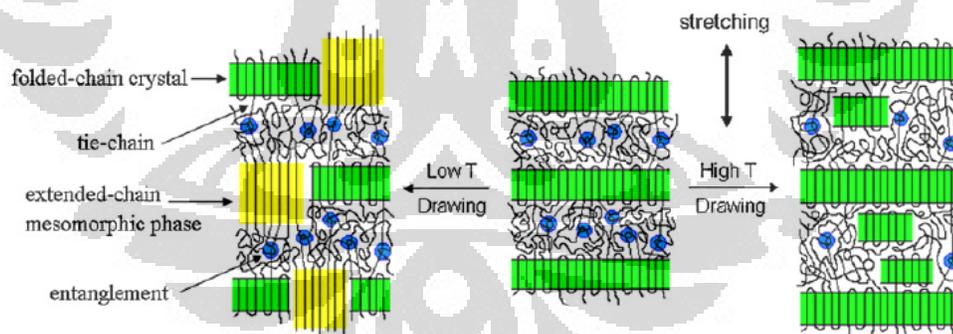
Lebih jauh menurut J. J. Jaminak dan G. C. Steven, *tie chain* ini memegang peranan penting dalam transfer energi antara struktur amorf dan kristalin<sup>[35,36]</sup>. Sebab karena bersifat kaku, struktur kristalin terutama berpengaruh terhadap pembebanan yang bersifat *low strain rate deformation*, seperti modulus, kekuatan tarik, dan *environmental stress cracking*<sup>[35]</sup>. Sedangkan struktur amorf yang bersifat seperti pegas akan lebih berperan dominan terhadap *high strain rate deformation*, seperti *impact*, *tear*, dan ketahanan patahan<sup>[35]</sup>. Sehingga baik pembebanan cepat maupun lambat, keduanya akan mempengaruhi *tie chain* yang terletak pada daerah amorf diantara lamela kristalin<sup>[36]</sup>.

Berat jenis (*density*) molekul *tie chain* dipengaruhi oleh berat molekul material. Seiring meningkatnya berat molekul PP, diketahui bahwa meningkatnya kemungkinan *chain entanglement* dan juga interlamela *tie chain* pada fasa amorf<sup>[37,38]</sup>. Karena meningkatnya berat jenis dari *tie* molekul tersebut, maka

regangan dan *fracture toughness* material ini untuk menerima pembebanan juga meningkat<sup>[30,38]</sup>.

Konsentrasi *tie* molekul ini juga dipengaruhi oleh temperatur kristalisasi<sup>[41]</sup>. Semakin tinggi temperatur kristalisasi, maka material akan menjadi semakin padat (*compact*), sebab sambungan antara lamela dan sperulit semakin sedikit seiring mengecilnya ukuran sperulit dan menebalnya lamela kristalin<sup>[41]</sup>. Karena sedikitnya sambungan ini, maka dapat disimpulkan semakin tinggi temperatur kristalisasi maka kepadatan *tie chain* antar lamela akan semakin rendah.

Karena perkembangan percobaan dan teori maka baru mulai sekitar tahun 2000, jurnal-jurnal mulai banyak membahas hipotesis tentang *chain entanglement* dan *tie chain* yang mampu menjelaskan bahwa pada deformasi temperatur rendah, fragmentasi lamela kristalin tidak lepas dari pengaruh kuatnya *entanglement* interlamela yang berakibat terbentuknya fasa *mesomorphic*<sup>[27-30]</sup>. Sedangkan pada pembebanan temperatur tinggi, yang terjadi adalah peristiwa lepasnya *entanglement* yang berakibat relaksasi dari *tie chain* dan terbentuknya lamela baru<sup>[27,29]</sup>. Ilustrasi lebih jelas mengenai peristiwa tersebut diilustrasikan pada Gambar 2.5.

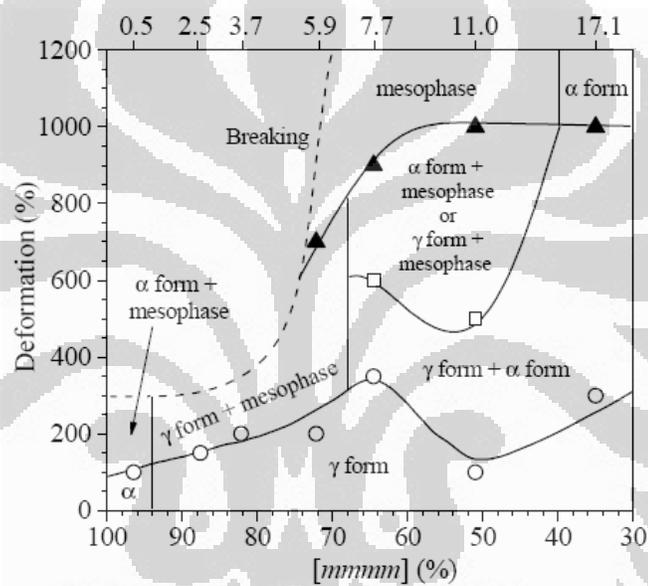


Gambar 2.5 Ilustrasi Pengaruh *Entanglement* Interlamela terhadap Deformasi<sup>[27]</sup>

Yutaka Koike dan Miko Cakmak menjelaskan bahwa pada peristiwa deformasi sperulit menjadi *fibril* atau dengan kata lain pada peristiwa deformasi lamela kristalin menjadi *mesomorphic*, terjadi *twinning*, *tilt* dan *slip*, serta *twisting* terhadap struktur kristalin tergantung pada arah orientasi lamela tersebut arah tarikan (*stretching*)<sup>[37,38]</sup>.

### 2.1.4.2 Kekakuan dan Keuletan pada Polipropilena

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya yang mempengaruhi kekakuan dari polimer terutama adalah struktur kristalin dan juga *chain entanglement* dari rantai molekul. Pada PP, struktur kristalin ini terutama dipengaruhi oleh taktisitas dari rantai molekul. Secara umum, jumlah fraksi ataktik berbanding terbalik dengan kristalinitas. Semakin tinggi fraksi ataktik dalam PP, maka struktur kristalin akan semakin sedikit.



Gambar 2.6 Diagram Fasa Fraksi Isotaktik (mmmm) terhadap % Deformasi pada Temperatur Kamar<sup>[39,41]</sup>

Seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.6, struktur dari material PP tergantung pada taktisitas dan besar deformasi yang dialaminya<sup>[39]</sup>. Secara umum, isotaktik PP memiliki 3 jenis struktur kristal pada modifikasi alotropik<sup>[40,41]</sup>.

*Monolitik  $\alpha$ -form* yang paling stabil dan muncul pada sintesis dan proses standar. Struktur ini merupakan struktur paling dominan pada PP hasil kristalisasi dari lelehan (*melt-crystallization process*). Karakteristiknya adalah *lenticular lamellae* yang tersusun memanjang pada arah [100] dalam *unit cell*<sup>[42-45]</sup>.

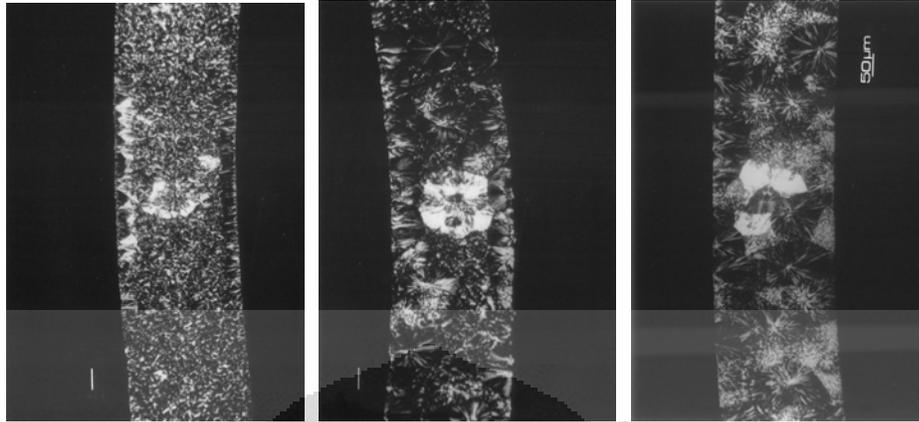
Kristal *pseudohexagonal  $\beta$ -form* pertama kali ditemukan oleh Keith *et al*<sup>[40]</sup> dan secara termodinamik dan mekanik kurang stabil dibanding  $\alpha$ -form<sup>[42-45]</sup>. Karakteristik struktur ini ialah temperatur lelehnya yang lebih rendah, sehingga dapat membeku lebih cepat dibanding  $\alpha$ -form<sup>[42-45]</sup>. Struktur ini merupakan struktur kristal pada PP akibat penambahan *nucleating agent*<sup>[46]</sup>.

Sedangkan struktur yang terakhir ialah *orthorhombic  $\gamma$ -form*. Struktur ini hanya muncul pada pendinginan lambat pada tekanan tinggi atau saat material menerima pembebanan geser. Saat produksi PP biasa, struktur ini jarang sekali muncul. Karena dihasilkan pada pembenanan geser yang tinggi, struktur ini memiliki karakteristik yaitu *high degree molecular orientation*<sup>[42-45]</sup>.

Kemudian yang dimaksud dengan struktur *mesomorphic* atau *mesophase* adalah struktur *fibril* hasil deformasi plastis lamela kristalin<sup>[47-50]</sup>. Struktur ini berupa rantai molekul yang disearahkan akibat adanya pembebanan. Sehingga dapat digambarkan merupakan rantai molekul yang tersusun longitudinal akibat rantai molekul kristalin yang semula transversal menerima pembebanan<sup>[37,51]</sup>.

Fenomena molekuler yang penting selain struktur kristal adalah *chain entanglement*. Fenomena ini terutama dipengaruhi oleh panjang rantai (berat) molekul atau secara tidak langsung dipengaruhi oleh kecepatan alir lelehan (MFR). Semakin panjang rantai molekul (atau semakin rendah MFR) maka *chain entanglement* yang terjadi akan semakin banyak<sup>[38,39]</sup>.

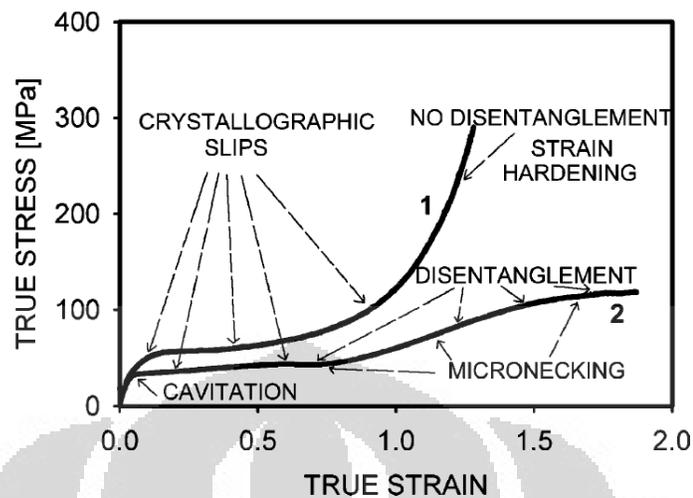
Dalam jurnalnya, F Jay *et al* juga membahas korelasi antara proses kristalisasi dengan fenomena *entanglement*<sup>[30,39]</sup>. Seperti sudah dijelaskan diatas, seiring meningkatnya berat molekul dari material, maka peristiwa *chain entanglement* juga meningkat<sup>[38]</sup>. Akibatnya struktur yang terbentuk adalah cenderung semakin amorf, seperti yang terlihat dari perbedaan ukuran sperulit pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Berturut-turut dari kiri ke kanan: morfologi Spherulit dari sampel  $M_w=208000\text{gr/mol}$ ,  $M_w=268000\text{gr/mol}$ , dan  $M_w=377000\text{gr/mol}$ <sup>[30]</sup>

J. Aurrekoetxea *et al*, juga mencoba menjelaskan melalui pendekatan *multiple extrusion* terhadap sampel PP, bahwa turunnya berat molekul dari PP akan berakibat meningkatnya mobilitas dan kemampuan rantai PP untuk menekuk secara teratur (*folding*) dan membentuk lamela yang lebih tebal dengan derajat kristalinitas yang lebih tinggi<sup>[38]</sup>. Dari sifat mekanis, efeknya ialah kecenderungan meningkatnya modulus elastik dan tegangan luluh dari PP, sementara menurunnya regangan saat patah dan *fracture toughness* dari material karena tingginya tegangan luluh dan rendahnya interlamela *tie-molecule density*<sup>[39,40]</sup>.

Perilaku *entanglement* selain dipengaruhi oleh temperatur pembebanan juga dipengaruhi oleh arah pembebanan, demikian yang dipaparkan oleh Andrzej Pawlak *et al*<sup>[36]</sup>. Menurut Andrzej, berbeda dari perilaku pada pembebanan tarik, pada pembebanan tekan (*die compression*), tidak terjadi mekanisme pelepasan *entanglement* melainkan mekanisme *strain hardening* yang disebabkan oleh *entanglement* yang jenuh<sup>[36]</sup>. Sebab pembentukan *void* akibat deformasi plastis yang akan memberi ruang untuk peregangannya *entanglement*, diminimalisir oleh beban pada komponen tekan<sup>[36,52]</sup>. Berikut pada Gambar 2.8, dijelaskan fenomena yang terjadi pada kurva tegangan-regangan sebenarnya (*true stress-strain*) pada pembebanan tekan (grafik 1) dan pembebanan tarik (grafik 2).



Gambar 2.8 Grafik Tegangan-Regangan Sebenarnya terhadap: (1) Pembebanan Tekan dan (2) Pembebanan Tarik<sup>[36]</sup>

Karena PP pada dasarnya merupakan material yang kaku, maka umumnya untuk meningkatkan keuletan dari material ini, dilakukan dengan cara kopolimerisasi. Penambahan komonomer ini dimaksudkan untuk meningkatkan heterogenitas pada rantai molekul polimer sehingga interaksi yang timbul antar rantai yang berdekatan ialah struktur yang bersifat amorf atau dengan kata lain menurunkan derajat kristalinitasnya<sup>[53-55]</sup>.

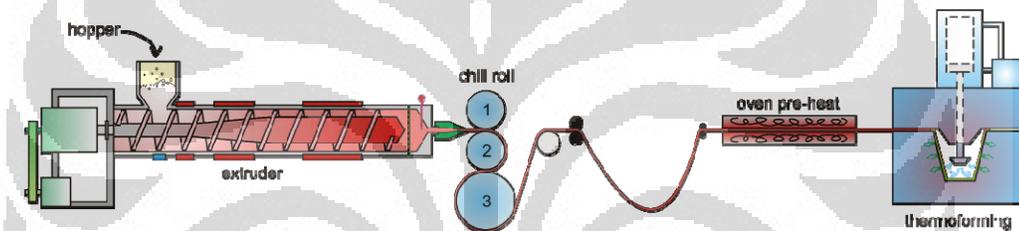
Penambahan kopolimer etilena pada PP akan menyebabkan struktur amorf yang terbentuk bersifat elastis seperti pegas, sehingga sering disebut juga *energy absorber structure*, karena mampu menyerap beban seperti pegas<sup>[55,56]</sup>. Namun A. R. Kamdar menyebutkan bahwa pada aplikasi industri, penambahan kopolimer etilena pada PP ini memiliki batasan kelarutan<sup>[55]</sup>. Secara umum, batas kelarutannya ideal ialah 18mol%, sedangkan etilena kopolimer ini benar-benar tidak larut dalam matriks PP jika lebih dari 20mol%. Hal ini dikarenakan faktor temperatur dan distribusi berat molekul yang memungkinkan terjadinya pemisahan fasa<sup>[55]</sup>.

Dengan katalis generasi terbaru, sekarang dimungkinkan untuk menghasilkan material PP dengan berat molekul tinggi, namun memiliki kandungan etilena kopolimer yang tinggi juga<sup>[48,52]</sup>. Tantangan industri polimer, khususnya PP sekarang adalah selain menghasilkan material secara komersial dengan berat molekul dan kandungan etilena kopolimer yang tinggi, juga tetap

menjaga agar fraksi isotaktik dari PP tetap tinggi, sehingga material yang dihasilkan tidak hanya bersifat ulet, namun lebih tangguh.

## 2.2 THERMOFORMING

sesuai namanya, *thermoforming* adalah suatu proses manufaktur yang membentuk lembaran atau film polimer menjadi produk jadi dengan menggunakan panas dan tekanan<sup>[2,4]</sup>. Gambar 2.4 merupakan ilustrasi dari proses thermoforming yang digabungkan dengan proses ekstrusi dalam 1 siklus proses kontinu. Produk yang dihasilkan dari proses ini sangat beragam mulai dari produk yang berukuran kecil dan tipis seperti *covers*, *displays*, *blister packaging*, *trays*, gelas, dan kemasan makanan, sampai produk part-part otomotif yang besar.



Gambar 2.9 Ilustrasi Proses *In-Line Thermoforming*<sup>[10]</sup>

Berikut adalah beberapa kelebihan dari *thermoforming* dibanding proses pencetakan lainnya<sup>[2]</sup>, yaitu:

- Dapat membentuk produk dengan permukaan yang lebar, dengan biaya cetakan dan mesin yang relatif rendah, sebab proses ini menggunakan tekanan dan temperatur yang relatif rendah.
- Mudah membentuk produk yang sangat tipis (yang sulit dicapai dengan teknik lainnya), dengan kecepatan produksi tinggi dan investasi modal yang rendah.

Proses *thermoforming* selalu diawali dengan proses ekstrusi lembaran plastik. *Extruder* yang digunakan dalam proses ini sama seperti pada proses ekstrusi lembaran biasa seperti yang digambarkan pada Gambar 2.4. Karena itu secara umum, persyaratan material yang dapat diolah dengan menggunakan proses ini juga sama seperti material untuk proses ekstrusi yaitu harus memiliki *melt strength* yang baik, atau dengan memiliki *melt flow rate* rendah (biasanya kurang dari 15)<sup>[20]</sup>.



Gambar 2.10 *Sheet Extruder*<sup>[22]</sup>

Pada proses *forming*, *sheet* hasil ekstrusi akan dipanaskan lagi secara konveksi<sup>[4]</sup>. Karena menggunakan proses konveksi, maka panas *heater* digunakan berkisar 400–500°C. Sehingga degradasi material terutama terjadi pada tahap ini<sup>[21]</sup>. Kemudian lembaran panas ini (di atas *Heat Deflection Temperature*) akan dibentuk dan didinginkan. Pada Gambar 2.4 dibawah ini adalah mesin *thermoforming*. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, komponen utama mesin ini adalah *oven heater* dan juga *forming molding*.



Gambar 2.11 Mesin *Thermoforming*<sup>[3]</sup>

Produk yang telah dibentuk tersebut kemudian dipotong dari keseluruhan lembarannya. Secara umum, semakin kaku dan keras suatu material PP, maka akan semakin mudah proses pemotongannya. Karena itu, untuk bisa menjalankan mesin dengan kecepatan tinggi, maka diharapkan material dengan karakteristik yang cukup kaku.

Umumnya sisa potongan tersebut dipotong-potong lagi menjadi serpihan (*regrind*), dan kemudian dicampur dengan polimer murni untuk diproses kembali membentuk lembaran. Biasanya perbandingan antara material *virgin* dengan *regrind* berkisar dari 40 hingga 60 wt%, tergantung dari performa produk yang diinginkan.

Pada mesin-mesin buatan Eropa, dilengkapi juga dengan mekanisme penyusunan gelas hasil pembentukan ini yang disebut *stacking mold*<sup>[3]</sup>. Prinsip mekanisme ini adalah dengan memutar *moving plate mold*, sehingga ketika gelas didorong keluar akan ditangkap dan disusun dalam *stacking bar*. Karena pendorongan ini menggunakan sistem mekanis, maka kekakuan dari material merupakan persyaratan wajib. Sebab jika gelas kurang kaku, maka ketika didorong dari cetakan, gelas ini tidak akan mampu mendorong gelas-gelas lain yang berada didepannya.

Hal yang juga perlu diperhatikan dalam pemilihan material untuk proses ini adalah kemampuan pembekuan bahan dan juga sifat ketahanan panasnya. Hal ini penting karena seperti yang telah dijelaskan sebelumnya proses ini melibatkan fasa setengah jadi yaitu *sheet* dan kemudian digunakan ulang setelah mengalami proses *regrind*, sehingga pada prosesnya *virgin* material akan mengalami 4 kali proses pemanasan dan pendinginan pada 1 siklus proses. Sehingga pemilihan anti oksidan juga perlu diperhatikan pada saat pemilihan bahan untuk proses ini<sup>[21]</sup>.

Kontrol kualitas gelas *thermoforming*, biasanya dilakukan melalui pengecekan berat gelas (berhubungan dengan ketebalan dinding), *top load* (mengukur besar beban yang mampu ditahan gelas sebelum berdeformasi/penyok), dan *drop test* (ketahanan gelas terhadap benturan apabila dijatuhkan dari ketinggian tertentu).

Persyaratan ketahanan benturan (yang disimulasikan dengan *drop test*) ini adalah kontrol kualitas yang sangat diperhatikan industri gelas dan air minum, sebab jika gelas yang diproduksi mudah pecah, maka kerugian yang ditanggung bukan hanya terkait kerugian gelas, namun juga isi, penutup (*sealing*), dan juga kemasan (kardus). Karena itu, keuletan yang baik merupakan persyaratan wajib dalam kontrol kualitas gelas.

Sehingga dapat disimpulkan, maka keseimbangan antara kekakuan yang cukup sehingga mudah diproses dan juga keuletan yang dituntut dari performa gelas sangat dibutuhkan pada proses *thermoforming*<sup>[21]</sup>.

## 2.3 ANALISIS STATISTIKA

### 2.3.1 Analisis Korelasi

Analisis korelasi adalah sekumpulan teknik yang digunakan untuk mengukur hubungan antara dua variabel<sup>[24]</sup>. Teknik ini sangat berguna untuk melihat seberapa jauh pengaruh suatu variasi terhadap variasi lainnya.

Dalam ilmu statistik, dikenal adanya 2 macam variabel, yaitu variabel bebas dengan variabel terikat<sup>[25]</sup>. Variabel bebas adalah variabel yang menjadi dasar dari suatu perkiraan atau estimasi. Karena itu juga sering disebut variabel prediktor dan umumnya untuk mempermudah diskalakan ke dalam sumbu-X. Sedangkan variabel terikat adalah variabel yang sedang diprediksi atau diperkirakan, umumnya diskalakan kedalam sumbu-Y.

Analisis ini pertama kali diperkenalkan oleh Karl Pearson sekitar tahun 1900. Karl Pearson pada saat itu merumuskan suatu koefisien yang menghubungkan dua variabel, yang kemudian dikenal sebagai koefisien korelasi<sup>[24]</sup>. Koefisien ini biasa dinotasikan dalam 'r', seperti pada persamaan dibawah ini.

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{(n - 1)S_x S_y} \quad (2.1)$$

dimana, r = koefisien korelasi

$\bar{x}$  = rata-rata variabel bebas

$\bar{y}$  = rata-rata variabel terikat

n = jumlah populasi variabel

$S_x$  = standar deviasi variabel bebas

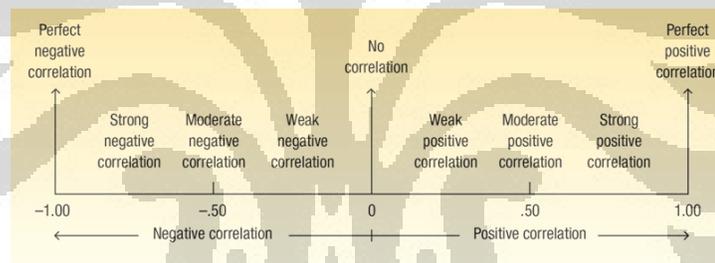
$S_y$  = standar deviasi variabel terikat

$$\text{dengan, } \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (2.2)$$

dan

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (2.3)$$

Koefisien korelasi tersebut dapat bernilai dari -1 hingga 1<sup>[24]</sup>. Nilai -1 atau 1 menunjukkan korelasi yang sempurna, sebaliknya nilai 0 menunjukkan tidak adanya korelasi. Kemudian lebih jauh nilai negatif menunjukkan hubungan berbanding terbalik, sedangkan nilai positif menunjukkan hubungan berbanding lurus. Diagram yang menunjukkan ilustrasi koefisien korelasi digambarkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.12 Diagram Hubungan Korelasi<sup>[24]</sup>

Namun, karena hubungan kuat dan lemah tersebut sering dibiaskan dengan tanda negatif atau positif, maka penafsiran arti korelasi yang lebih tepat adalah koefisien determinasi<sup>[25]</sup>. Koefisien ini dihitung dengan mengkuadratkan koefisien korelasi ( $r^2$ ). Sehingga koefisien determinasi akan menunjukkan perbandingan atau persentase hubungan penentuan variasi terikat oleh variasi bebas.

$$\text{Koefisien Determinasi} = r^2 \quad (2.4)$$

### 2.3.2 Regresi Linier dan *Trendline*

Setelah mengetahui hubungan antara variabel-variabel yang ada, maka diperlukan suatu pendekatan statistik untuk melakukan suatu formulasi atau prediksi secara empiris. Pendekatan yang umum digunakan adalah Analisis regresi linier. Analisis regresi linier adalah teknik yang digunakan untuk mengembangkan suatu persamaan dan memberikan suatu perkiraan melalui suatu hubungan linier antara dua variabel<sup>[24]</sup>.

Kemudian salah satu metoda terbaik yang umum dipakai untuk melakukan Analisis ini disebut metoda *Least Square* (kuadrat terkecil). Pada prinsipnya, metoda matematis ini, dilakukan dengan cara menentukan sebuah persamaan regresi dengan meminimalisasi penjumlahan dari kuadrat jarak vertikal antara nilai Y yang sesungguhnya dengan nilai Y yang diramalkan. Bentuk umum persamaan regresi linier metoda *Least Square* yaitu,

$$y = a + bx \quad (2.5)$$

dimana,  $y$  = nilai variabel terikat yang diperkirakan melalui variabel bebas.

$a$  = titik potong sumbu Y.

$b$  = kemiringan garis atau perubahan rata-rata dalam variabel terikat untuk setiap perubahan variabel bebas.

$x$  = semua nilai dalam populasi variabel bebas.

$$\text{dengan, } b = r \left( \frac{S_y}{S_x} \right) \quad (2.6)$$

dan

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2.7)$$

dimana,  $r$  = koefisien korelasi

$\bar{x}$  = rata-rata variabel bebas

$\bar{y}$  = rata-rata variabel terikat

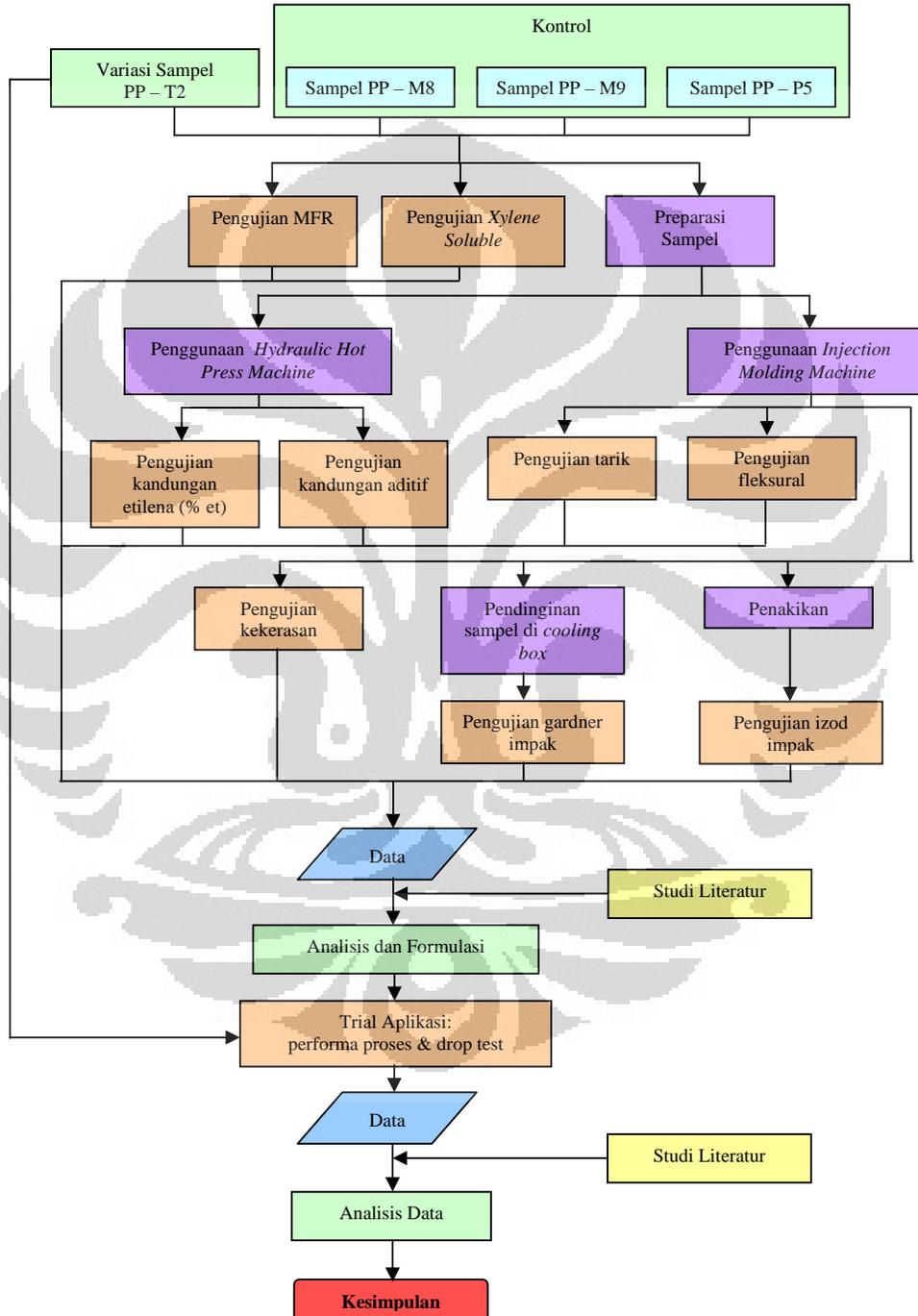
$S_x$  = standar deviasi variabel bebas

$S_y$  = standar deviasi variabel terikat

## BAB 3 PENELITIAN

### 3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Pada Gambar 3.1 tergambar diagram alir kegiatan penelitian yang telah dilakukan.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

### 3.2 ALAT DAN BAHAN

#### 3.2.1. Alat yang digunakan

Berikut adalah alat-alat yang digunakan pada saat pembuatan dan preparasi sampel:

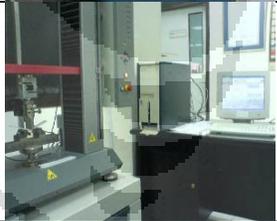
Tabel 3.1 Spesifikasi Alat saat Preparasi

| <i><b>Nama Alat</b></i>            | <i><b>Spesifikasi</b></i>  | <i><b>Foto</b></i>   |
|------------------------------------|--|--|
| <i>Hydraulic Hot Press Machine</i> | S/N:<br>91-10-012<br>Model no.:<br>SPWL420-X-4-M1-X67<br><br><i>PHI city of Indutry, Calif, USA</i>  |   |
| <i>Injection Molding Machine</i>   | Type:<br>221-55-250<br>S/N:<br>153108<br>Clamp. Force:<br>250 KN<br>Toggle Clamp. Mechanism<br><br><i>ARBURG Maschinenfabrik<br/>Hehl &amp; Sohne Gmbh &amp; Co. KG,<br/>Germany</i> |  |

Alat yang digunakan pada pengujian sampel:

Tabel 3.2 Spesifikasi Alat saat Pengujian

| <i><b>Nama Alat</b></i> | <i><b>Spesifikasi</b></i>   | <i><b>Foto</b></i>  |
|-------------------------|---|---|
| <i>Melt Indexer</i>     | <b>“Tinius Olsen” Extrusion Plastometer</b><br>digital, direct measurement<br>Model MP993<br><br><i>Willow Grove, PA, USA</i> |  |

| <i>Nama Alat</i>                  | <i>Spesifikasi</i>  | <i>Foto</i>   |
|-----------------------------------|---|---|
| <i>Xylene Soluble Tester Set</i>  | <p>Sesuai ASTM D5492 (<i>Analisis Penentuan Fraksi Ataktik pada Polipropilena dengan metode Kuantitatif Reflux Gravimetri</i>)</p>  |    |
| <i>X-ray Fluorescence</i>         | <p>Type:<br/>9430 820 00011<br/>No.:<br/>DY768<br/>Phillips Analytical X-Ray B.V.<br/>Lelyweg 1<br/><br/>7602 EA Almelo, The Netherlands</p>  |    |
| <i>Fourier Transform Infrared</i> | <p>BIORAD Excalibur Series</p>  |   |
| <i>Multitesting Machine</i>       | <p>Zwick/Roell Z005</p>   |  |
| <i>Rockwell Hardness Tester</i>   | <p><b>“Matsuzawa” digital Rockwell type hardness tester</b><br/>Model:<br/>DXT-1<br/>S/N:<br/>DX1416<br/>Load:<br/>15 – 150 Kg<br/>Hydraulic system<br/><br/>Matsuzawa Seiki Co, Ltd. Tokyo<br/>Japan</p> |  |

| <i>Nama Alat</i>             | <i>Spesifikasi</i>                                    | <i>Foto</i>   |
|------------------------------|---|---|
| <i>Izod Impact Tester</i>    | <b>Izod Impact Tester Resil 5.5</b><br>direct reading |  |
| <i>Gardner Impact Tester</i> | BYK-Gardner   |  |

Kemudian untuk menguji kinerja dari hasil formulasi sampel, dilakukan pengujian (*trial*) aplikasi, dengan menggunakan:

Tabel 3.3 Spesifikasi Mesin Aplikasi

| <i>Nama Alat</i>                          | <i>Spesifikasi</i>   | <i>Foto</i>   |
|---|--|---|
| <i>Inline Extruder-Thermoforming Unit</i> | <b>Battenfield-Gabler M98</b><br>Output: ~300kg/jam<br>Cycle time: 31.8 cyc/min<br>Cavity: 32<br>Closing Pressure: 650kN |  |

### 3.2.2. Bahan yang digunakan

#### 3.3.2.1. T2

PP T2 adalah material polipropilena untuk aplikasi ekstrusi dan thermoforming yang akan dijadikan objek penelitian perubahan parameter bahan pada skala pembuatan *plant trial*. Pada Tabel 3.4 ditunjukkan pemetaan perubahan variabel material. Kemudian untuk tiap variasi tersebut digunakan 25kg sampel untuk dilakukan pengujian dan karakterisasi. Sedangkan khusus untuk sampel 5B3V, juga disiapkan 200kg sampel untuk pengujian *trial* proses aplikasi, sebagai sampel standar sebelum formulasi.

Tabel 3.4 Spesifikasi Sampel T2

| <i>Parameter</i>                            | <i>Satuan</i> | <i>Nilai</i> |
|---|---------------|--------------|
| <i>Melt Flow Rate (MFR) – 230°C/2.16 kg</i> | gr/10 min     | 2.5-3.1      |
| Fraksi Ataktik                              | %wt           | 3.8-4.6      |
| Kandungan Etilen Kopolimer                  | %wt           | 0.5-0.7      |

Tabel 3.5 Pemetaan Variasi Sampel T2

| Parameter   | Unit     | 5B3V              | 0B2V   | 7B1A   | 3B1S   | 4B2V   | 7B2V   |
|-------------|----------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| MF          | gr/10min | 2.93              | 2.79   | 3.4    | 2.52   | 3.1    | 3.04   |
| XS          | %ow      | 3.81              | 3.34   | 4.34   | 4.05   | 4.35   | 4.19   |
| Et          | %ow      | 0.59              | 0.57   | 0.54   | 0.44   | 0.99   | 0.87   |
| Keterangan: |          |                   |        |        |        |        |        |
| MFR         |          | Normal            | Normal | High   | Low    | Normal | Normal |
| XS          |          | Normal (Low Site) | High   | Normal | Normal | Normal | Normal |
| Et          |          | Normal            | Normal | Normal | Low    | High   | High   |

## 3.3.2.2. M8

PP M8 adalah kompetitor produk T2 pada aplikasi *thermoforming*. Material ini digunakan sebagai pembanding karena material ini merupakan material homopolimer polipropilena murni untuk aplikasi *thermoforming* yang menggunakan MFR rendah sebagai pengatur sifat mekanis. Dalam penelitian ini, sebanyak 25kg sampel digunakan untuk pengujian dan karakterisasi.

Tabel 3.6 Hasil Karakterisasi M8

| <i>Parameter</i>                            | <i>Satuan</i> | <i>Nilai</i> |
|---|---------------|--------------|
| <i>Melt Flow Rate (MFR) – 230°C/2.16 kg</i> | gr/10 min     | 1.82         |
| Fraksi Ataktik                              | %wt           | 3.81         |
| Kandungan Etilen Kopolimer                  | %wt           | negatif      |

## 3.3.2.3. M9

PP M9 adalah produk lain untuk aplikasi *thermoforming* selain M8 dan T2 yang beredar dipasaran. Perbedaan material ini dengan M8 terutama terletak pada MFR yang lebih tinggi. Sama seperti sebelumnya, dalam penelitian ini, sebanyak 25kg sampel digunakan untuk pengujian dan karakterisasi.

Tabel 3.7 Hasil Karakterisasi M9

| <i>Parameter</i>                            | <i>Satuan</i> | <i>Nilai</i> |
|---|---------------|--------------|
| <i>Melt Flow Rate (MFR) – 230°C/2.16 kg</i> | gr/10 min     | 2.3          |
| Fraksi Ataktik                              | %wt           | 4.33         |
| Kandungan Etilen Kopolimer                  | %wt           | negatif      |

### 3.3.2.4. P5

PP P5 juga merupakan kompetitor produk T2 yang biasa digunakan pada aplikasi *thermoforming* di Indonesia. Perbedaan material ini dengan M8 dan M9, yaitu sebenarnya produk ini merupakan produk yang sebenarnya didesain untuk aplikasi karung bening. Kelebihan produk ini yaitu produk ini adalah PP *extrusion grade* (MFR rendah) yang telah dimodifikasi dengan penambahan *nucleating agent*. Kemudian sama seperti sebelumnya, dalam penelitian ini, sebanyak 25kg sampel digunakan untuk pengujian dan karakterisasi.

Tabel 3.8 Hasil Karakterisasi P5

| <i>Parameter</i>                            | <i>Satuan</i> | <i>Nilai</i> |
|---|---------------|--------------|
| <i>Melt Flow Rate (MFR) – 230°C/2.16 kg</i> | gr/10 min     | 1.7          |
| Fraksi Ataktik                              | %wt           | 4.6          |
| Kandungan Etilen Kopolimer                  | %wt           | negatif      |
| Kandungan <i>Nucleating Agent</i>           | ppm           | 389          |

## 3.3 PROSEDUR PENELITIAN

### 3.3.1 Preparasi Sampel:

#### 3.3.1.1 Injection Molding

Sampel: Pellet T2 (6 formulasi), M8, M9, dan P5

Kondisi Pengujian:

Temp Zona 1: 250°C

Temp Zona 2: 260°C

Temp Zona 3: 270°C

Temp Nozzle: 280°C

Prosedur Uji:

1. Pastikan *hopper* dalam keadaan kosong. Bila ternyata masih terdapat sisa pellet, maka pellet tersebut harus dibuang terlebih dahulu dengan cara mendorong *hopper* ke arah samping sampai pellet mengalir turun melalui selang yang tersedia. Kemudian kembalikan *hopper* ke posisi semula.
2. Masukkan sampel ke dalam *hopper*.
3. Hidupkan mesin pendingin dan mesin injeksi.

4. Buang sisa polimer leleh yang berada di dalam *extruder* dan bilas menggunakan pellet sampel.
5. Setting temperatur dan tekanan sebagai variabel *trial and error* untuk memperoleh hasil injek-kan yang sesuai agar diperoleh spesimen yang baik.
6. Kondisikan spesimen pada temperatur  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  & kelembaban relatif  $50 \pm 2\%$  minimal selama 40 jam.

### 3.3.1.2 Hot press

Sampel: Pellet T2 (6 formulasi), M8, M9, dan P5

Kondisi Pengujian:

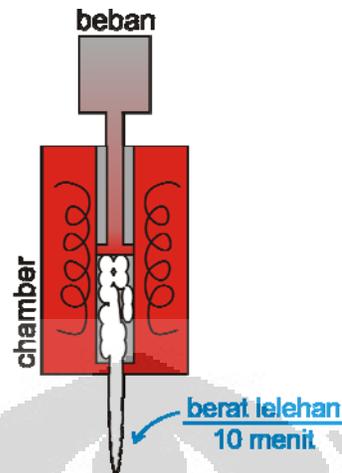
Temperatur:  $230^\circ\text{C}$

Prosedur Uji:

1. Tempatkan susunan cetakan pada press panas. Panaskan selama 2 menit pada tekanan kontak dan 1 menit pada tekanan 2500 psi;
2. Pindahkan cetakan pada press dingin pada tekanan 2500 psi selama 2 menit atau sampai dingin.

### 3.3.2 Pengujian Melt Flow Rate

Salah satu pengujian yang sangat praktis sehingga mudah diaplikasikan untuk mengetahui karakteristik dari suatu polimer adalah pengukuran kecepatan alir lelehan (*melt flow rate*). Pengukuran ini sangat berguna untuk mempelajari prosesabilitas dari suatu material polimer. Prinsipnya adalah dengan mengukur banyaknya sampel (bentuk bisa pellet ataupun serbuk) yang meleleh pada waktu tertentu (10 menit) apabila menerima pembebanan tertentu yang sesuai dengan standar<sup>[5]</sup>. Karena mengukur berat lelehan dalam waktu tertentu, maka semakin besar nilai MFR, maka polimer tersebut semakin encer<sup>[5]</sup>. Pada Gambar 3.1 diilustrasikan pengukuran MFR.



Gambar 3.2 Ilustrasi Pengukuran MFR<sup>[4]</sup>

Secara umum, MFR berkaitan dengan berat molekul dari material polimer. Semakin panjang rantai molekul polimer (semakin tinggi berat molekulnya), maka molekul polimer tersebut akan semakin sulit bergerak, akibatnya ketika dilelehkan, material ini akan terlihat lebih kental atau dengan kata lain memiliki MFR yang rendah. Dengan ilustrasi itu, dapat disimpulkan bahwa MFR berbanding terbalik dengan berat molekul polimer<sup>[5]</sup>.

Pada penelitian ini digunakan sampel pellet T2 (6 variasi formulasi), M8, M9, dan P5. Sedangkan alat yang digunakan dalam pengujian ini adalah *Extrusion Plastometer* dari Tinius-Olsen dengan kondisi dan prosedur pengujian sebagai berikut:

*Setting Temperature* = 230°C

*Actual Temperature* = 230°C

*Real Time Preheat* = 300 detik

*Beban* = 2060 gram

Prosedur Uji:

1. Cek kondisi peralatan bila sudah sesuai dengan standar, pengujian bisa dimulai;
2. Masukkan pellet sekitar 20 gram kedalam *extrusion plastometer*;
3. Tekan-tekan dan padatkan pellet dengan cepat;
4. Singkirkan kelebihan pellet, lalu pasang piston dan beban;
5. Aktifkan mode pengukuran dan tunggu hasilnya;

6. Catat hasil untuk 2 kali pengambilan data tiap formula dan ulangi pengukuran jika perlu;
7. Bersihkan alat uji sesuai prosedur kebersihan alat;
8. Ulangi pengujian untuk formula yang berbeda.

### 3.3.3 Pengujian Fraksi Ataktik (*Xylene Soluble*)

Pengukuran fraksi ataktik dalam material PP pada prinsipnya memanfaatkan perbedaan kelarutan antara fraksi ataktik dan isotaktik dalam pelarut ortho-xylene<sup>[7]</sup>. Secara umum, fraksi ataktik dapat larut dalam xylene, sementara isotaktik tidak larut. Sehingga dengan menggunakan prinsip gravimetri, presentase kuantitatif dari fraksi ataktik dapat dihitung. Prosedur pengujian kadar fraksi ataktik dalam PP dituangkan dalam standar ASTM D5492. Pada prinsipnya, tidak ada batasan bentuk sampel yang digunakan, sehingga baik pellet, serbuk, maupun regrind dapat diukur kandungan fraksi ataktiknya. Foto aparatus yang digunakan pada pengukuran fraksi ataktik menggunakan prinsip gravimetri digambarkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.3 Pengukuran Fraksi Ataktik dengan Metode Reflux

Untuk menjamin kemurnian dan kesempurnaan proses pelarutan fraksi ataktik dalam xylene, maka proses ini diawali dengan mekanisme *reflux*. Karena harus melewati tahap *reflux* dan pemanasan serta pendinginan yang berulang, maka kelemahan metode pengukuran ini adalah waktunya yang sangat lama.

Dalam 1 siklus pengukuran, untuk kadar fraksi ataktik 2 – 5 wt% membutuhkan sekitar 4 jam pengukuran.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, perbandingan fraksi ataktik dan isotaktik akan berpengaruh terhadap performa mekanis dan optis material. Secara umum, semakin tinggi jumlah fraksi ataktik dalam material, maka struktur atau susunan rantai molekul PP yang terbentuk semakin amorf<sup>[7,14]</sup>. Akibatnya material akan bersifat ulet, dapat meredam beban, dan juga bening. Sehingga sebaliknya jika semakin sedikit fraksi ataktik, maka material akan bersifat kaku namun relatif buram.

Pada penelitian ini digunakan sampel pellet T2 (6 variasi formulasi), M8, M9, dan P5. Sedangkan perlengkapan, kondisi, dan prosedur pengujian fraksi ataktik yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- *Reflux-Condenser Apparatus*, 400 mm, dengan 24/40 glass joint.
- *Flat-Bottom Boiling Flask*, 400 mL dengan 24/40 joint,
- *Erlenmeyer flask*.
- *Insulation Disk*.
- *Electromagnetic Stirrer*, dengan *temperature-controlled heating plate*, *thermostated oil bath*, atau *heater block* yang mampu menahan temperatur dari 145 hingga 150°C.
- *Stirring Bar* dan *Electromagnetic Stirrers*.
- Pipet, Class A, 200 mL dan 100 mL.
- *Glass-Stoppered Volumetric Flask*, 250 mL.
- *Thermostatically Controlled Water Bath*, at 25°C.
- *Filter Paper, fluted*, Whatman No. 4, No. 541,4 atau sebanding, 200 mm.
- *Funnel*, 60°, 200 mm.
- *Heated Vacuum Oven*.
- *Disposable Aluminum Pans*, 300-mL capacity, with smooth sides.
- *Temperature-Controlled Heating Plate*.
- *Analytical Balance*, dengan sensitifitas berat hingga 0.00001 gram.
- *Desiccator*, termasuk *desiccant* yang sesuai.
- *Stopwatch*.

Prosedur Uji:

1. Timbang sampel  $2 \pm 0.1$  gram, kemudian larutkan dalam 200ml orthoxylene yang sudah di standarisasi (red.  $XS_{blank}$ ).
2. Lakukan *reflux* selama 40 menit pada temperatur  $230^{\circ}C$ .
3. Setelah itu di amkan selama 15 menit di temperatur kamar.
4. Lalu masukan dalam *waterbath* selama 45 menit pada temperatur  $20^{\circ}C$ .
5. Setelah itu saring dan siapkan cawan alumunium kosong yang telah diketahui berat kosongnya.
6. Pipet filtrat sebanyak 100ml dan masukkan kedalam cawan.
7. Evaporasi dengan menggunakan atmosfer nitrogen pada temperatur  $200^{\circ}C$ , hingga kering.
8. Masukkan kedalam *vacuum oven* selama 45 menit, kemudian angkat dan masukkan dalam desikator selama 15 menit.
9. Timbang cawan tersebut, kurangi dengan berat cawan kosong.
10. Hitung %XS dengan rumus:

$$\%XS = \frac{((W_{akhir} - W_{awal}) \times 2) - XS_{blank}}{W_{sampel}} \times 100\% \quad (3.1)$$

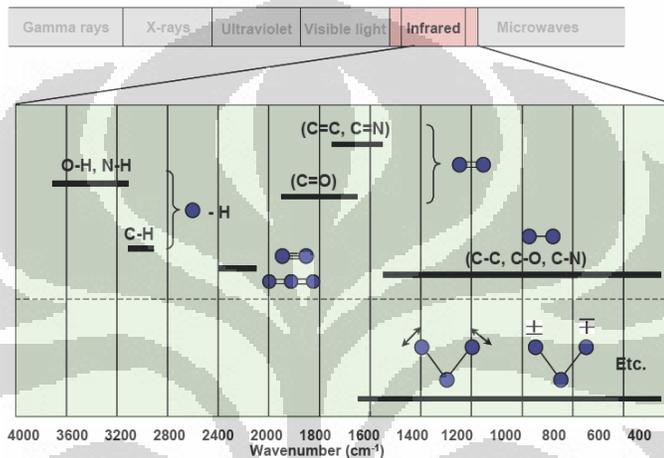
### 3.3.4 Pengujian Kandungan Etilena (*Fourier Transform Infrared*)

Pengukuran kandungan etilena kopolimer menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dengan prinsip spektroskopi atau menggunakan radiasi sinar dengan panjang gelombang tertentu untuk mengamati respon dari sampel<sup>[7,8]</sup>. Standar yang digunakan dalam pengukuran ini adalah ASTM D5576.

Panjang gelombang yang dipakai untuk pengukuran kandungan etilena kopolimer adalah panjang gelombang *infrared*. Ketika disinari dengan panjang gelombang tertentu, maka akan terjadi vibrasi atom yang menyebabkan berubahnya panjang ikatan, sudut ikatan, atau bahkan torsi ikatan antar atom<sup>[8]</sup>. Sebagai catatan, karena memanfaatkan vibrasi atom pada pengukurannya, metode ini dipakai untuk mengamati senyawa-senyawa (gugus) organik.

Saat terjadi vibrasi atom tersebut, maka akan terjadi penyerapan (absorpsi) sebagian dari energi *infrared* tersebut. Dengan mengetahui panjang gelombang

dan juga besar absorpsi energi tersebut dan membandingkannya dengan kurva kalibrasi standar, maka dapat dilakukan analisis kuantitatif terhadap gugus fungsi yang hendak diamati<sup>[8]</sup>. Pada Gambar 3.3, ditunjukkan pemetaan panjang gelombang *infrared* dengan gugus fungsi yang dapat diukur. Sebagai contoh, pada pengukuran kandungan etilena kopolimer, panjang gelombang *infrared* yang diamati adalah pada  $733\text{ cm}^{-1}$ .



Gambar 3.4 Skema Zona Pengukuran *Infrared Spectroscopy*<sup>[4]</sup>.

Pada penelitian ini digunakan sampel plaque kotak tipis hasil *hot-press* pellet T2 (6 variasi formulasi), M8, M9, dan P5. Sedangkan alat yang digunakan dalam pengujian ini adalah FTIR dari Biorad Excalibur Series, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.4.

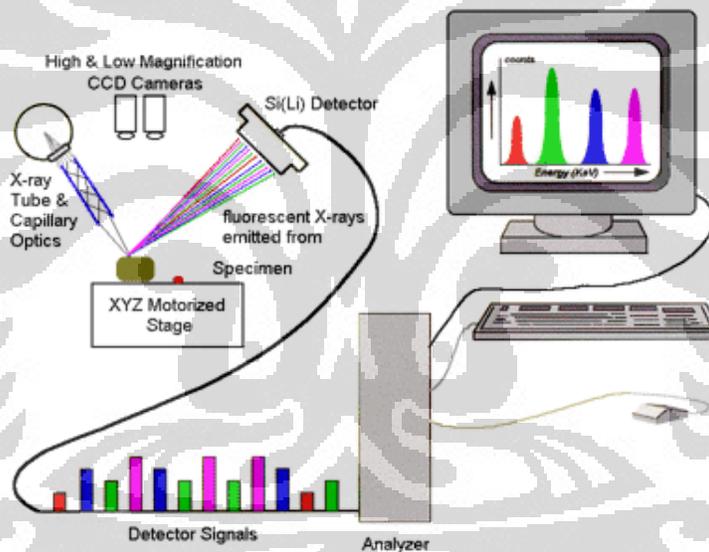


Gambar 3.5 *Fourier Transform Infrared*

### 3.3.5 Pengujian Kandungan Aditif (*X-Ray Fluorescence*)

Untuk mengetahui komposisi kuantitatif suatu zat (unsur) dalam material salah satu caranya adalah dengan mendeteksi sinar X (*X-Ray*) yang diemisikan oleh suatu atom jika mengalami eksitasi elektron<sup>[7]</sup>. Hal ini dapat dilakukan mengingat atom setiap unsur akan mengemisikan sinar X dengan harga yang spesifik. Karenanya tingkat akurasi metode ini cukup tinggi yaitu sekitar 1% untuk komposisi.

Secara umum, semua unsur dapat dideteksi dengan metode ini, kecuali unsur-unsur dengan nomor atom yang kecil, seperti H, He, dan Li<sup>[4]</sup>. Hal ini adalah karena jumlah elektron pada unsur-unsur ini terlalu sedikit untuk mengalami eksitasi sebelum unsur tersebut mengalami ionisasi.

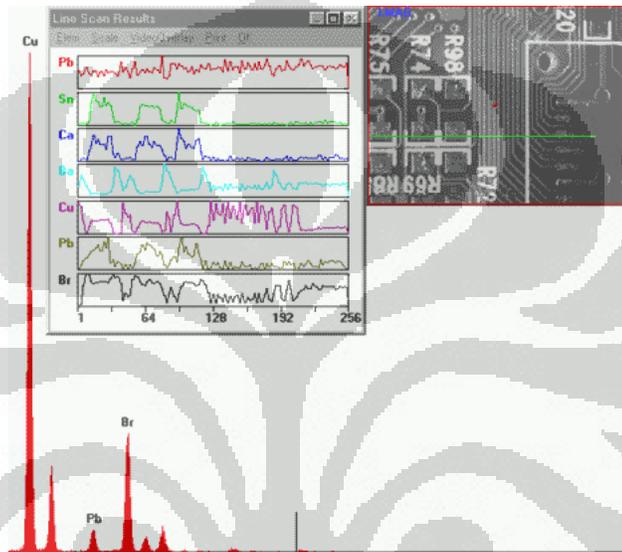


Gambar 3.6 Prinsip Pengukuran dengan *X-Ray Fluorescent*<sup>[4]</sup>

Dengan menggunakan alat *X-Ray Fluorescent Spectrometer* dengan standar ASTM D6247, seperti yang dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 3.5, proses pengukuran XRF (*X-Ray Fluorescent*) diawali dengan adanya penembakan sinar X oleh suatu *X-Ray Tube*. Kemudian dengan adanya interaksi antara sinar X tersebut dengan elektron pada suatu unsur dalam sampel, maka akan terjadi eksitasi elektron yang akan menghasilkan sinar X terpendar (*fluorescent*) yang dapat ditangkap oleh detektor<sup>[5]</sup>. Kemudian dengan analisis komputersasi, maka

hasil yang dapat diamati adalah kuantitas unsur-unsur dalam suatu sampel seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.6.

Pada industri plastik, biasanya alat ini digunakan untuk mengetahui zat-zat tambahan pada suatu material. Zat-zat yang dimaksud dapat berupa aditif atau bahkan pengotor yang ada pada material. Secara khusus, aditif pada polimer yang dapat diukur dengan alat ini adalah aditif-aditif dengan gugus non-organik.



Gambar 3.7 Ilustrasi Data yang diolah XRF

Pada penelitian ini digunakan sampel hasil proses *hot-press* pellet T2 (6 variasi formulasi), M8, M9, dan P5. Sedangkan alat yang digunakan dalam pengujian adalah XRF dari Philips tipe Lelyweg 1 dengan kondisi dan prosedur pengujian sebagai berikut:

Temperatur Pengujian = Temperatur kamar

Kelembaban =  $50 \pm 5\%$  *humidity*

Temperatur Sampel = Temperatur Kamar

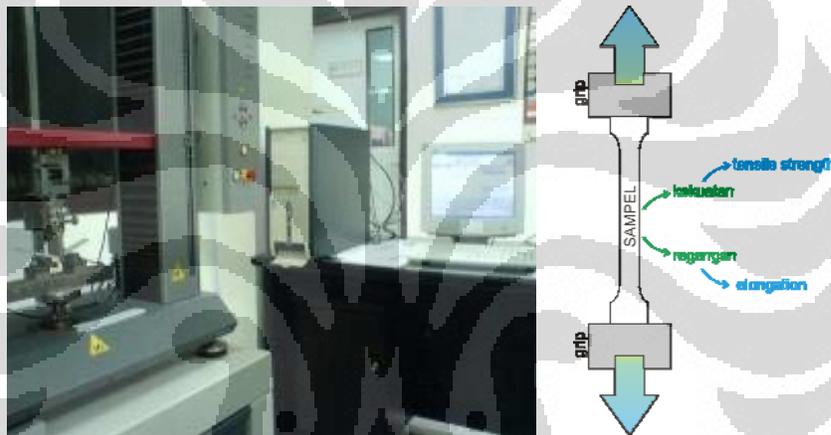
Prosedur Uji:

1. Siapkan sampel bulat (XRF) dan pasang pada tempat dudukan sampel uji XRF;
2. Masukkan mode pengukuran yang dimaksud (untuk penelitian ini, mode: TF), lalu aktifkan;

3. Tunggu dan catat hasil yang didapat, ulangi pengukuran hingga didapat 2 data tiap formula;
4. Ulangi pengujian untuk formula yang berbeda.

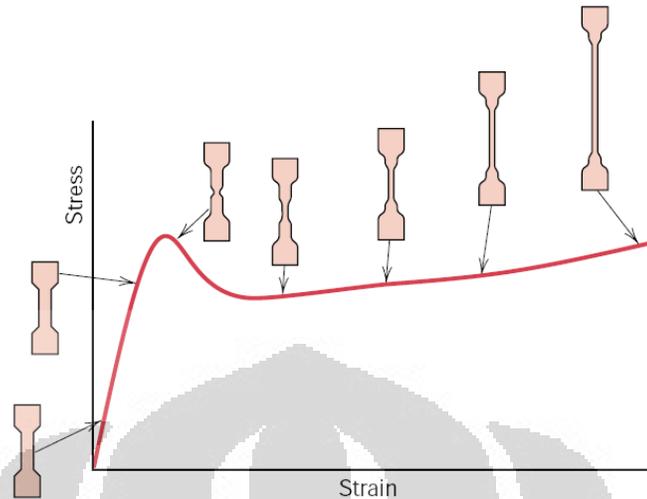
### 3.3.6 Pengujian Tarik

Sesuai ASTM D638, prinsip kerja pengujian tarik yaitu material polimer yang berbentuk *dog-bone* dengan ukuran yang sesuai standar diletakan pada dudukan sampel mesin uji tarik (*Multi Testing Machine* – Mode Tensile) dan pembebanan tarik bisa mulai diberikan. Foto multi testing machine dan juga prinsip pengujian tarik disajikan dalam Gambar 3.7.



Gambar 3.8 *Multi Testing Machine* (kiri) dan Prinsip Pengujian Tarik (kanan)<sup>[5]</sup>

Pembebanan ini dilakukan hingga sampel tersebut putus dan dari hasil komputerisasi, secara umum akan didapatkan 2 macam data yaitu besar kekuatan tarik dan regangan tarik<sup>[5]</sup>. Secara lebih khusus, masing-masing data tersebut akan dibagi lagi menjadi 2 posisi deformasi, yaitu saat luluh (*yield*) dan saat putus (*break*). Yang dimaksud dengan titik luluh adalah saat material mengalami deformasi plastik (tidak dapat balik), yang ditandai dengan fenomena *necking*<sup>[5,26]</sup>. Pada Gambar 3.8 diilustrasikan tahapan deformasi yang terjadi pada sampel uji tarik.



Gambar 3.9 Ilustrasi Grafik Pengujian Tarik<sup>[26]</sup>

Pada penelitian ini digunakan sampel *dog-bone* hasil preparasi *injection molding* seperti Gambar 3.9, terhadap variasi pellet PP T2 (6 variasi formulasi), M8, M9, dan P5. Terhadap sampel-sampel tersebut akan diukur parameter performa mekanis yaitu kekuatan tarik dan regangan tarik saat luluh. Sedangkan alat pengujian yang digunakan adalah *Multi Testing Machine*, merek Zwick/Roell Z005 dengan kondisi dan prosedur pengujian sebagai berikut:

Temperatur Pengujian = Temperatur kamar

Kelembaban =  $50 \pm 5\%$  *humidity*

Temperatur Sampel = Temperatur Kamar

Prosedur Uji:

1. Masuk kedalam program Tensile Test ASTM D638.
2. Ukur tebal dan lebar spesimen.
3. Pasangkan spesimen pada sampel holder.
4. Jalankan pengujian melalui program.
5. Ulangi pengujian sebanyak 5 sampel tiap variasi.
6. Simpan hasil pengujian.

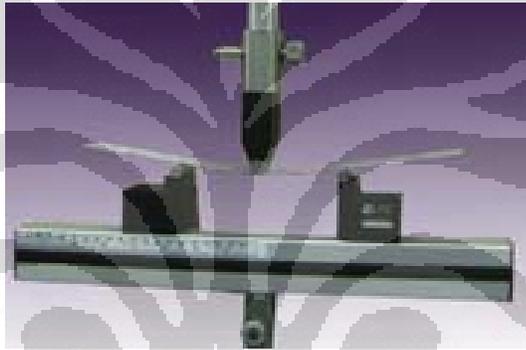


Gambar 3.10 Sampel *Dog-Bone* Hasil Proses *Injection Molding*

### 3.3.7 Pengujian Fleksural

Selanjutnya dalam ASTM D790A, *multi testing machine* juga dapat digunakan untuk mengukur kekakuan bahan melalui performa fleksural (tekuk 3 titik) dari material. Prinsipnya adalah dengan mengubah arah pembebanan *multi testing machine* untuk menekan sampel menggunakan *load cell* pada spesimen holder<sup>[5,7,8]</sup>. Foto kondisi pengujian fleksural ditunjukkan pada Gambar 3.10.

Kelebihan pengukuran fleksural dibanding pengujian mekanis lainnya adalah pengukuran ini hanya membutuhkan sampel dalam jumlah sedikit, karena variasi datanya relatif konstan. Data yang didapat dari pengujian ini adalah modulus kekakuan.



Gambar 3.11 *Multi Testing Machine* Mode Fleksural

Pada penelitian ini digunakan sampel hasil preparasi *injection molding* terhadap pellet PP T2 (6 variasi formulasi), M8, M9, dan P5. Sedangkan alat yang digunakan dalam pengujian fleksural ini sama seperti pada pengujian tarik pada subbab 3.3.6, yaitu *Multi Testing Machine*, merek Zwick/Roell Z005 namun perbedaannya adalah pada kondisi dan prosedur pengujian, sebagai berikut:

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| <i>Speed Flexural Modulus</i>   | : 1.3 mm/min |
| <i>Test Speed</i>               | : 1.3 mm/min |
| <i>Force Shutdown Threshold</i> | : 80% F max  |
| <i>Max. Deformation</i>         | : 12 mm      |

Prosedur Uji:

a. Persiapan alat :

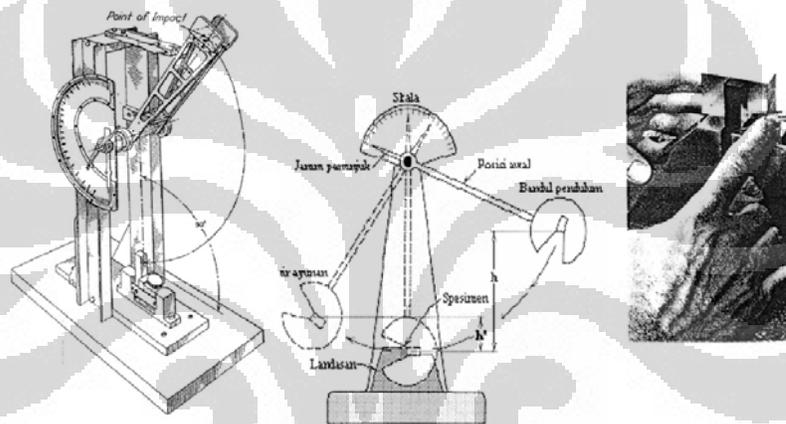
1. Pasang *Compression Load Cell* pada sisi bagian atas (*Movable Cross Head*)
2. Pasang *Support Span* pada sisi bagian bawah dan atur jaraknya 60 mm.  
*Catatan : lebar support span dipertahankan untuk setiap variabel data, kecuali untuk variabel lebar support spa, yaitu dengan lebar 16,1 X tebal spesimen rata-rata. Dimana dalam pengujian ini, lebar support span untuk variabel support span, yaitu sebesar 54,82.*
3. Hidupkan *Zwick/Roell Z005*.
4. Hidupkan PC pilih *file test Xpert II* kemudian masukkan *password*.
5. Buka *file open* program *flexure test II ASTM D790.Zp2*.
6. Pilih icon *Startpos* untuk menurunkan *Movable Cross Head* sehingga *Load Cell Hamper* mendekati *Support Span* pada jarak *tool separation* 4mm.
7. Pastikan posisi *Absolute Cross Head Travel* pada alat *Zwick/Roell* dan pada monitor di PC sama yaitu 298.000mm.

b. Pengukuran Sampel:

1. Ukur tebal dan lebar dari 5 spesimen pada 3 titik yang berbeda. Input tebal dan lebar yang minimum pada komputer dengan ketelitian 0.01 mm.
2. Tempatkan spesimen pada *support span* sedemikian rupa sehingga penekanan *Load Cell* tepat di tengah specimen.  
*Catatan: posisi spesimen untuk variabel bentuk spesimen dan variabel lebar support span dikondisikan sama, yaitu pijakan ejector pin menghadap ke atas dengan posisi gate disebelah kiri.*
3. Klik *Force 0* dan *Start* pada monitor komputer.
4. Tunggu beberapa menit sampai terbaca *Secant Modulus* dan *Flexure Modulus*.
5. Catat pembacaan *Flexural Modulus* kemudian *save* sesuai *folder* dan nama sampel.

### 3.3.8 Pengujian Impak

Pengujian impak merupakan suatu pengujian yang mengukur ketahanan material terhadap beban kejut (beban dengan kecepatan pembebanan yang tinggi)<sup>[5]</sup>. Hal inilah yang membedakan uji impak dengan pengujian tarik atau kekerasan yang dilakukan perlahan-lahan. Dasar dari pengujian impak ini adalah penyerapan energi potensial dari beban yang bergerak dari suatu ketinggian tertentu dan menumbuk benda uji sehingga terdeformasi. Sebagai contoh, seperti Gambar 3.11, pada pengujian impak metode Izod, beban pendulum akan diayunkan dari ketinggian tertentu hingga menumbuk sampel.



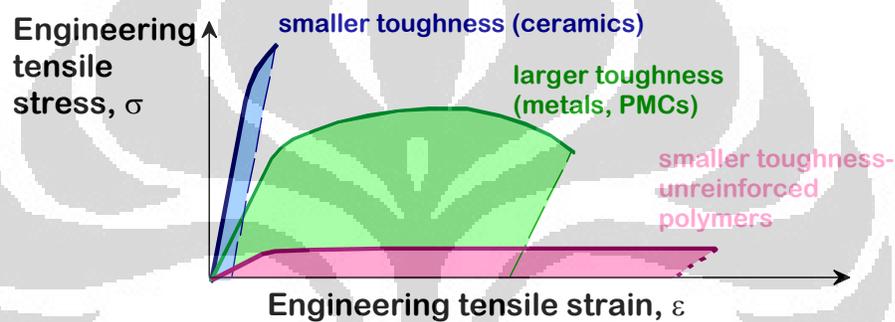
Gambar 3.12 Ilustrasi Impak Izod dan Cara Memasang Sampel Uji Sesuai ASTM D256 (dari kiri ke kanan)

Pada pengujian impak, banyaknya energi yang diserap oleh polimer untuk terjadinya perpatahan merupakan ukuran ketahanan impak atau ketangguhan bahan tersebut<sup>[7,8]</sup>. Semakin tangguh suatu material maka material tersebut memiliki kemampuan untuk menyerap beban kejut yang besar tanpa terjadinya retak atau terdeformasi dengan mudah. Pembebanan ini dilakukan hingga jumlah tertentu yang disesuaikan standar.

Pada Gambar 3.12, merupakan ilustrasi energi impak pada kurva tegangan rengangan uji tarik. Pada prinsipnya energi impak merupakan luas area dibawah kurva tegangan-regangan tarik, sehingga secara umum dapat dinyatakan semakin besar luas area dibawah kurva tersebut, maka energi impak yang dapat diserap material semakin tinggi atau dengan kata lain material tersebut semakin tangguh<sup>[5]</sup>

<sup>81</sup>. Terminologi tangguh disini berarti kombinasi antara kekakuan dan keuletan yang tinggi.

Seperti yang sudah dijelaskan diatas, maka pada pengukuran impact, data yang didapat adalah energi per satuan luas bidang serapan energi ( $J/m^2$ ) contohnya adalah pada metode Izod merupakan luas dibawah takikan. Tetapi hal ini disesuaikan juga dengan standar yang digunakan, contohnya pada metode Gardner, pengukuran Energi Impact satuan yang didapat adalah kg-cm dan pada metode Impact Film, pengukuran Energi Impact satuannya adalah kgf-cm<sup>[7,8]</sup>.



Gambar 3.13 Ilustrasi Energi Impact pada Kurva Tegangan-Regangan<sup>[5-8]</sup>

Ada beberapa macam metode pengujian Impact, antara lain Charpy, Izod, Gardner, Impact Film, dan Falling Dart. Secara umum, yang membedakan semua metode tersebut adalah bentuk sampel, cara penumbukan pendulum, dan maksud pengukurannya<sup>[5,7]</sup>.

Pada metode Izod, sampel batang bertakik ditumbuk oleh pendulum yang berayun dari ketinggian tertentu<sup>[5]</sup>. Hal ini pada dasarnya ingin mensimulasikan kondisi sampel yang memiliki *initial crack* bila mengalami pembebanan impact. Atau dengan kata lain, ingin mengetahui jumlah energi maksimum yang dapat diserap oleh sampel pada kondisi kritisnya<sup>[5,7]</sup>.

Sedangkan, pada metode Gardner, pendulum akan menumbuk secara vertikal, sampel berbentuk plaque bulat yang telah didinginkan pada temperatur transisi glass. Metode ini didasarkan pada tinjauan sifat viscoelastik dari polimer. Mengingat karena sifat viscoelastik ini, maka kecepatan pembebanan sangat

berpengaruh terhadap perilaku polimer ketika menerima pembebanan, yang dalam hal ini berupa pembebanan impact.

Pengaruh kecepatan pembebanan itu disimulasikan dalam perbedaan ketinggian awal pendulum. Karena pada pengujian Gardner, beban dijatuhkan dari ketinggian tertentu, atau dalam hal ini berarti perubahan energi potensial menjadi energi kinetik. Sehingga, kecepatan tumbukan merupakan fungsi dari ketinggian beban. Akibatnya dengan menjatuhkan beban dari ketinggian yang berbeda, maka perilaku polimer ketika menerima pembebanan impact (dengan kecepatan berbeda) dapat diamati.

Pengujian impact ini juga termasuk pengujian dengan simpangan yang besar. Karenanya penggunaan beberapa metode selain dapat sebagai bahan pembanding (mengurangi kemungkinan kesalahan Analisis akibat kesalahan data uji), juga dapat memperlengkap sudut pandang dalam menyikapi permasalahan yang ada.

### 3.3.8.1 Pengujian Impact Izod

Standar pengujian impact Izod adalah ASTM D256. Pada penelitian ini, sampel pellet PP T2 (6 variasi formulasi), M8, M9, dan P5 yang sebelumnya telah dibuat menjadi sampel *dog-bone* dengan proses *injection molding* kemudian dipreparasi sesuai bentuk dan ukuran sampel standar, seperti pada Gambar 3.13 dan Gambar 3.14. Alat yang digunakan dalam pengujian adalah *Izod Impact Tester*, merek Resil 5.5 dengan kondisi dan prosedur pengujian sebagai berikut:

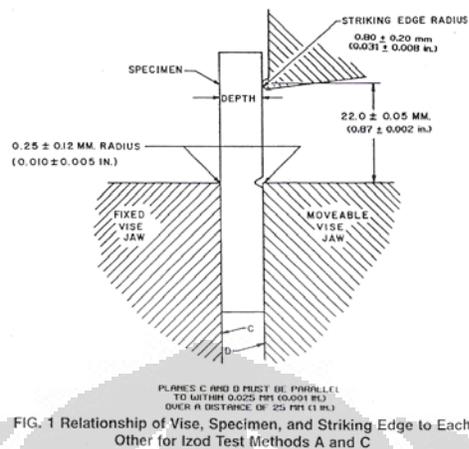
Temperatur Pengujian = Temperatur kamar

Kelembaban =  $50 \pm 5\%$  *humidity*

Temperatur Sampel = Temperatur Kamar

Prosedur Uji:

- a. Preparasi Sample:
  1. Potong sampel *dog-bone* hasil preparasi *injection molding* sehingga mendapatkan sampel dengan panjang standar.
  2. Kemudian membuat notch pada sampel tersebut dengan mesin notch Ceast sesuai dengan standar.



Gambar 3.14 Dimensi Sampel Pengujian Izod Sesuai ASTM D256

b. Pengukuran sampel:

1. Pasang sampel Izod yang telah di-*shaping* ke tempat dudukannya;
2. Aktifkan alat uji Izod dan printer untuk memplot hasil yang didapat;
3. Mulai meng-impak dan mengimput data;
4. Ulangi hingga didapatkan 6 data uji untuk tiap formula;
5. Cetak hasil uji yang didapat;
6. Ulangi pengujian untuk formula yang berbeda.



Gambar 3.15 Sampel *Dog-Bone* yang sudah di-preparasi untuk Impak Izod

### 3.3.8.2 Pengujian Impak Gardner

Sedangkan pada pengujian impak Gardner, standar yang digunakan adalah ASTM D5420. Pada penelitian ini digunakan sampel *plague* bulat hasil preparasi *injection molding* pellet PP T2 (6 variasi formulasi), M8, M9, dan P5 seperti pada Gambar 3.15. Sedangkan alat yang digunakan dalam pengujian adalah *Gardner Impact Tester*, merek BYK-Gardner dengan kondisi dan prosedur pengujian sebagai berikut:

Temperatur Pengujian = Temperatur kamar

Kelembaban =  $50 \pm 5\%$  *humidity*

Temperatur Sampel =  $-10 \pm 1^{\circ}\text{C}$  (standar untuk homopolimer PP)

Prosedur Uji:

1. Dinginkan sampel pada *Cold Box* hingga temperatur sampel sesuai standar selama 2 jam;
2. Siapkan beban dan alat uji impact Gardner;
3. Mulai meng-impak 5 sampel awal untuk mencari setting ketinggian awal pengujian Gardner;
4. Mulai meng-impak untuk mengambil data dengan cepat agar temperatur sampel tidak terlalu berubah drastis sambil terus mencatat hasilnya;
5. Ulangi proses impact hingga didapatkan 20 data uji untuk tiap variasi formula;
6. Ulangi pengujian untuk formula yang berbeda;
7. Hitung energi impact Gardner untuk masing-masing formula dengan menggunakan rumus yang tersedia.

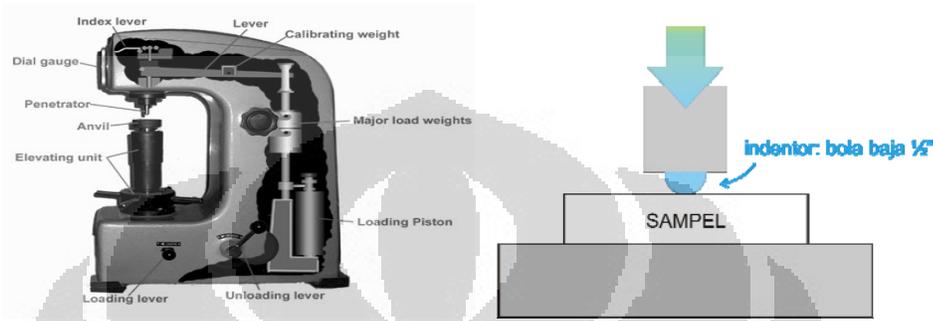


Gambar 3.16 Sampel *Plague Bulat* untuk Pengujian Impact Gardner dan Kekerasan

### 3.3.9 Pengujian Kekerasan

Prinsip pengujian kekerasan adalah mengukur ketahanan suatu material terhadap deformasi berupa indentasi permanen. Pada material polimer, pengujian ini diatur oleh standar ASTM D785. Pengujian kekerasan ini dilakukan dengan memberikan penekanan pada permukaan material dengan material lain yang lebih

keras yang dikonsentrasikan pada suatu daerah tertentu pada sampel, seperti pada Gambar 3.16<sup>[5]</sup>. Mekanisme penekanan tersebut dapat berupa mekanisme penggosokan (*scratching*), pantulan (*re-bouncing*), ataupun indentasi dengan indenter yang sesuai dengan parameter (diameter, beban dan waktu)<sup>[7,8]</sup>.



Gambar 3.17 *Hardness Rockwell Tester* (kiri) dan *Indenter Rockwell* (kanan)<sup>[5,7]</sup>

Pada sampel plastik, umumnya digunakan metode indentasi Rockwell ataupun dengan Durometer. Skala Rockwell didapat dari kombinasi beberapa jenis indenter dan beban tergantung material yang ingin diuji. Pada sampel plastik, skala yang digunakan adalah skala R (indenter: bola baja diameter 1/2" dengan beban mayor 60 kgf)<sup>[5,7]</sup>.

Pembebanan pada metode indentasi Rockwell dilakukan dengan dua tahap; tahap pertama adalah pembebanan minor (beban 10 kg) untuk memposisikan indenter, kemudian dilanjutkan dengan pembebanan mayor (60 – 150 kg) dengan besar beban yang tergantung jenis Rockwell yang digunakan<sup>[5,7]</sup>. Kemudian nilai kekerasan ditentukan dengan perbandingan kedalaman kedua tahap pembebanan.

Pengukuran kekerasan dengan metode ini sangat praktis, sehingga mudah diaplikasikan. Sebab pembebanan dan pembacaan nilai kekerasan dilakukan dengan *direct reading* (otomatis) sehingga penguji tinggal mencatat nilai yang tertera pada alat ukur.

Kekerasan juga secara tidak langsung juga dapat dikaitkan dengan kekakuan. Semakin keras suatu material, maka kekakuan material juga meningkat<sup>[7,8]</sup>. Pada aplikasinya, kekerasan berkaitan dengan ketahanan gores dan

kemampuan potong dari material. Semakin keras suatu material, maka akan semakin tahan gores dan semakin mudah dipotong pada proses fabrikasi<sup>[7,8]</sup>.

Pada penelitian ini digunakan sampel *plaque* bulat hasil preparasi *injection molding* terhadap pellet PP T2 (6 variasi formulasi), M8, M9, dan P5 sama seperti pada pengujian Gardner pada Gambar 3.15. Sedangkan alat yang digunakan dalam pengujian adalah *Hardness Rockwell Tester (R scale)*, merek Matsuzawa DXT-1 dengan prosedur pengujian sebagai berikut:

1. Aktifkan alat uji kekerasan Rockwell tipe R;
2. Pasang sampel *plaque* bulat (tebal 3.5 mm) pada tempat dudukan sampel;
3. Putar dan turunkan indenter hingga lampu indikasi *READY* menyala;
4. Tunggu hasil pengukuran, catat hasilnya, lalu ulangi untuk mendapatkan 5 data untuk setiap formula;
5. Ulangi pengujian untuk formula yang berbeda.

### 3.3.10 Trial Aplikasi *Thermoforming*

#### 3.3.10.1 Produksi Cup *Thermoforming*

Pada pengujian aplikasi, sebagai tahap pengujian hasil formulasi yang telah dilakukan, menggunakan sampel:

- Pellet PP T2 kode variasi 5B3V (sebagai formula dasar) sebanyak 200kg (d disesuaikan dengan kapasitas output mesin Gabler M98 dalam waktu 1 jam),
- Pellet PP T2 hasil formulasi dengan kode 5A2V juga sebanyak 200kg.

Seperti yang sudah dijelaskan pada subbab 2.2 sebelumnya, produksi gelas *thermoforming* secara umum dilakukan melalui 2 tahap yaitu proses ekstrusi sheet (dengan ketebalan  $\sim 1$  mm) yang kemudian dilanjutkan dengan proses *thermoforming*. Secara lebih detail, berikut adalah prosedur pembuatan gelas *thermoforming* dengan menggunakan kondisi setting mesin seperti yang dicantumkan pada Tabel 3.9:

1. Masukkan sampel pada *secondary silo*.
2. Aktifkan *dosing hopper* untuk memindahkan material masuk ke hopper sesuai dengan formulasi campuran yang digunakan (pada trial ini digunakan 50% virgin + 50% recycle).

3. Lanjutkan proses ekstrusi dengan tidak merubah parameter setting, yaitu seperti yang tercantum pada tabel 3.9
4. Kemudian jalankan proses hingga kurang lebih 45menit, agar recycle yang digunakan benar-benar sudah merupakan recycle material yang diuji.
5. Atur ketebalan sheet hingga mendapatkan berat produk yang diinginkan ( $3.25 \pm 0.02$  gram).
6. Amati proses yang berjalan, sambil mengambil sampel (sebanyak 5 unit untuk tiap 32cavity) untuk dilakukan pengujian selanjutnya.

Dari aspek produksi, performa kemampuan proses (*process ability*) suatu material *thermoforming*, terlihat pada tahap *stacking* gelas sesudah keluar dari cetakan. Material yang cocok untuk proses *thermoforming* kecepatan tinggi adalah material yang mudah terpotong pada sesudah proses *forming* dan selanjutnya tidak rusak saat disusun (*stacking*) pada *product holder*.

### 3.3.10.2 Pengujian *Drop-Test* Gelas

Pada pengujian *drop test* aplikasi, gelas hasil produksi pada subbab 3.3.10.1, seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.17 yaitu:

- Gelas sampel variasi 5B3V (formula dasar) yang telah diisi air, sebanyak 5 unit untuk tiap cavity (32 cavity).
- Gelas sampel formulasi kode 5A2V yang telah diisi air, sebanyak 5 unit untuk tiap cavity (32 cavity).

Kemudian langsung diisi dengan air pada *filling unit*, ditutup dengan sealing film seperti biasa, lalu dilakukan pengujian *drop test*, dengan tahapan:

1. Jatuhkan gelas satu persatu dari ketinggian 1.5 meter dengan posisi *bottom* gelas berada dibawah.
2. Catat nomor cavity yang pecah.
3. Kumpulkan sampel yang pecah untuk investigasi lebih lanjut.

Tabel 3.9 Parameter Setting yang digunakan saat memproses Sampel

| Extruder                                       |       | Thermoforming           |              |
|--|-------|-------------------------|--------------|
| <b>Temperatur (° C)</b>                        |       | Cycle                   | 31.8 cyc/min |
| <b>Extruder Zone:</b>                          |       | <b>Temperatur (° C)</b> |              |
| 1  | 195   | <b>Top Heater:</b>      |              |
| 2  | 195   | 1                       | 512          |
| 3  | 205   | 2                       | 510          |
| 4  | 205   | 3                       | 502          |
| 5  | 210   | 4                       | 497          |
| 6  | 210   | 5                       | 492          |
| <b>Clamp, Static Mixer, Gear pump, Screen:</b> |       | 6                       | 482          |
| 9  | 220   | 7                       | 482          |
| 10   | 220   | 8                       | 482          |
| 11   | 220   | 9                       | 492          |
| 12   | 220   | 10                      | 497          |
| 13   | 215   | 11                      | 502          |
| 14   | 215   | 12                      | 507          |
| 15   | 215   | 13                      | 520          |
| 16   | 215   | <b>Bottom Heater:</b>   |              |
| <b>Head/Die:</b>                               |       | 1                       | 250          |
| 18   | 220   | 2                       | 250          |
| 19   | 220   | 3                       | 250          |
| 20   | 220   | 4                       | 250          |
| 21   | 220   | 5                       | 250          |
| 22   | 220   | <b>Calender Roll:</b>   |              |
| Upper / Roll 3                                 | 25    |                         |              |
| Roll 3 – 2 Gap                                 | 885mm |                         |              |
| Middle / Roll 2                                | 25    |                         |              |
| Roll 2 – 1 Gap                                 | 900mm |                         |              |
| Pre Heater / Roll 1                            | 55    |                         |              |

Gambar 3.18 Gelas *Thermoforming* 240ml, berat 3.25gram

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 PENGUJIAN TARIK

#### 4.1.1 Pengamatan Kekuatan Tarik Luluh (*Tensile Strength at Yield*)

##### 4.1.1.a Pengaruh MFR terhadap Kekuatan Tarik

Dari hasil pengujian tarik yang dilakukan terhadap sampel dengan variasi MFR, didapatkan data seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Pengaruh MFR terhadap Kekuatan Tarik

| Parameter                 | Unit     | Sampel |      |      |      |      |      |
|---------------------------|----------|--------|------|------|------|------|------|
|                           |          | 3B1S   | 5B3V | 7B1A | M8   | M9   | P5   |
| MFR                       | Gr/10min | 2.52   | 2.93 | 3.4  | 1.82 | 2.3  | 1.7  |
| Tensile Strength at Yield | MPa      | 28.8   | 28.2 | 27.4 | 28.3 | 27.8 | 29   |
| Standar Deviasi           |          | 0.32   | 0.07 | 0.07 | 0.25 | 0.27 | 0.07 |

Dari hasil perhitungan koefisien korelasi menggunakan persamaan 2.1 didapatkan koefisien korelasi antara variabel MFR dengan kekuatan tarik yaitu -1. yang berarti jika digunakan dalam persamaan 2.4 didapatkan koefisien determinasi ( $r^2$ ) adalah 100%.

Nilai tersebut menunjukkan bahwa variabel MFR sangat berpengaruh terhadap nilai kekuatan tarik material. Untuk melihat pengaruh tersebut maka data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh MFR terhadap kekuatan tarik pada Gambar 4.1. Sehingga dengan pendekatan statistik *Least Square*, sehingga didapat persamaan garis *trendline* linier:

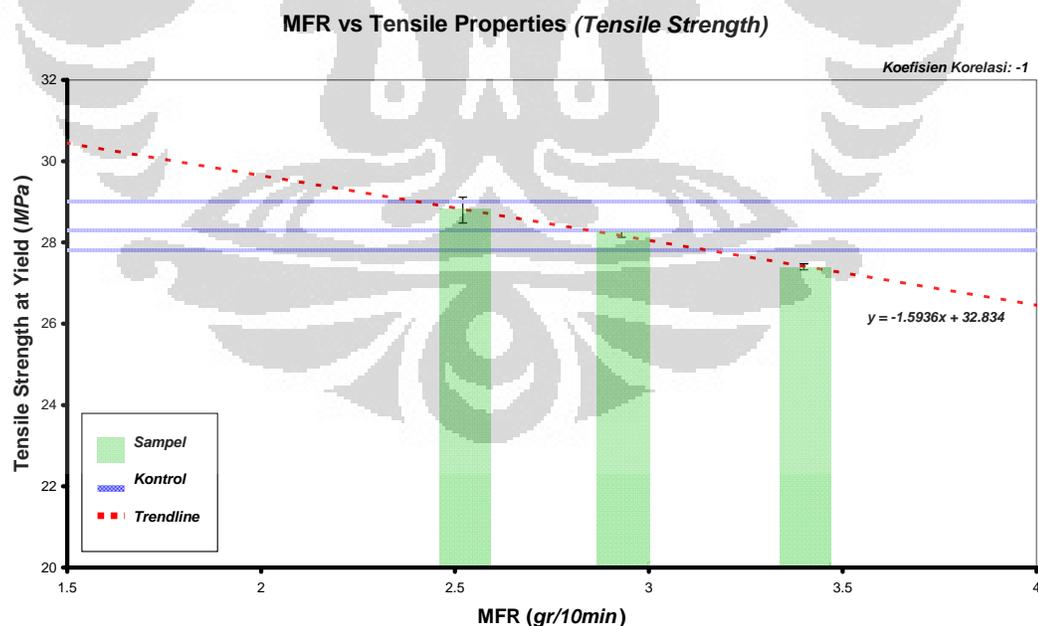
$$y = -1.5936x + 32.834 \quad (4.1)$$

Persamaan 4.1 diatas, menunjukkan bahwa MFR berbanding terbalik dengan kekuatan tarik material. Atau dengan kata lain, semakin tinggi MFR maka kekuatan tarik material akan semakin rendah. Seperti yang sudah dijelaskan pada subbab 2.1.4.1, secara molekuler, fenomena deformasi elastis terkait struktur kristal dan *chain entanglement* dari rantai molekul PP<sup>[26,29]</sup>.

Semakin tinggi panjang rantai PP, maka *chain entanglement* yang terjadi antar rantai molekul tersebut juga akan semakin banyak terjadi<sup>[38,39]</sup>. Akibatnya, *chain entanglement* tersebut akan mempertahankan struktur ini untuk mengalami deformasi lebih lanjut.

Dalam tinjauan struktur kristal, semakin panjang rantai molekul, seiring dengan banyaknya *chain entanglement* yang terjadi, derajat kristalinitas dari PP juga menurun. Hal ini akan terlihat dari struktur sperulit yang lebih besar<sup>[30,34,38]</sup>. Ukuran sperulit yang besar ini akan bertindak seperti pasak yang juga akan menahan rantai molekul PP untuk bergerak dalam deformasi lebih lanjut. Disinilah fungsi *tie chain* sangat berperan, sebab seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *tie chain* adalah rantai penghubung antara struktur kristalin dan amorf. Sehingga agar struktur tersebut bisa tetap bertahan maka *tie chain* berfungsi sebagai media transfer beban dari struktur amorf ke struktur kristalin<sup>[35,36]</sup>.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa kombinasi meningkatnya *chain entanglement* dan juga struktur sperulit yang membesar seiring turunnya MFR inilah yang menyebabkan meningkatnya kekuatan tarik.



Gambar 4.1 Pengaruh MFR terhadap Kekuatan Tarik

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan 4.1,

$$y > -1.5936x + 32.834$$

dengan, menggunakan nilai maksimal kekuatan tarik diantara sampel M8, M9, dan P5 sebagai kontrol superior atau dengan kata lain, menggunakan nilai

$$y = \text{tensile strength P5} = 29 \text{ Mpa (kontrol)}$$

maka dapat diformulasikan secara empiris, nilai MFR untuk menghasilkan performa produk yang superior yaitu

$$x = \text{MFR (desain)} < 2.4 \text{ gr/10min}$$

dengan presentase korelasi 100%.

#### 4.1.1.b Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Kekuatan Tarik

Kemudian, pada Tabel 4.2 merupakan hasil pengujian terhadap variasi fraksi ataktik dalam rantai PP.

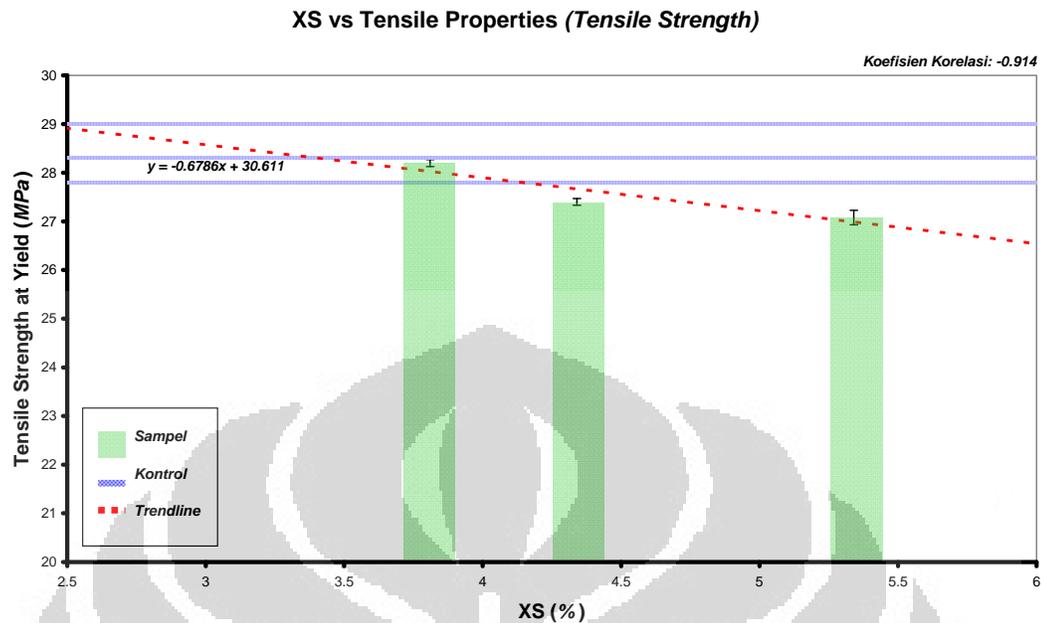
Tabel 4.2 Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Kekuatan Tarik

| Parameter                 | Unit | Sampel |      |       |      |      |      |
|---------------------------|------|--------|------|-------|------|------|------|
|                           |      | 5B3V   | 7B1A | 0B2V  | M8   | M9   | P5   |
| Fraksi Ataktik            | wt%  | 3.81   | 4.34 | 5.34  | 3.81 | 4.33 | 4.6  |
| Tensile Strength at Yield | MPa  | 28.2   | 27.4 | 27.08 | 28.3 | 27.8 | 29   |
| Standar Deviasi           |      | 0.07   | 0.07 | 0.15  | 0.25 | 0.27 | 0.07 |

Terhadap data diatas, melalui persamaan 2.1 dapat diketahui koefisien korelasi antara variabel fraksi ataktik dengan kekuatan tarik yaitu -0.914. yang berarti jika digunakan dalam persamaan 2.4 didapatkan koefisien determinasi ( $r^2$ ) 84%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel fraksi ataktik berpengaruh kuat terhadap nilai kekuatan tarik material.

Untuk melihat pengaruh tersebut maka data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh fraksi ataktik terhadap kekuatan tarik pada Gambar 4.2. Sehingga dengan pendekatan statistik *Least Square*, sehingga didapat persamaan garis *trendline* linier:

$$y = -0.6786x + 30.611 \quad (4.2)$$



Gambar 4.2 Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Kekuatan Tarik

Menurut J. J. Jaminak dan G. C. Steven, struktur kristalin terutama berpengaruh terhadap pembebanan yang bersifat *low strain rate deformation*, seperti modulus, kekuatan tarik, dan *environmental stress cracking*<sup>[35]</sup>. Pada PP, struktur kristalin ini terutama dipengaruhi oleh taktisitas<sup>[7,8]</sup>. Semakin tinggi fraksi isotaktik rantai PP, maka kekuatan material akan meningkat<sup>[8,40]</sup>. Gambar 4.2 diatas juga menunjukkan kecenderungan itu. Walaupun pada presentase 4.34wt% terdapat sedikit penyimpangan, tetapi mengingat perubahan-nya kurang dari 10%, maka penyimpangan ini dianggap error yang wajar.

Secara molekuler, menurunnya kekuatan tarik akibat peningkatan fraksi ataktik disebabkan karena seiring peningkatan fraksi ataktik pada rantai PP, maka stereodefekt atau ketidak-homogenan rantai molekul PP akan meningkat<sup>[28,29]</sup>. Hal ini menyebabkan interaksi antar rantai molekul yang berdekatan menjadi tidak teratur atau amorf.

Pada PP yang bersifat non-polar, interaksi acak yang terjadi hanya berdasarkan *secondary bonding* saja (interaksi Van der Waals), sehingga kekuatan interaksi ini sangat lemah<sup>[5]</sup>. Disisi lain, elektron-elektron bebas pada rantai PP cenderung tolak menolak dengan yang lain<sup>[31,44]</sup>, akibatnya struktur amorf ini

berlaku seperti pegas yang ulet. Karena sifat inilah, maka semakin tinggi fraksi ataktik dalam molekul PP, maka kekakuan atau dalam hal ini berupa kekuatan tariknya akan semakin rendah.

Sama seperti sebelumnya, dengan menggunakan nilai maksimal kekuatan tarik diantara sampel M8, M9, dan P5 sebagai kontrol, yaitu dengan nilai

$$y = \textit{tensile strength P5} = 29 \text{ Mpa (kontrol superior)}$$

dan menggunakan persamaan 4.2,

$$y > -0.6786x + 30.611$$

maka formula empiris, mengenai desain nilai fraksi ataktik yang dapat menjawab tujuan adalah

$$x = \textit{fraksi ataktik (desain)} < 2.37 \text{ wt\%}$$

Sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk menghasilkan performa produk yang baik, desain fraksi ataktik yang optimal yaitu kurang dari 2.37 wt% dengan presentase korelasi 84%.

#### 4.1.1.c Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Kekuatan Tarik

Hasil pengujian terhadap variasi Kandungan Etilena Kopolimer sesuai dengan prosedur pada subbab 3.3.4 terhadap kekuatan tarik disajikan dalam Tabel 4.3. Data lengkap mengenai hasil pengujian kandungan etilena kopolimer disajikan pada Lampiran 1.

Tabel 4.3 Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Kekuatan Tarik

| Parameter                 | Unit | Sampel |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|------|--------|------|------|------|------|------|------|
|                           |      | 3B1S   | 5B3V | 7B2V | 4B2V | M8   | M9   | P5   |
| Kandungan Etilena         | wt%  | 0.44   | 0.59 | 0.87 | 0.99 | 0    | 0    | 0    |
| Tensile Strength at Yield | MPa  | 28.3   | 28.3 | 27.1 | 27.5 | 28.3 | 27.8 | 29   |
| Standar Deviasi           |      | 0.32   | 0.07 | 0.73 | 0.16 | 0.25 | 0.27 | 0.07 |

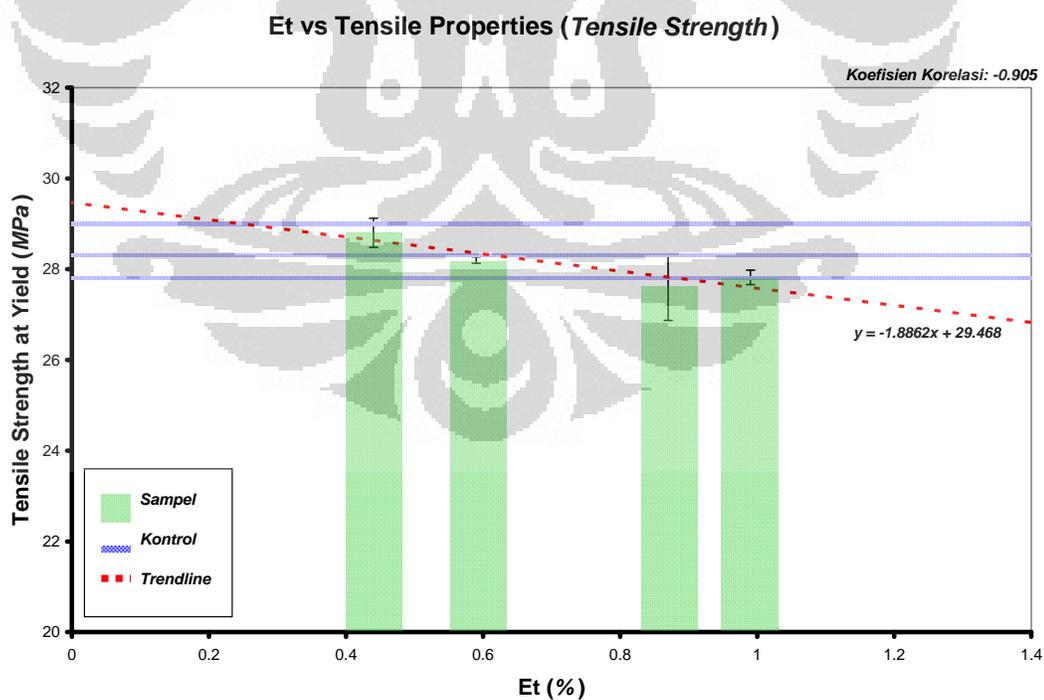
Dengan memetakan variable kandungan etilena dan kekuatan tarik, maka dengan persamaan 2.1 dapat dihitung koefisien korelasi yaitu -0.905. yang berarti jika digunakan dalam persamaan 2.4 didapatkan koefisien determinasi ( $r^2$ ) 82%.

Hal ini berarti bahwa variabel kandungan etilena kopolimer berpengaruh kuat terhadap nilai kekuatan tarik material.

Untuk melihat pengaruh tersebut maka data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh kandungan etilena kopolimer terhadap kekuatan tarik pada Gambar 4.3. Sehingga dengan pendekatan statistik *Least Square*, sehingga didapat persamaan garis *trendline* linier:

$$y = -1.8862x + 29.468 \quad (4.3)$$

Persamaan 4.3 diatas, menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan Etilena Kopolimer maka kekuatan tarik material tersebut akan semakin rendah. Mirip seperti peningkatan fraksi ataktik pada rantai PP, penambahan komonomer etilena pada rantai PP juga meningkatkan cacat (irregularitas) rantai molekul yang dikenal dengan nama *constitutional defect*<sup>[28]</sup>. Modifikasi rantai molekul ini akan berakibat berubahnya interaksi rantai molekul PP menjadi struktur amorf yang ulet. Hal ini terjadi karena dengan penambahan komonomer etilena, maka celah-celah tertier metil pada *backbone* PP yang seharusnya bisa menjadi pembentuk struktur kristalin yang rapat, berkurang dengan penambahan gugus etilena<sup>[46]</sup>.



Gambar 4.3 Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Kekuatan Tarik

Secara morfologi molekul, dengan berkurangnya struktur kristalin pada material, tanpa diimbangi dengan bertambahnya *chain entanglement* (mengingat panjang rantai molekul tidak berubah), maka ketika menerima pembebanan maka struktur kristalin yang semula juga menahan deformasi menjadi berkurang. Inilah yang menyebabkan berkurangnya kekakuan material akibat penambahan etilena.

Kemudian untuk memformulasikan nilai kandungan etilena kopolimer yang dapat menghasilkan sifat bahan yang superior, maka digunakan nilai maksimal kekuatan tarik diantara sampel M8, M9, dan P5 sebagai kontrol. Dan dengan menggunakan persamaan 4.3, dapat diketahui:

$$y > -1.8862x + 29.468$$

dimana,  $y = \textit{tensile strength P5} = 29 \text{ Mpa}$  (kontrol superior), sehingga didapatkan desain kandungan etilena kopolimer,  $x < 0.25 \text{ wt\%}$  dengan nilai korelasi 82%.

#### 4.1.2 Pengamatan Regangan Tarik Luluh (*Tensile Elongation at Yield*)

##### 4.1.2.a Pengaruh MFR terhadap Regangan Tarik

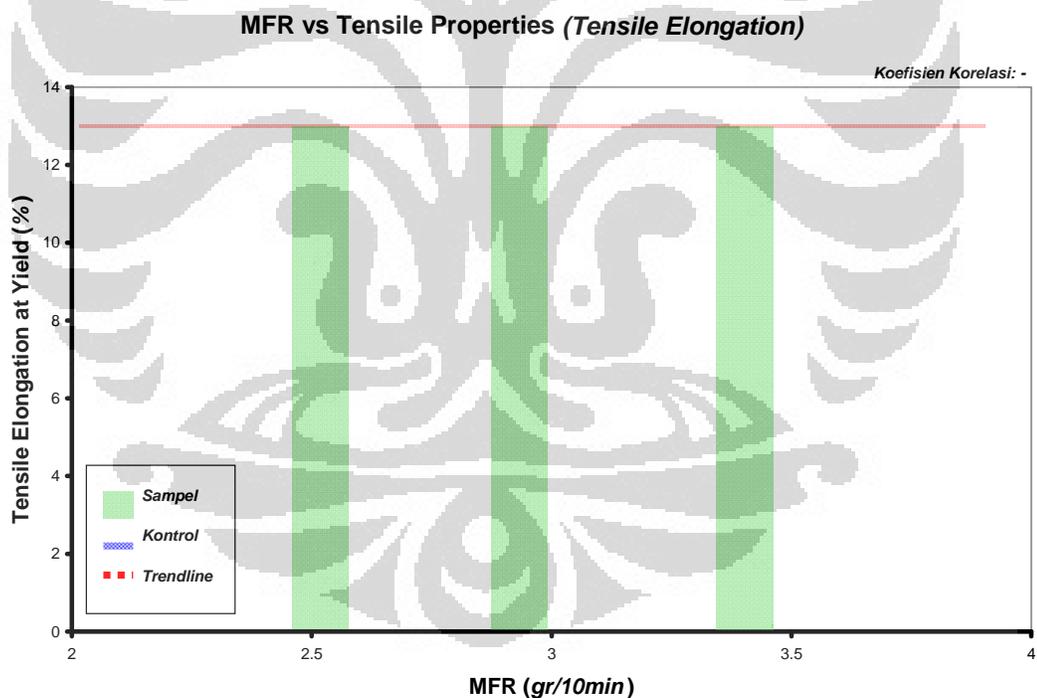
Dari hasil pengujian tarik yang dilakukan terhadap sampel dengan variasi MFR, didapatkan data seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Pengaruh MFR terhadap Regangan Tarik

| Parameter                   | Unit     | Sampel |      |      |      |     |     |
|-----------------------------|----------|--------|------|------|------|-----|-----|
|                             |          | 3B1S   | 5B3V | 7B1A | M8   | M9  | P5  |
| MFR                         | Gr/10min | 2.52   | 2.93 | 3.4  | 1.82 | 2.3 | 1.7 |
| Tensile Elongation at Yield | %        | 13     | 13   | 13   | 13   | 13  | 13  |
| Standar Deviasi             |          | 0      | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   |

Dari data diatas, terlihat bahwa perbedaan MFR relatif tidak berpengaruh terhadap kinerja regangan dari bahan, seperti yang juga ditampilkan pada Gambar 4.4. Dalam literatur, regangan pada saat luluh suatu bahan terkait pergerakan *reversible* dari rantai molekul PP dalam struktur amorf<sup>[26]</sup>. Atau dengan kata lain, pergerakan tanpa merubah struktur kristalin dari PP. Sehingga hanya terkait *intermolecular force* antar rantai dan juga derajat kebebasan pergerakan rantai molekul<sup>[28,29]</sup>.

Secara teoritis, menurunnya MFR atau meningkatnya panjang rantai molekul akan menyebabkan meningkatnya struktur amorf<sup>[7,30]</sup> sekaligus juga meningkatnya kecenderungan fenomena *chain entanglement*<sup>[38,39]</sup>. Meningkatnya jumlah struktur amorf dan fenomena *chain entanglement* akan menyebabkan performa tangguh pada material. Hal ini karena dengan meningkatnya struktur amorf pada material berarti meningkatnya struktur yang bersifat elastis pada material sehingga derajat kebebasan pergerakan rantai molekul pun akan meningkat. Namun disisi lain, peningkatan panjang rantai molekul juga menyebabkan meningkatnya kemungkinan terjadinya *chain entanglement* pada rantai molekul. Akibatnya kondisi saling terkait antar rantai molekul ini akan menyebabkan terhambatnya deformasi atau kebebasan pergerakan rantai molekul.



Gambar 4.4 Pengaruh MFR terhadap Regangan Tarik

Sehingga melalui data diatas dapat diambil sebuah hipotesis bahwa terjadi keseimbangan antara peningkatan derajat kebebasan rantai molekul akibat meningkatnya struktur amorf dan penahanan deformasi lanjutan oleh *chain*

*entanglement*. Sehingga secara umum tidak terlihat adanya perbedaan signifikan yang terjadi terhadap variabel regangan tarik terhadap perubahan MFR.

#### 4.1.1.b Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Regangan Tarik

Kemudian, pada Tabel 4.5 merupakan hasil pengujian terhadap variasi fraksi ataktik dalam rantai PP.

Tabel 4.5 Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Regangan Tarik

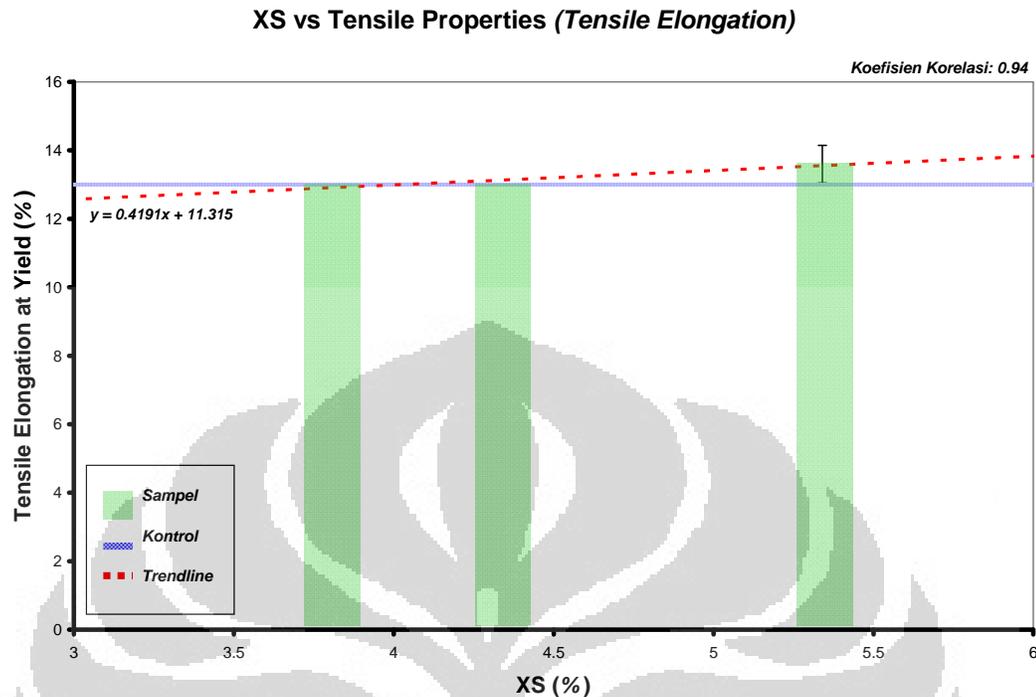
| Parameter                   | Unit | Sampel |      |      |      |      |     |
|-----------------------------|------|--------|------|------|------|------|-----|
|                             |      | 5B3V   | 7B1A | 0B2V | M8   | M9   | P5  |
| Fraksi Ataktik              | wt%  | 3.81   | 4.34 | 5.34 | 3.81 | 4.33 | 4.6 |
| Tensile Elongation at Yield | %    | 13     | 13   | 13.6 | 13   | 13   | 13  |
| Standar Deviasi             |      | 0      | 0    | 0.55 | 0    | 0    | 0   |

Dengan mengaplikasikan data diatas pada persamaan 2.1 dapat diketahui koefisien korelasi antara variabel fraksi ataktik dengan kekuatan tarik yaitu 0.94. yang berarti jika digunakan dalam persamaan 2.4 didapatkan koefisien determinasi ( $r^2$ ) yaitu 88%. Nilai ini menunjukkan bahwa variabel fraksi ataktik berpengaruh kuat terhadap nilai regangan tarik material.

Untuk melihat pengaruh tersebut maka data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh MFR terhadap kekuatan tarik pada Gambar 4.5. Sehingga dengan pendekatan statistik *Least Square*, sehingga didapat persamaan garis *trendline* linier:

$$y = 0.4191x + 11.315 \quad (4.4)$$

Persamaan 4.4 diatas, menunjukkan bahwa semakin tinggi fraksi ataktik dalam molekul PP, maka regangan tarik luluh dari bahan akan semakin tinggi. Hal ini karena semakin tinggi fraksi ataktik berarti susunan tersier metil pada rantai molekul PP tersebut akan semakin acak dan membentuk morfologi amorf yang bersifat ulet<sup>[7,8]</sup>.



Gambar 4.5 Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Regangan Tarik

Yang menarik disini adalah untuk semua sampel pada rentang fraksi ataktik normal (3.8 – 4.6wt%) untuk PP homopolimer, tidak terlihat adanya perubahan nilai regangan tarik pada saat luluh. Tetapi untuk sampel dengan fraksi ataktik yang tinggi (melebihi rentang normal), baru terlihat adanya perubahan nilai regangan tarik. Hal ini menunjukkan bahwa signifikansi perubahan fraksi ataktik terhadap performa regangan tarik baru terlihat pada perubahan sekitar 1wt%. Jika kurang dari itu, maka pengujian regangan tarik tidak dapat membedakan perubahan struktur yang terjadi.

Dengan menggunakan nilai maksimal regangan tarik diantara sampel M8, M9, dan P5 sebagai kontrol dimana,  $y = \text{tensile elongation M8} = 13\%$  (kontrol superior) dan menggunakan persamaan 4.4,

$$y > 0.4191x + 11.315$$

maka dapat diformulasikan secara empiris, nilai fraksi ataktik yang dapat menghasilkan sifat bahan yang superior yaitu,

$$x = \text{fraksi ataktik (desain)} > 4.02 \text{ wt\%}$$

dengan nilai korelasi 88%.

#### 4.1.1.c Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Regangan Tarik

Hasil pengujian terhadap variasi Kandungan Etilena Kopolimer sesuai dengan prosedur pada subbab 3.3.4 terhadap kekuatan tarik disajikan dalam Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Regangan Tarik

| Parameter                   | Unit | Sampel |      |      |      |    |    |    |
|-----------------------------|------|--------|------|------|------|----|----|----|
|                             |      | 3B1S   | 5B3V | 7B2V | 4B2V | M8 | M9 | P5 |
| Kandungan Etilena           | %    | 0.44   | 0.59 | 0.87 | 0.99 | 0  | 0  | 0  |
| Tensile Elongation at Yield | %    | 13     | 13   | 13   | 13   | 13 | 13 | 13 |
| Standar Deviasi             |      | 0      | 0    | 0    | 0    | 0  | 0  | 0  |

Dari data diatas, terlihat bahwa seperti halnya pada variasi sampel MFR, variasi sampel kandungan etilena kopolimerisasi yang ditambahkan pada homopolimer PP juga relatif tidak menunjukkan pengaruh terhadap performa regangan tarik.

A. R. Kamdar pada jurnalnya mengenai kopolimer PP-PE, menyatakan bahwa penambahan kopolimer etilena akan menyebabkan turunnya derajat kristalinitas dari PP<sup>[33,55]</sup>. Sebenarnya perilaku ini serupa seperti peningkatan fraksi ataktik pada PP homopolimer<sup>[53,56]</sup>. Namun dapat kita lihat pada Gambar 4.6, bahwa tidak seperti pada perubahan fraksi ataktik, penambahan etilena kopolimer tidak menunjukkan perubahan pada performa regangan tarik.

Dari data karakterisasi etilena kopolimer dan fraksi ataktik ini dapat ditarik kesimpulan bahwa performa regangan tarik hanya dipengaruhi oleh struktur dasar *backbone* PP. Jika diilustrasikan melalui pendekatan morfologi molekul PP, menurut Qamer Zia, struktur amorf yang terbentuk pada PP bukan hanya sepenuhnya terbentuk dari interaksi rantai ataktik, tetapi juga ada *single* rantai isotaktik yang terjebak dalam struktur tidak beraturan. Struktur *rigid amorphous* ini akan mempertahankan struktur amorf terhadap deformasi<sup>[45,46]</sup>.

Akibatnya hingga mencapai jumlah ataktik tertentu, maka struktur *rigid amorphous* ini akan menghambat pergerakan rantai molekul. Sebab pada deformasi elastis, rantai molekul hanya bergerak pada *snake tunnel* diantara

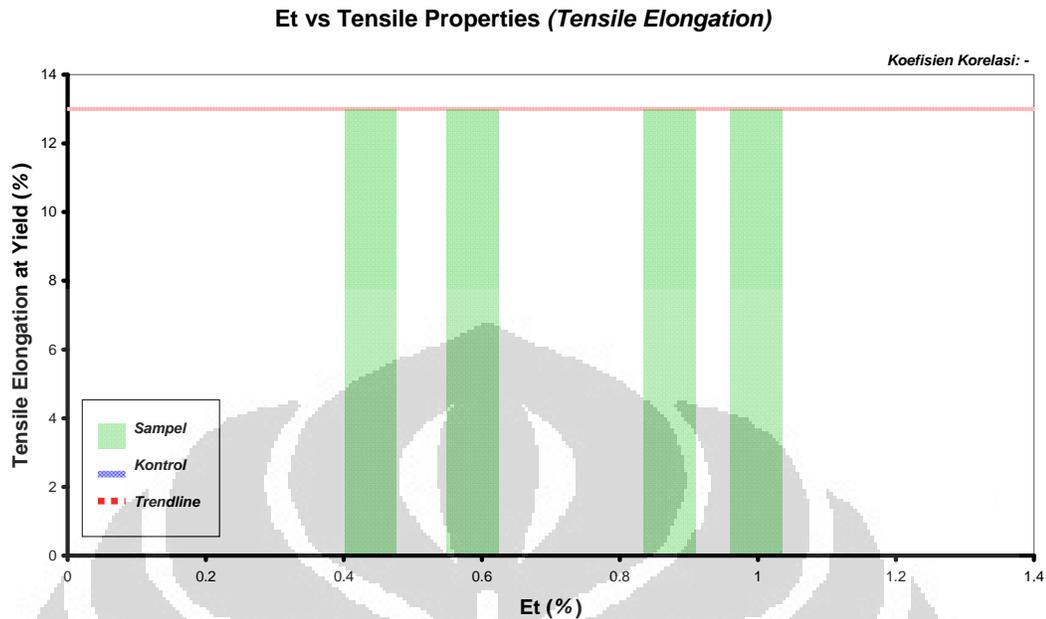
struktur kristalin<sup>[29]</sup>. Maka, dengan adanya struktur *rigid amorphous* ini, maka deformasi rantai molekul akan terhambat.



Gambar 4.6 *Snake Tunnel*, Tempat Pergerakan Rantai Molekul<sup>[29]</sup>

Perbedaan struktur amorf yang terbentuk akibat penambahan etilena kopolimer dengan peningkatan fraksi ataktik yaitu pada penambahan etilena, struktur amorf yang terbentuk (atau fraksi ataktik yang terbaca oleh pengujian *xylene soluble*) adalah jumlah kopolimer etilena ditambah dengan struktur ataktik homopolimer. Kemudian mengingat perbedaan karakteristik rantai dan gugus fungsi etilena dan propilena, maka akan terjadi pemisahan struktur. Sehingga sebenarnya fraksi ataktik pada penambahan etilene, lebih rendah dibanding fraksi ataktik umumnya. Akibatnya *snake tunnel* tempat bergerakinya rantai molekul juga semakin kecil. Secara keseluruhan ketahanan deformasi pada penambahan kopolimer etilena akibat *rigid amorphous* lebih besar dibanding ketika peningkatan fraksi ataktik.

Hal inilah yang menyebabkan pada pengujian performa regangan tarik, tidak terlihat adanya perubahan performa regangan akibat Etilena Kopolimer seperti pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Regangan Tarik

## 4.2 PENGUJIAN TEKUK 3-TITIK (*FLEKSURAL*)

### 4.2.a Pengaruh MFR terhadap Modulus Fleksural

Tabel 4.7 merupakan ringkasan data dan sampel yang digunakan untuk mengamati pengaruh MFR terhadap modulus fleksural (tekuk 3-titik). Kemudian dari data tersebut dapat dihitung koefisien korelasi menggunakan persamaan 2.1 untuk mengetahui pengaruh antar parameter, yaitu koefisien korelasi antara variabel MFR dengan modulus fleksural adalah -0.92, yang berarti jika digunakan dalam persamaan 2.4 didapatkan koefisien determinasi ( $r^2$ ) adalah 85%. Nilai ini menunjukkan bahwa variabel MFR berpengaruh kuat terhadap nilai modulus fleksural material.

Untuk melihat pengaruh tersebut maka data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh MFR terhadap modulus fleksural pada Gambar 4.8. Sehingga dengan pendekatan statistik *Least Square*, sehingga didapat persamaan garis *trendline* linier:

$$y = -158.25x + 1477.5 \quad (4.5)$$

Persamaan 4.5 diatas, menunjukkan bahwa MFR berbanding terbalik dengan modulus fleksural. Dengan kata lain, semakin tinggi MFR maka modulus

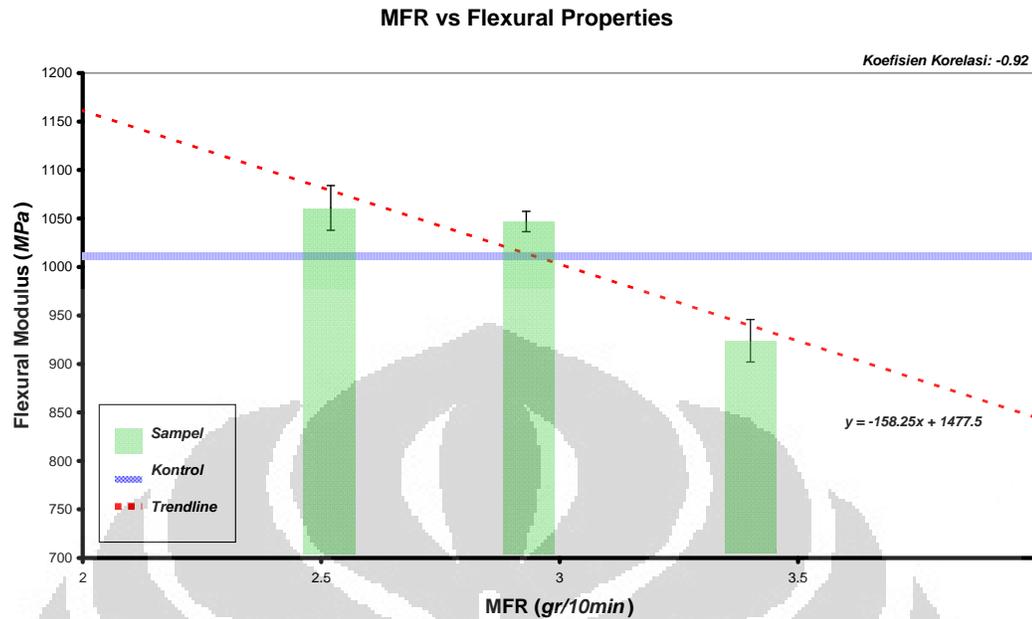
fleksural akan semakin rendah. Pada prinsipnya hubungan antara MFR dengan modulus fleksural serupa dengan kekuatan tarik. Hal ini terkait masalah *chain entanglement* pada struktur amorf. Seiring meningkatnya MFR, maka panjang rantai molekul juga menurun. Semakin pendeknya rantai molekul PP ini menyebabkan kemungkinan rantai molekul PP untuk saling terkait (*entangled*) juga semakin rendah<sup>[38,39]</sup>. Akibatnya ketika menerima pembebanan, maka ketahanan bahan terhadap deformasi pun semakin rendah.

Tabel 4.7 Pengaruh MFR terhadap Modulus Fleksural

| Parameter         | Unit     | Sampel |       |       |       |      |       |
|-------------------|----------|--------|-------|-------|-------|------|-------|
|                   |          | 3B1S   | 5B3V  | 7B1A  | M8    | M9   | P5    |
| MFR               | Gr/10min | 2.52   | 2.93  | 3.4   | 1.82  | 2.3  | 1.7   |
| Modulus Fleksural | MPa      | 1061   | 1047  | 924   | 1009  | 1009 | 1013  |
| Standar Deviasi   |          | 22.99  | 10.49 | 21.89 | 12.61 | 9.41 | 12.14 |

Yang membedakan peristiwa pengujian tarik dan tekuk (fleksural) adalah pada pengujian tekuk, fenomena yang terjadi bukan hanya arah pembebanan seperti pada pengujian tarik. Pada pengujian tekuk, terjadi 2 macam pembebanan pada sampel, yaitu pembebanan tarik pada sisi bawah *3-point-bending* dan pembebanan tekan pada sisi atas *3-point-bending*. Sehingga fenomena strain hardening atau penumpukan *chain entanglement* juga terjadi disini, seperti yang sudah dijelaskan pada subbab 2.1.4.2<sup>[36,52]</sup>.

Akumulasi dari kesemua mekanisme tersebutlah yang menyebabkan semakin rendah MFR (semakin panjang rantai molekul), maka modulus fleksural atau kekakuan bahan menjadi meningkat.



Gambar 4.8 Pengaruh MFR terhadap Modulus Fleksural

Kemudian selanjutnya dengan menggunakan nilai maksimal modulus fleksural diantara sampel M8, M9, dan P5 sebagai kontrol dan menggunakan persamaan 4.5, maka dapat diformulasikan secara empiris, nilai MFR yang dapat menghasilkan sifat bahan yang optimal yaitu

$$y > -158.25x + 1477.5$$

dimana,  $y = \text{modulus fleksural P5} = 1013 \text{ Mpa}$  (kontrol superior), sehingga didapat,  $x = \text{MFR (desain)} < 2.93 \text{ gr/10min}$

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa untuk menghasilkan performa produk yang baik, desain MFR yang optimal yaitu kurang dari 2.93 gr/10min dengan nilai korelasi 85%.

#### 4.2.b Pengaruh fraksi ataktik terhadap Modulus Fleksural

Kemudian, pada Tabel 4.8 merupakan hasil pengujian terhadap variasi fraksi ataktik dalam rantai PP. Dari hasil perhitungan koefisien korelasi menggunakan persamaan 2.1 didapatkan koefisien korelasi antara variabel fraksi ataktik dengan modulus fleksural yaitu -0.51. yang berarti jika digunakan dalam persamaan 2.4 didapatkan koefisien determinasi 39%. Nilai ini menunjukkan

bahwa variabel fraksi ataktik berpengaruh lemah terhadap nilai kekuatan tarik material. Karena itu regresi linier tidak dapat dilakukan, juga karena melihat adanya anomali yang signifikan pada data diatas. Untuk lebih jelasnya, data-data tersebut disajikan dalam Gambar 4.9.

Tabel 4.8 Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Modulus Fleksural

| Parameter         | Unit | Sampel |       |       |       |      |       |
|-------------------|------|--------|-------|-------|-------|------|-------|
|                   |      | 5B3V   | 7B1A  | 0B2V  | M8    | M9   | P5    |
| Fraksi Ataktik    | wt%  | 3.81   | 4.34  | 5.34  | 3.81  | 4.33 | 4.6   |
| Modulus Fleksural | MPa  | 1047   | 924   | 965.6 | 1009  | 1009 | 1013  |
| Standar Deviasi   |      | 10.49  | 21.89 | 13.45 | 12.61 | 9.41 | 12.14 |

Jika dilihat secara umum, pengaruh penambahan fraksi ataktik pada rantai molekul PP adalah menurunnya modulus fleksural. Namun, pada kadar fraksi ataktik 4.34, terjadi anomali dimana terjadi penurunan kekakuan secara signifikan (>10%). Standar deviasi sampel juga cukup besar tetapi masih dalam ukuran yang wajar. Karenanya dapat diasumsikan bahwa hasil pengukuran tersebut sudah cukup merepresentasikan kondisi perilaku sampel.

Sebenarnya indikasi kondisi anomali ini juga sudah terlihat pada pengujian kekuatan tarik. Namun penyimpangan yang terjadi masih dalam batas wajar. Tetapi karena signifikansi penyimpangan pada pengujian fleksural ini perlu diberikan suatu analisis mengenai anomali ini.

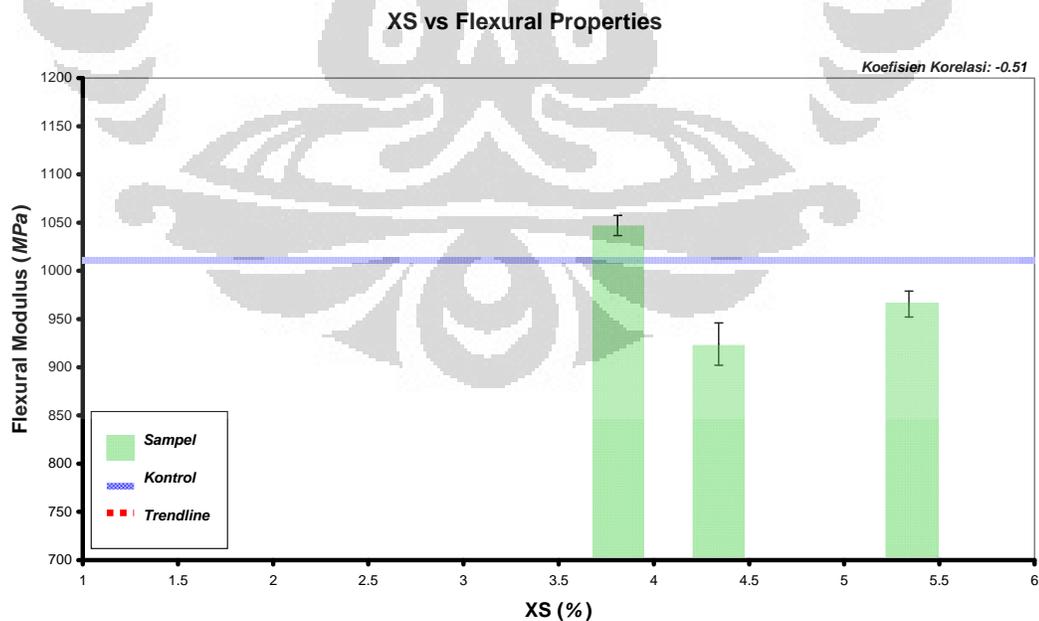
Pada pembebanan *low strain rate deformation*, seperti modulus, perilaku mekanis sampel terutama dipengaruhi oleh struktur kristalin<sup>[35]</sup>. Semakin tinggi fraksi ataktik rantai PP, maka struktur akan semakin bersifat amorf<sup>[7,8]</sup>. Akibatnya kekakuan material juga akan berkurang.

Yutaka Koike dan Miko Cakmak menjelaskan bahwa pergerakan struktur tergantung pada arah orientasi lamela tersebut arah tarikan (*stretching*)<sup>[37,38]</sup>. Karena itu mengingat pada pengujian tekuk, terdapat 2 macam pembebanan sekaligus, maka pembentukan orientasi dan penyusunan struktur kristalin menjadi lebih mudah. Hal ini akan menyebabkan penurunan kekakuan menjadi lebih jelas. Kemungkinan hal inilah yang terjadi pada kondisi fraksi ataktik 4.34%.

Faktor penting yang juga berpengaruh terhadap respon mekanis dari sampel adalah *tie-chain* sebagai media transfer beban<sup>[36]</sup>. Kondisi fraksi ataktik 4.34% walaupun berada pada spesifikasi, sebenarnya berada pada *high site*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa lamela kristalin yang terbentuk pada kondisi ini lebih tipis dibanding fraksi ataktik yang lebih rendah. Kondisi ini menyebabkan *tie chain* menjadi sangat sensitif, karena jika *tie-chain* ini gagal mentransfer beban, maka struktur akan tidak mampu mempertahankan deformasi lebih lanjut.

Pada fraksi ataktik yang lebih tinggi lagi (5.34 wt%), peristiwa kegagalan *tie-chain* tersebut tidak terjadi (terlihat dari modulus fleksural yang lebih tinggi), karena semakin tinggi fraksi ataktik, maka struktur amorf pada material semakin banyak. Akibatnya *tie-chain* yang menghubungkan lamela-lamela kristalin tersebut juga semakin banyak<sup>[37,38]</sup>. Sehingga *tie chain* tersebut dapat melakukan transfer beban dengan baik.

Sebagai hipotesis awal, diduga anomali ini terjadi akibat kegagalan *tie-chain* dalam mekanisme transfer beban antara struktur amorf dan kristalin. Namun untuk mendapatkan analisa dan penjelasan yang lebih komprehensif mengenai hal ini, diperlukan penelitian lebih lanjut.



Gambar 4.9 Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Modulus Fleksural

#### 4.2.c Pengaruh Kandungan etilena terhadap Modulus Fleksural

Hasil pengujian terhadap variasi Kandungan Etilena Kopolimer sesuai dengan prosedur pada subbab 3.3.4 terhadap modulus fleksural disajikan dalam Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Modulus Fleksural

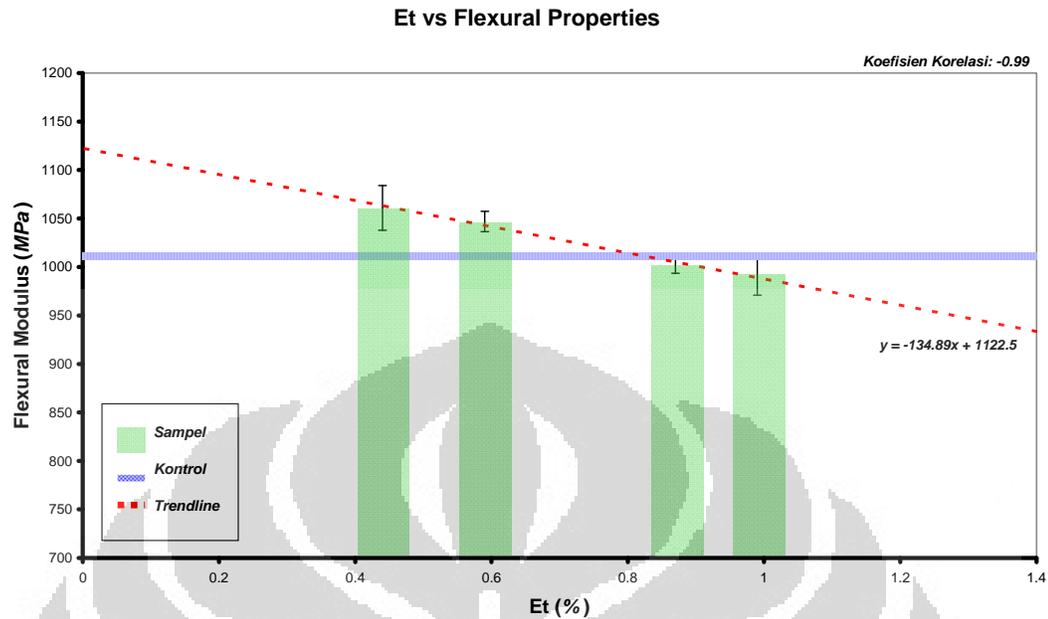
| Parameter         | Unit | Sampel |       |      |       |       |      |       |
|-------------------|------|--------|-------|------|-------|-------|------|-------|
|                   |      | 3B1S   | 5B3V  | 7B2V | 4B2V  | M8    | M9   | P5    |
| Kandungan Etilena | wt%  | 0.44   | 0.59  | 0.87 | 0.99  | 0     | 0    | 0     |
| Modulus Fleksural | MPa  | 1061   | 1047  | 1001 | 991   | 1009  | 1009 | 1013  |
| Standar Deviasi   |      | 22.99  | 10.49 | 7.52 | 20.03 | 12.61 | 9.41 | 12.14 |

Dengan menggunakan persamaan 2.1 dapat diperhitungkan koefisien korelasi yang menghubungkan variabel kandungan etilena kopolimer dengan modulus fleksural yaitu -0.99 yang berarti dengan persamaan 2.4 didapatkan koefisien determinasi ( $r^2$ ) 99%. Dengan demikian dapat diketahui bahwa variabel kandungan etilena kopolimer sangat berpengaruh terhadap nilai modulus fleksural material.

Untuk melihat pengaruh tersebut maka data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh kandungan etilena kopolimer terhadap modulus fleksural pada Gambar 4.10. Sehingga dengan pendekatan statistik *Least Square*, sehingga didapat persamaan garis *trendline* linier:

$$y = -134.89x + 1122.5 \quad (4.6)$$

Persamaan 4.7 diatas, menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan etilena kopolimer maka modulus fleksural material akan semakin rendah. Serupa seperti hasil yang didapat pada pengujian tarik. Pada prinsipnya, penambahan komonomer etilena pada rantai PP akan meningkatkan *constitutional defect*<sup>[28]</sup>. *Constitutional defect* ini akan menyebabkan antar rantai molekul yang berdekatan akan membentuk konfigurasi struktur amorf. Struktur yang semakin amorf inilah yang menyebabkan perilaku ulet akibat penambahan etilena kopolimer.



Gambar 4.10 Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Modulus Fleksural

Selanjutnya dengan menggunakan nilai maksimal modulus fleksural diantara sampel M8, M9, dan P5 sebagai kontrol, atau dalam pengujian ini menggunakan data

$y = \text{modulus fleksural P5} = 1013 \text{ Mpa}$  sebagai kontrol superior dan menggunakan persamaan 4.7,

$$y > -134.89x + 1122.5$$

maka dapat diformulasikan secara empiris, nilai kandungan etilen yang dapat menghasilkan sifat bahan yang superior adalah

$$x = \text{Kandungan etilena (desain)} < 0.82 \text{ wt\%}$$

Sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk menghasilkan performa produk yang baik, desain Kandungan etilena yang optimal yaitu kurang dari 0.82 wt% dengan nilai korelasi 99%.

### 4.3 PENGUJIAN BEBAN KEJUT (*IMPACT TEST*)

#### 4.3.1 Pengujian Beban Kejut Metoda Izod (*Izod Impact Test*)

##### 4.3.1.a Pengaruh MFR terhadap Ketahanan Impak Izod (*Izod Impact Strength*)

Tabel 4.10 merupakan ringkasan data dan sampel yang digunakan untuk mengamati pengaruh MFR terhadap ketahanan impak Izod (*Izod Impact Strength*).

Tabel 4.10 Pengaruh MFR terhadap Ketahanan Impak Izod

| Parameter            | Unit     | Sampel |      |      |      |       |      |
|----------------------|----------|--------|------|------|------|-------|------|
|                      |          | 3B1S   | 5B3V | 7B1A | M8   | M9    | P5   |
| MFR                  | Gr/10min | 2.52   | 2.93 | 3.4  | 1.82 | 2.3   | 1.7  |
| Ketahanan Impak Izod | J/m      | 16.1   | 11.5 | 8.74 | 9.83 | 10.25 | 14.5 |
| Standar Deviasi      |          | 0.65   | 0.39 | 0.62 | 0.28 | 0.40  | 0.41 |

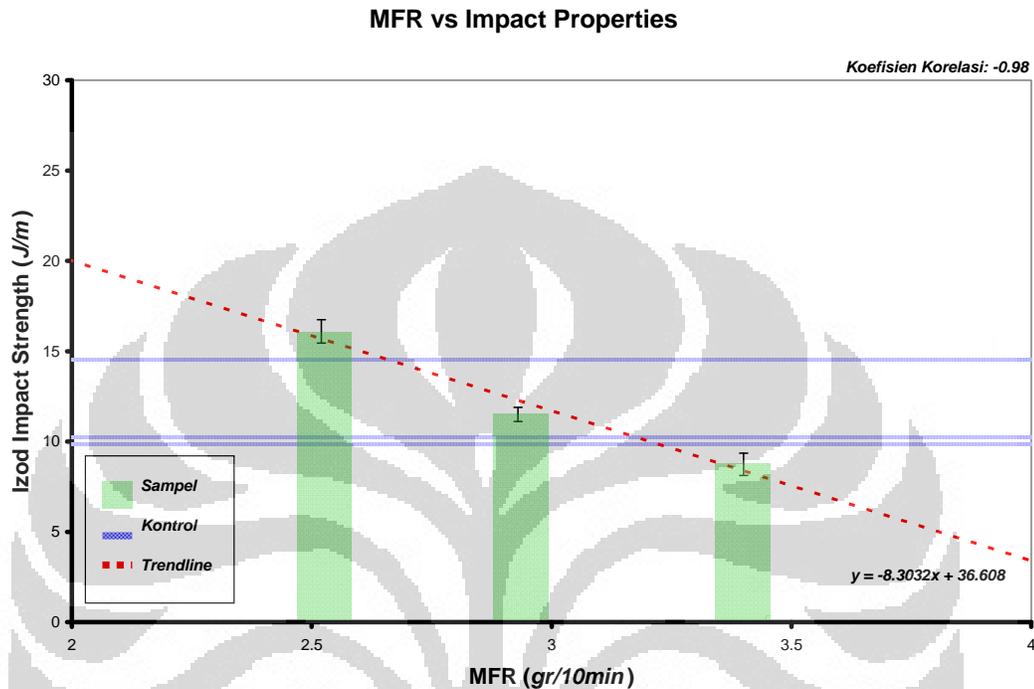
Dengan metode statistik, dapat dihitung koefisien korelasi antara variabel MFR dengan ketahanan impak Izod menggunakan persamaan 2.1 yaitu -0.98. yang berarti jika digunakan dalam persamaan 2.4 didapatkan koefisien determinasi ( $r^2$ ) adalah 97%. Sehingga diketahui bahwa variabel MFR sangat berpengaruh terhadap nilai ketahanan impak Izod.

Untuk melihat pengaruh tersebut maka data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh MFR terhadap ketahanan impak Izod pada Gambar 4.11. Sehingga dengan pendekatan statistik *Least Square*, sehingga didapat persamaan garis *trendline* linier:

$$y = -8.3032x + 36.608 \quad (4.7)$$

Persamaan 4.8 diatas, menunjukkan bahwa semakin tinggi MFR maka ketahanan pembebanan impak juga semakin rendah. Dalam tinjauan molekuler, seperti yang dibahas oleh J. J. Jaminak dan G. C. Steven, struktur amorf yang bersifat seperti pegas akan lebih berperan dominan terhadap *high strain rate deformation*, seperti *impact*, *tear*, dan ketahanan patahan<sup>[35]</sup>. Kaitannya dengan panjang rantai molekul (rendahnya MFR), semakin panjang rantai PP, maka seiring dengan banyaknya *chain entanglement* yang terjadi, derajat kristalinitas dari PP juga menurun<sup>[38]</sup>. Akibatnya PP menjadi bersifat lebih amorf yang

menunjukkan performa ulet atau ketahanan impak yang meningkat seiring meningkatnya panjang rantai molekul (menurunnya MFR).



Gambar 4.11 Pengaruh MFR terhadap Ketahanan Impak Izod

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan 4.8,

$$y > -8.3032x + 36.608$$

menggunakan nilai maksimal ketahanan impak Izod diantara sampel M8, M9, dan P5 sebagai kontrol, dimana  $y = \text{ketahanan impak Izod P5} = 14.5 \text{ J/m}$  (kontrol superior). Maka dapat diformulasikan secara empiris, nilai MFR yang dapat menghasilkan sifat bahan yang superior adalah

$$x = \text{MFR (desain)} < 2.66 \text{ gr/10min}$$

dengan nilai korelasi 97%.

#### 4.3.1.b Pengaruh fraksi ataktik terhadap Ketahanan Impak Izod (*Izod Impact Strength*)

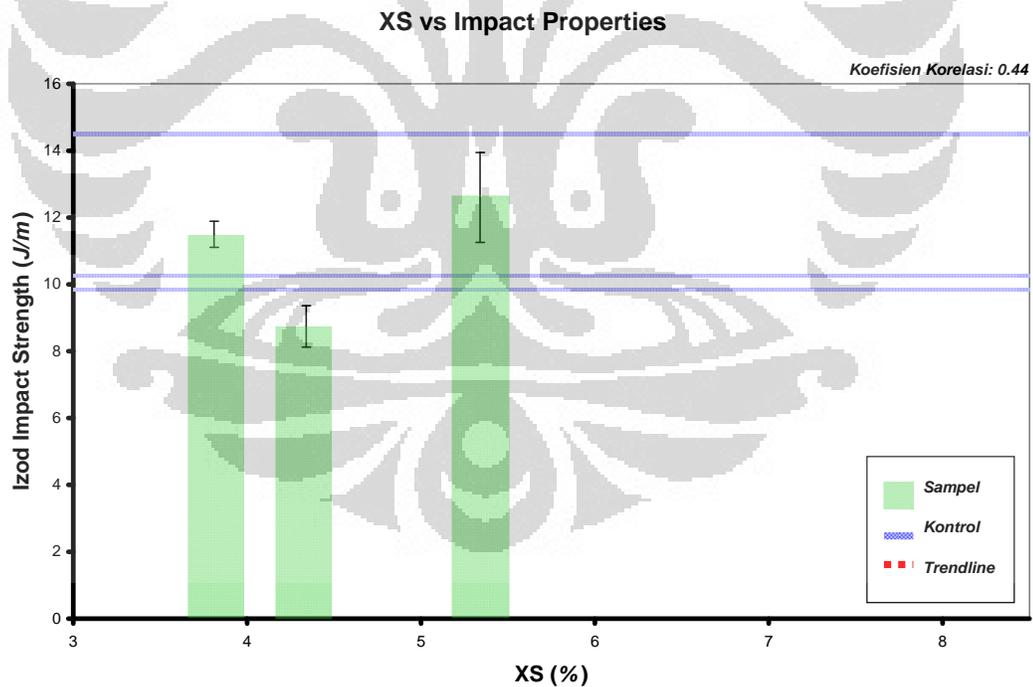
Tabel 4.11 berikut merupakan hasil pengujian terhadap variasi fraksi ataktik dalam rantai PP.

Tabel 4.11 Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Ketahanan Impak Izod

| Parameter            | Unit | Sampel |      |      |      |       |      |
|----------------------|------|--------|------|------|------|-------|------|
|                      |      | 5B3V   | 7B1A | 0B2V | M8   | M9    | P5   |
| Fraksi Ataktik       | wt%  | 3.81   | 4.34 | 5.34 | 3.81 | 4.33  | 4.6  |
| Ketahanan Impak Izod | J/m  | 11.5   | 8.74 | 12.6 | 9.83 | 10.25 | 14.5 |
| Standar Deviasi      |      | 0.39   | 0.62 | 1.34 | 0.28 | 0.40  | 0.41 |

Kemudian koefisien korelasi dapat dihitung menggunakan persamaan 2.1 yaitu 0.44, selanjutnya dengan persamaan 2.4 dapat diketahui koefisien determinasi ( $r^2$ ) sebesar 19% atau dengan kata lain variabel fraksi ataktik berpengaruh lemah terhadap nilai ketahanan impak Izod. Melihat nilai korelasi yang lemah tersebut, maka regresi linier tidak dapat dilakukan.

Untuk lebih jelasnya, data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh fraksi ataktik terhadap ketahanan impak Izod pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Ketahanan Impak Izod

Secara umum, dapat dijelaskan bahwa pengaruh penambahan fraksi ataktik pada rantai molekul PP adalah menyebabkan struktur menjadi lebih amorf, sehingga seharusnya lebih tahan terhadap pembebanan impak<sup>[7,8,55]</sup>. Namun, pada Gambar 4.12 diatas, dapat terlihat bahwa selain memiliki standar deviasi yang besar untuk tiap sampelnya, sesuai dengan karakteristik pengujian impak, juga terjadi anomali terhadap kondisi fraksi ataktik 4.34wt%.

Terkait hipotesis pada subbab 4.2.b, anomali ini juga terkait kegagalan *tie chain* dalam mentransfer beban. Pada pengujian impak metode Izod, hal ini juga sensitif, mengingat pengujian ini bertujuan mengamati perilaku sampel pada kondisi kristis (memiliki *initial crack*). Sehingga apabila transfer beban tidak berjalan dengan baik, maka *fracture toughness* dari material akan buruk<sup>[55]</sup>.

Sehingga kesimpulannya, dengan pemahaman yang ada, hipotesis yang dapat dibuat adalah diduga anomali tersebut terjadi akibat kegagalan *tie-chain* dalam mentransfer beban yang diterima. Tentu saja penelitian lebih lanjut yang lebih dalam diperlukan untuk menjelaskan fenomena ini.

#### **4.3.1.c Pengaruh Kandungan etilena terhadap Ketahanan Impak Izod (*Izod Impact Strength*)**

Hasil pengujian terhadap variasi Kandungan Etilena Kopolimer sesuai dengan prosedur pada subbab 3.3.4 terhadap kekuatan tarik disajikan dalam Tabel 4.9. yang kemudian jika digunakan metode statistik pada persamaan 2.1 didapatkan koefisien korelasi antara variabel kandungan etilena kopolimer dengan ketahanan impak Izod yaitu -0.15. atau dengan kata lain diketahui koefisien determinasi ( $r^2$ ) hanya sekitar 2%.

Nilai tersebut menunjukkan bahwa variabel kandungan etilena kopolimer hampir tidak berpengaruh terhadap nilai ketahanan impak Izod. Melihat nilai korelasi yang relatif tidak berpengaruh tersebut, maka regresi linier tidak dapat dilakukan. Untuk lebih jelasnya, data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh kandungan etilena kopolimer terhadap ketahanan impak Izod pada Gambar 4.13.

Tabel 4.12 Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Ketahanan Impak Izod

| Parameter            | Unit | Sampel |      |       |      |      |       |      |
|----------------------|------|--------|------|-------|------|------|-------|------|
|                      |      | 3B1S   | 5B3V | 7B2V  | 4B2V | M8   | M9    | P5   |
| Kandungan Etilena    | wt%  | 0.44   | 0.59 | 0.87  | 0.99 | 0    | 0     | 0    |
| Ketahanan Impak Izod | J/m  | 16.1   | 11.5 | 14.18 | 14.1 | 9.83 | 10.25 | 14.5 |
| Standar Deviasi      |      | 0.65   | 0.39 | 0.31  | 0.81 | 0.28 | 0.40  | 0.41 |

Pada Gambar 4.13, terlihat bahwa semakin tinggi kandungan Etilena Kopolimer maka ketahanan impak Izod material juga akan semakin rendah. Hal ini cukup bertentangan dengan teori yang umum dikenal di literatur. Umumnya, penambahan Etilena Kopolimer yang sempurna akan menyebabkan peningkatan keuletan dari bahan tersebut, dikarenakan meningkatnya struktur amorf dari material<sup>[7,8]</sup>.



Gambar 4.13 Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Ketahanan Impak Izod

Hal tersebut diperkirakan terkait prinsip dasar pengujian impak Izod, yaitu menguji ketahanan material terhadap pembebanan kejut pada kondisi kritis. Artinya ketangguhan atau dalam hal ini kemampuan material untuk menahan perambatan retak atau biasa disebut *fracture toughness*.

Pada data diatas, terlihat adanya anomali terhadap kondisi Et = 0.44 wt%. Disini terlihat bahwa energi impak Izod sampel ini lebih tinggi dibanding sampel lainnya. Jika melihat data karakterisasi sampel pada Lampiran 1. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh adanya interfensi oleh pengaruh MFR rendah yang menyebabkan, sampel ini lebih tangguh (*fracture toughness* yang lebih tinggi) dibanding sampel komposisi etilena lainnya, sebab berbeda dengan sampel lainnya, sampel ini tidak hanya memiliki struktur amorf dari penambahan etilena kopolimer, tetapi juga *chain entanglement* dari pengaruh MFR rendah.

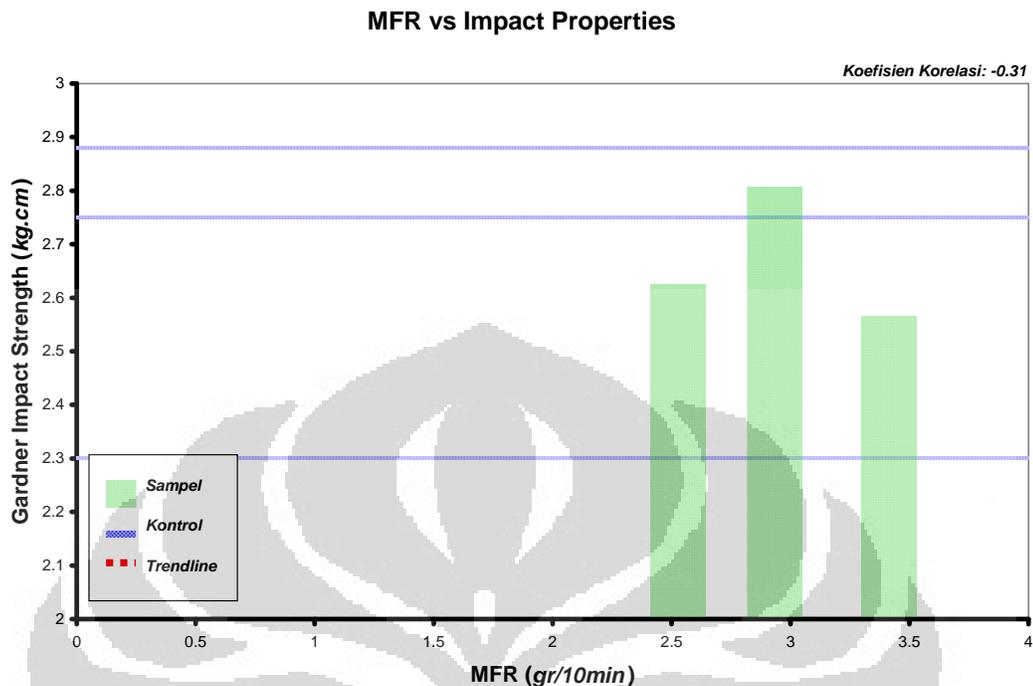
#### 4.3.2 Pengujian Beban Kejut Metoda Gardner (*Gardner Impact Test*)

##### 4.3.2.a Pengaruh MFR terhadap Ketahanan Impak Gardner (*Gardner Impact Strength*)

Ringkasan data dan sampel yang digunakan untuk mengamati pengaruh MFR terhadap ketahanan impak Gardner dapat diamati pada Tabel 4.13. Dengan persamaan 2.1 didapatkan koefisien korelasi antara variabel MFR dengan ketahanan impak Gardner yaitu -0.31 atau dalam persamaan 2.4 didapatkan koefisien determinasi ( $r^2$ ) yaitu 10%. Nilai ini menunjukkan bahwa variabel MFR berpengaruh lemah terhadap nilai ketahanan impak Gardner material. Karena nilai korelasi yang lemah tersebut, untuk menghindari kesalahan desain, maka regresi linier tidak dilakukan. Kemudian untuk melihat pengaruh tersebut maka data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh MFR terhadap ketahanan impak Gardner pada Gambar 4.15.

Tabel 4.13 Pengaruh MFR terhadap Ketahanan Impak Gardner

| Parameter               | Unit     | Sampel |      |      |      |      |     |
|-------------------------|----------|--------|------|------|------|------|-----|
|                         |          | 3B1S   | 5B3V | 7B1A | M8   | M9   | P5  |
| MFR                     | Gr/10min | 2.52   | 2.93 | 3.4  | 1.82 | 2.3  | 1.7 |
| Ketahanan Impak Gardner | Kg.cm    | 2.61   | 2.81 | 2.56 | 2.75 | 2.88 | 2.3 |



Gambar 4.14 Pengaruh MFR terhadap Ketahanan Impak Gardner

Sebenarnya pada Gambar 4.14 terlihat bahwa secara umum meningkatnya MFR akan menyebabkan turunnya ketahanan material terhadap pembebanan impak Gardner. Namun pada MFR 2.61 gr/10min dan 2.93 gr/10min terjadi anomali ketahanan impak. Seharusnya semakin tinggi MFR berarti panjang rantai molekul semakin pendek, sehingga ketahanan impak Gardner akan menurun<sup>[38,39]</sup>. Tetapi pada data tersebut terlihat adanya peningkatan ketahanan impak seiring dengan menurunnya panjang rantai molekul.

Jika diperhatikan dari data karakterisasi pada Lampiran 1, pada sampel pertama (2.61 gr/10min), keanehan yang terlihat ialah kondisi kandungan etilena yang rendah, sedangkan pada sampel kedua (2.93 gr/10min) perbedaan yang terlihat adalah kondisi fraksi ataktik yang berada pada *low site*. Kemudian jika melihat nilai korelasi (koefisien determinasi), telah diketahui bahwa kandungan etilena memiliki hubungan 43% dengan ketahanan impak Gardner, sedangkan fraksi ataktik hanya 10%. Hal ini menunjukkan bahwa anomali data pengujian disebabkan oleh terutama kondisi rendahnya kandungan etilena pada sampel

pertama. Sehingga dengan kondisi ini, maka ketahanan impact material akan menurun seiring rendahnya struktur amorf akibat kandungan etilena.

Kemudian untuk sampel yang kedua, rendahnya fraksi ataktik akan menyebabkan kekakuan bahan meningkat, sehingga dengan dikombinasikan dengan MFR sedang, maka ketangguhan bahan meningkat. Sehingga didapat nilai ketahanan impact yang lebih tinggi.

#### 4.3.2.b Pengaruh fraksi ataktik terhadap Ketahanan Impact Gardner (*Gardner Impact Strength*)

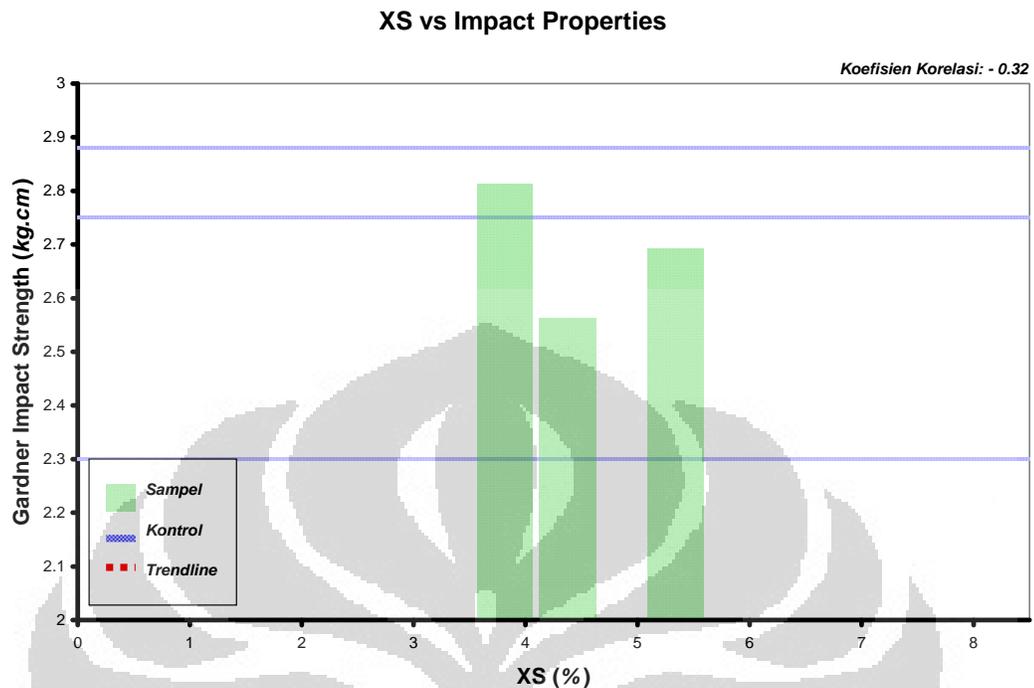
Kemudian, pada Tabel 4.14 merupakan hasil pengujian terhadap variasi fraksi ataktik dalam rantai PP.

Tabel 4.14 Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Ketahanan Impact Gardner

| Parameter                | Unit  | Sampel |      |      |      |      |     |
|--------------------------|-------|--------|------|------|------|------|-----|
|                          |       | 5B3V   | 7B1A | 0B2V | M8   | M9   | P5  |
| Fraksi Ataktik           | wt%   | 3.81   | 4.34 | 5.34 | 3.81 | 4.33 | 4.6 |
| Ketahanan Impact Gardner | Kg.cm | 2.81   | 2.56 | 2.69 | 2.75 | 2.88 | 2.3 |

Dari hasil perhitungan koefisien korelasi menggunakan persamaan 2.1 didapatkan koefisien korelasi antara variabel fraksi ataktik dengan ketahanan impact Gardner yaitu -0.32. yang berarti jika digunakan dalam persamaan 2.4 didapatkan koefisien determinasi 10%. Nilai ini menunjukkan bahwa variabel fraksi ataktik berpengaruh lemah terhadap nilai ketahanan impact Gardner. Melihat nilai korelasi yang lemah tersebut, maka regresi linier tidak dapat dilakukan. Untuk lebih jelasnya, data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh fraksi ataktik terhadap ketahanan impact Gardner pada Gambar 4.15.

Serupa seperti perilaku pada pengujian impact Izod dan terkait data pada pengujian fleksural, secara umum, seharusnya pengaruh penambahan fraksi ataktik pada rantai molekul PP adalah menyebabkan struktur menjadi lebih amorf, sehingga seharusnya lebih tahan terhadap pembebanan impact<sup>[56]</sup>. Namun, pada Gambar 4.15 diatas, terlihat kondisi sebaliknya. Terlihat bahwa semakin tinggi fraksi ataktik, ketahanan impact Gardner juga berkurang.



Gambar 4.15 Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Ketahanan Impak Gardner

Mengingat pengujian ini dilakukan pada temperatur gelas homopolimer, seharusnya dengan meningkatnya fraksi ataktik, maka rantai molekul PP menjadi semakin bersifat amorf, akibatnya rantai molekul ini semakin mudah bergerak<sup>[7,8]</sup> yang berarti menurunnya temperatur transisi gelasnya. Sehingga seharusnya pada temperatur uji, sampel masih bersifat ulet.

Anomali pada pengujian ini terutama terlihat pada fraksi ataktik 3.81wt%. Jika dilihat dari data mentah pengujian Gardner (Lampiran 4), terlihat bahwa sebaran data pembebanannya sangat baik. Sehingga diperkirakan hasil pengujian yang dilakukan ini cukup representatif untuk menggambarkan keadaan sampel.

Kemudian jika melihat data karakterisasi material dari sampel tersebut, tidak ditemukan juga adanya suatu kejanggalan. Sehingga dapat diperkirakan lebih jauh bahwa anomali ini disebabkan oleh respon sampel terhadap pembebanan.

Sama seperti subbab 4.3.2.a, jika dilakukan analisis pada skala molekuler, selain sampel tersebut memiliki fraksi ataktik yang rendah, sampel tersebut memiliki MFR yang tinggi (walau dalam spesifikasi) dan kandungan etilena yang

sedang. Jika diilustrasikan, struktur molekul rantai ini ialah cukup kristalin karena MFR yang tinggi<sup>[7]</sup>, namun juga memiliki kandungan etilena sedang, yang berakibat keuletannya pun cukup baik<sup>[8]</sup>. Diperkirakan kombinasi performa inilah yang menyebabkan ketahanan impak Gardner sampel ini lebih baik dibanding sampel lainnya.

#### 4.3.2.c Pengaruh Kandungan etilena terhadap Ketahanan Impak Gardner (*Gardner Impact Strength*)

Hasil pengujian terhadap variasi Kandungan Etilena Kopolimer sesuai dengan prosedur pada subbab 3.3.4 terhadap ketahanan impak Izod disajikan dalam Tabel 4.9.

Tabel 4.15 Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Ketahanan Impak Gardner

| Parameter               | Unit  | Sampel |      |      |      |      |      |     |
|-------------------------|-------|--------|------|------|------|------|------|-----|
|                         |       | 3B1S   | 5B3V | 7B2V | 4B2V | M8   | M9   | P5  |
| Kandungan Etilena       | wt%   | 0.44   | 0.59 | 0.87 | 0.99 | 0    | 0    | 0   |
| Ketahanan Impak Gardner | Kg.cm | 2.63   | 2.81 | 2.75 | 2.81 | 2.75 | 2.88 | 2.3 |

Melalui persamaan 2.1, diketahui koefisien korelasi variabel kandungan etilena kopolimer dengan ketahanan impak Gardner yaitu 0.65 hal ini berarti dengan persamaan 2.4 didapatkan koefisien determinasi 43%. Nilai ini menunjukkan bahwa variabel kandungan etilena kopolimer cukup berpengaruh terhadap nilai ketahanan impak Gardner material.

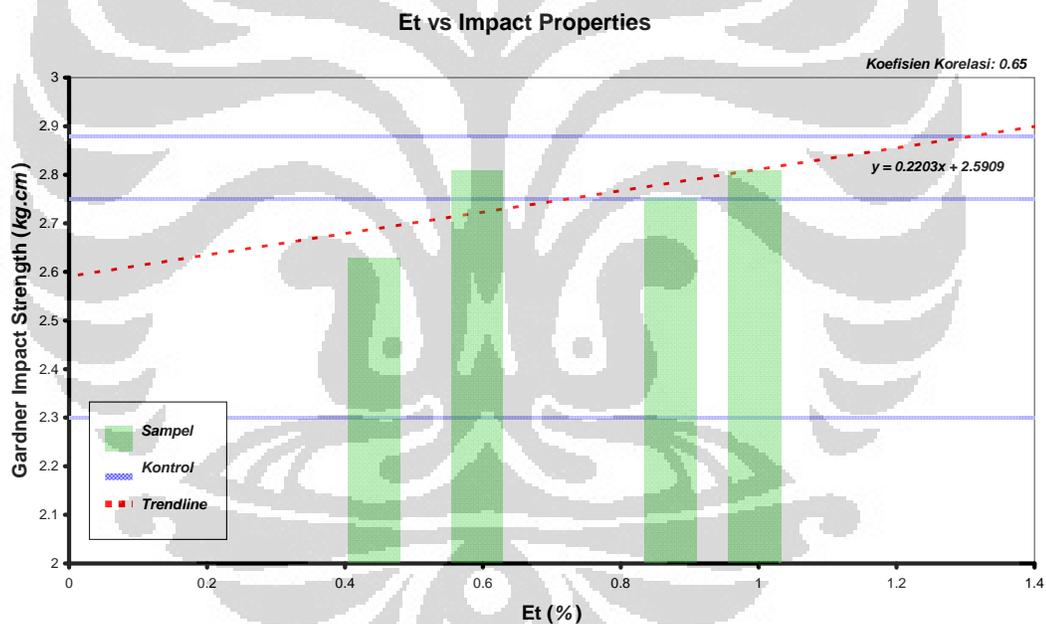
Untuk melihat pengaruh tersebut maka data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh kandungan etilena kopolimer terhadap ketahanan impak Gardner pada Gambar 4.16. Sehingga dengan pendekatan statistik *Least Square*, sehingga didapat persamaan garis *trendline* linier:

$$y = 0.2203x + 2.5909 \quad (4.8)$$

Persamaan 4.8 diatas, menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan Etilena Kopolimer maka ketahanan impak Gardner akan semakin tinggi. Berkebalikan dengan hubungan antara kandungan etilena kopolimer dengan

modulus fleksural, fenomena kunci yang menunjukkan efek dari penambahan komonomer etilena pada rantai PP adalah *constitutional defect*<sup>[28]</sup>. Seperti yang sudah dibahas sebelumnya, adanya *constitutional defect* menyebabkan struktur amorf hasil modifikasi penambahan etilena kopolimer bersifat ulet. Pada pengujian beban kejut, struktur yang bersifat ulet ini bertindak seperti pegas yang berfungsi sebagai *shock (energy) absorber*<sup>[35,55]</sup>.

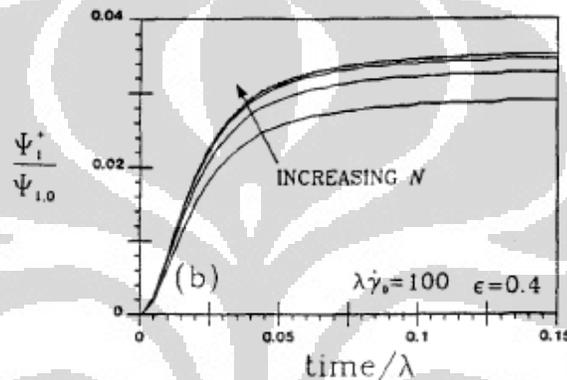
Konsep dasar dari pengujian Gardner adalah mengamati perilaku viscoelastis dari bahan pada temperatur gelasnya. Pada pengujian ini kecepatan pembebanan ditampilkan melalui fungsi energi potensial (ketinggian). Ukuran keuletan dari material dilihat dari seberapa tahan material tersebut untuk dapat menyerap energi pada kecepatan pembebanan yang berbeda.



Gambar 4.16 Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Ketahanan Impak Gardner

Pada penambahan komonomer etilena, seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, struktur yang terbentuk adalah struktur amorf. Kelebihan struktur ini adalah sifat elastik-nya. Sehingga ketika menerima kecepatan pembebanan yang lebih tinggi, semakin tinggi kadar penambahan kopolimer, struktur tersebut akan mampu menyerap energi tersebut dan bersifat elastik (kurva viskoelastik bergeser

keatas atau lebih curam). Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.17, semakin tinggi kadar struktur amorf pada material, maka viskositas atau kekentalan akan meningkat<sup>[31]</sup>. Bila diaplikasikan pada pengujian impak Gardner, meningkatnya viskositas berkaitan dengan kemampuan material menyerap energi dan berdeformasi sebelum patah. Sehingga dengan kata lain, semakin tinggi kandungan etilena kopolimer, maka struktur akan semakin amorf, dan semakin mampu menyerap beban sebelum patah.



Gambar 4.17 Pengaruh Meningkatnya Struktur Amorf terhadap Viskositas Menurut Model Curtiss-Bird<sup>[31]</sup>

Selanjutnya dengan menggunakan nilai maksimal ketahanan impak Gardner diantara sampel M8, M9, dan P5 sebagai kontrol dan menggunakan persamaan 4.13, maka dapat diformulasikan secara empiris, nilai Kandungan etilen yang dapat menghasilkan sifat bahan yang superior adalah

$$y > 0.2203x + 2.5909$$

dimana,  $y = \text{ketahanan impak Gardner M9} = 2.88 \text{ kg.cm}$  (kontrol superior), sehingga didapat,  $x = \text{Kandungan etilena (desain)} > 1.32 \text{ wt\%}$ .

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa untuk menghasilkan performa produk yang baik, desain kandungan etilena yang optimal yaitu lebih dari 1.32wt% dengan nilai korelasi 43%.

#### 4.4 PENGUJIAN KEKERASAN (*HARDNESS TEST*)

##### 4.4.a Pengaruh MFR terhadap Kekerasan

Pengaruh MFR terhadap pengujian kekerasan bahan disajikan pada Tabel 4.16. Yang kemudian dengan metode statistik, pada persamaan 2.1 didapatkan koefisien korelasi antara variabel MFR dengan kekerasan yaitu 0.70. dengan koefisien determinasi ( $r^2$ ) sebesar 49%. Nilai ini menunjukkan bahwa variabel fraksi ataktik berpengaruh sedang terhadap nilai kekerasan material. Namun karena terlihat adanya anomali data yang cukup signifikan pada pengujian ini, maka regresi linier juga tidak dilakukan.

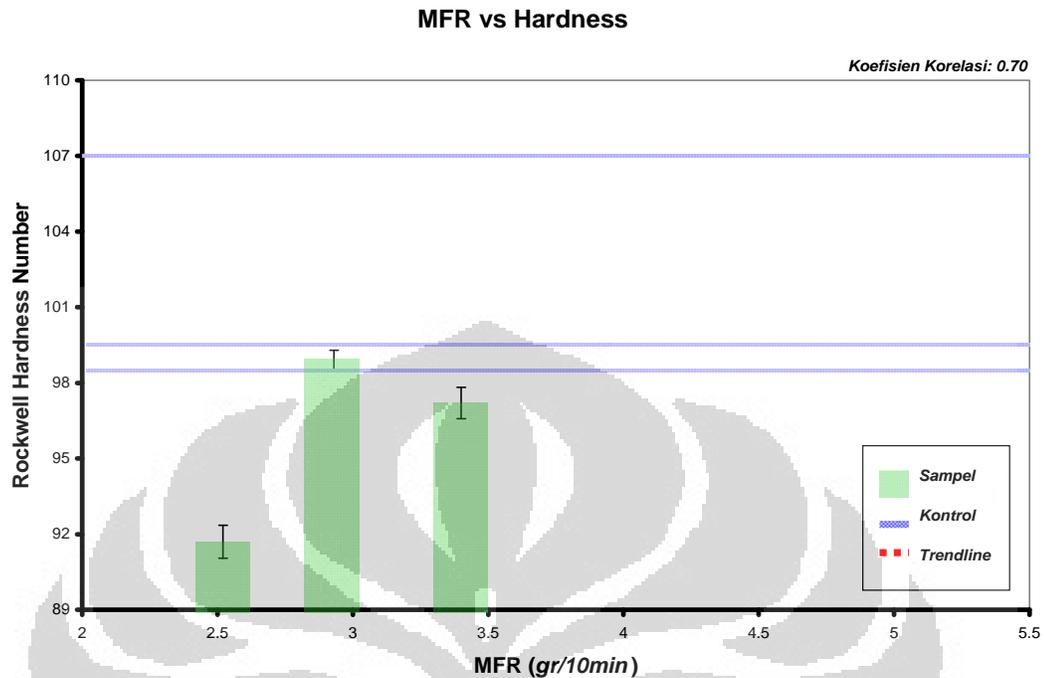
Tabel 4.16 Pengaruh MFR terhadap Kekerasan

| Parameter       | Unit     | Sampel |      |      |      |      |      |
|-----------------|----------|--------|------|------|------|------|------|
|                 |          | 3B1S   | 5B3V | 7B1A | M8   | M9   | P5   |
| MFR             | Gr/10min | 2.52   | 2.93 | 3.4  | 1.82 | 2.3  | 1.7  |
| Kekerasan       | R Scale  | 91.7   | 98.9 | 97.2 | 99.5 | 98.5 | 107  |
| Standar Deviasi |          | 0.07   | 0.14 | 0.19 | 0.21 | 0.07 | 0.14 |

Secara umum, pada Gambar 4.18 semakin tinggi MFR maka kekerasan akan semakin meningkat. Pada skala molekuler, semakin tinggi MFR maka panjang rantai molekul PP akan semakin rendah, sehingga mekanisme *chain molecular entanglement* yang ada juga semakin kecil, atau dengan kata lain, rantai molekul akan semakin mudah tersusun secara teratur (kristalin)<sup>[38,39]</sup>. Karena itu, kekerasan bahan juga meningkat.

Tetapi pada pengujian ini terdapat anomali pada MFR = 2.93 gr/10min. Jika dilihat karakteristik material untuk sampel ini, ditemukan bahwa sampel ini memiliki karakteristik *low site* fraksi ataktik. Walaupun masih masuk dalam spesifikasi, ternyata pada pengujian kekerasan, perbedaan fraksi ataktik yang cukup jauh juga dapat menghasilkan perbedaan perilaku mekanis.

Dengan adanya kondisi fraksi ataktik yang rendah ini, dapat dijelaskan bahwa meningkatnya kekerasan sampel ini dikarenakan kombinasi antara tingginya MFR yang menyebabkan pembentukan struktur kristalin yang kaku<sup>[38]</sup>, serta adanya fraksi ataktik rendah yang menyebabkan kristalinitas material menjadi meningkat<sup>[38,39]</sup>.



Gambar 4.18 Pengaruh MFR terhadap Kekerasan

#### 4.4.b Pengaruh fraksi ataktik terhadap Kekerasan

Hasil pengujian terhadap variasi fraksi ataktik dalam rantai PP disajikan pada Tabel 4.8 dengan koefisien korelasi antara variabel fraksi ataktik dengan kekerasan yaitu -0.98. dan koefisien determinasi ( $r^2$ ) sebesar 95%. Nilai ini menunjukkan bahwa variabel fraksi ataktik sangat berpengaruh terhadap nilai kekerasan material.

Tabel 4.17 Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Kekerasan

| Parameter       | Unit    | Sampel |      |       |      |      |      |
|-----------------|---------|--------|------|-------|------|------|------|
|                 |         | 5B3V   | 7B1A | 0B2V  | M8   | M9   | P5   |
| Fraksi Ataktik  | wt%     | 3.81   | 4.34 | 5.34  | 3.81 | 4.33 | 4.6  |
| Kekerasan       | R scale | 98.9   | 97.2 | 86.76 | 99.5 | 98.5 | 107  |
| Standar Deviasi |         | 0.14   | 0.19 | 0.01  | 0.21 | 0.07 | 0.14 |

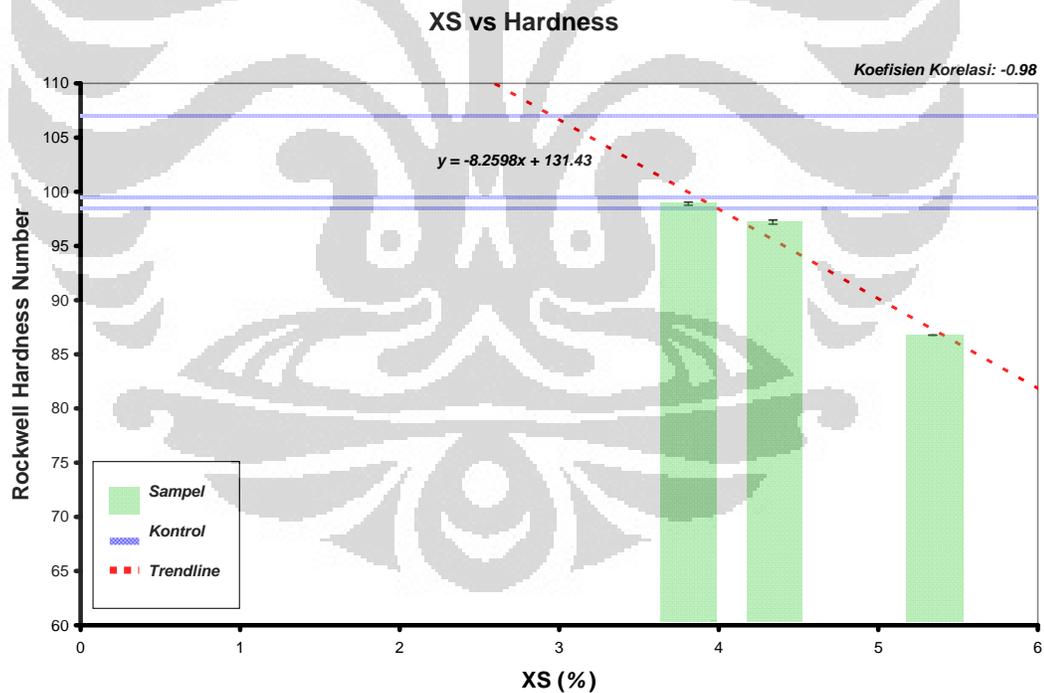
Untuk melihat pengaruh tersebut maka data-data tersebut dipetakan dalam grafik pengaruh kekerasan terhadap kekerasan pada Gambar 4.19. Sehingga

dengan pendekatan statistik *Least Square*, sehingga didapat persamaan garis *trendline* linier:

$$y = -8.2598x + 131.43 \quad (4.9)$$

dari persamaan 4.9 diatas, terlihat bahwa penambahan fraksi ataktik berbanding terbalik dengan kekerasan. Semakin tinggi fraksi ataktik rantai PP, maka kekerasannya akan menurun<sup>[8]</sup>. Secara molekuler, menurunnya kekerasan material akibat peningkatan fraksi ataktik disebabkan karena seiring peningkatan fraksi ataktik pada rantai PP, maka *stereodefekt* atau ketidak-homogenan rantai molekul PP akan meningkat<sup>[28]</sup>. Hal ini menyebabkan interaksi antar rantai molekul yang berdekatan menjadi tidak teratur atau amorf.

Struktur amorf inilah yang menyebabkan turunnya nilai kekerasan. Sebab, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, peningkatan struktur amorf tanpa peningkatan *chain entanglement* akan menyebabkan struktur berperforma ulet<sup>[7,8,26]</sup>.



Gambar 4.19 Pengaruh Fraksi Ataktik terhadap Kekerasan

Kemudian untuk melakukan formulasi empiris, dengan menggunakan persamaan 4.6,

$$y > -8.2598x + 131.43$$

dan menggunakan nilai maksimal kekerasan diantara sampel M8, M9, dan P5 sebagai kontrol dimana,  $y = \text{kekerasan P5} = 107 \text{ R}$  (kontrol superior). Maka nilai fraksi ataktik yang dapat menghasilkan sifat bahan yang superior adalah

$$x = \text{fraksi ataktik (desain)} < 2.96\text{wt}\%$$

Atau dengan kata lain, dapat disimpulkan bahwa untuk menghasilkan performa produk yang baik, desain fraksi ataktik yang optimal yaitu kurang dari 2.96wt% dengan nilai korelasi 95%.

#### 4.4.c Pengaruh Kandungan etilena terhadap Kekerasan

Tabel 4.18 menunjukkan variasi Kandungan Etilena Kopolimer sesuai dengan prosedur pada subbab 3.3.4 terhadap kekerasan. Kemudian jika digunakan persamaan 2.1 dapat diperhitungkan koefisien korelasi antara variabel kandungan etilena kopolimer dengan kekerasan yaitu -0.03. atau dalam persamaan 2.4 didapatkan koefisien determinasi ( $r^2$ ) sebesar 0%. Nilai ini menunjukkan bahwa variabel kandungan etilena kopolimer tidak berpengaruh terhadap nilai kekerasan material.

Tabel 4.18 Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Kekerasan

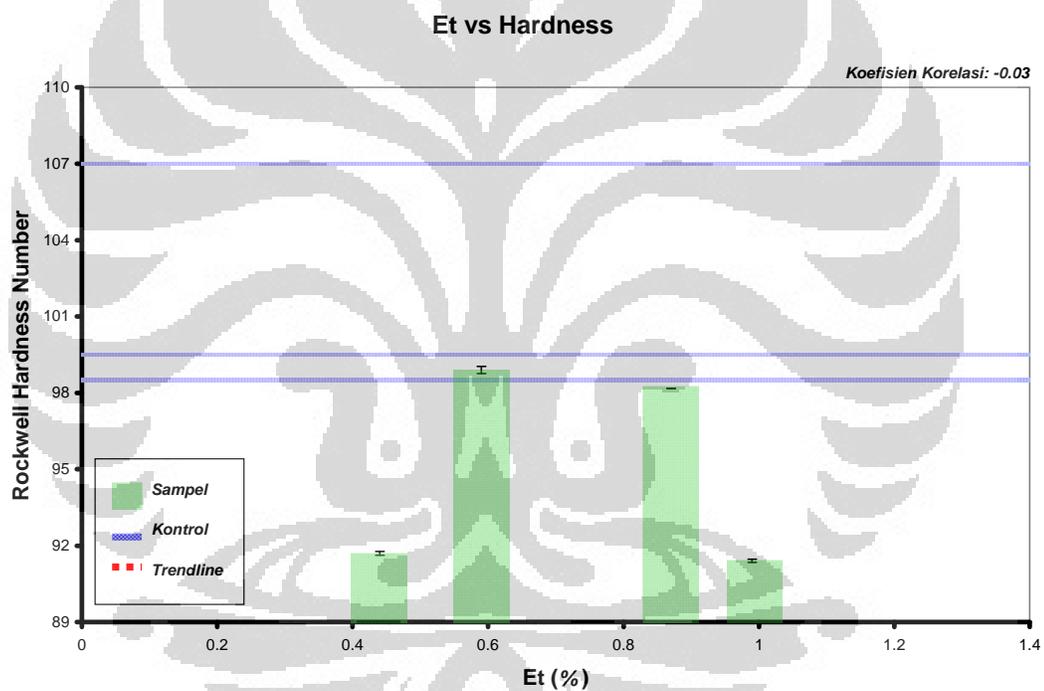
| Parameter         | Unit    | Sampel |      |       |      |      |      |      |
|-------------------|---------|--------|------|-------|------|------|------|------|
|                   |         | 3B1S   | 5B3V | 7B2V  | 4B2V | M8   | M9   | P5   |
| Kandungan Etilena | wt%     | 0.44   | 0.59 | 0.87  | 0.99 | 0    | 0    | 0    |
| Kekerasan         | R scale | 91.7   | 98.9 | 98.18 | 91.4 | 99.5 | 98.5 | 107  |
| Standar Deviasi   |         | 0.07   | 0.14 | 0.06  | 0.00 | 0.21 | 0.07 | 0.14 |

Secara umum, Gambar 4.20 menunjukkan semakin tinggi kandungan Etilena Kopolimer maka kekerasan material akan semakin rendah. Namun hal ini dibiaskan oleh adanya anomali data pada kandungan 0.59wt% dan 0.87%.

Seharusnya penambahan Etilena Kopolimer ini akan meningkatkan ataktisitas atau ketidakteraturan gugus tertier metil pada rantai PP tersebut<sup>[52-54]</sup>, akibatnya maka struktur yang terbentuk cenderung amorf atau sama seperti

sebelumnya, hal ini berarti akan membuat bahan semakin ulet dan ini berarti kekerasannya juga menurun<sup>[55]</sup>.

Namun pada sampel 0.59wt% dan 0.87wt%, penambahan etilena malah menyebabkan meningkatnya kekerasan material. Diperkirakan hal ini merupakan error pada saat preparasi pengujian. Sebab melihat hasil pengujian lainnya, berbeda dengan anomali fraksi ataktik 4.34 wt% atau MFR 2.93 gr/10min yang menunjukkan konsistensi anomali pada beberapa pengujian, pada anomali kandungan etilena ini tidak ditemukan adanya korelasi dengan faktor mekanis lainnya, sehingga diperkirakan hal ini merupakan kesalahan dalam pengujian.



Gambar 4.20 Pengaruh Kandungan Etilena Kopolimer terhadap Kekerasan

#### 4.5 FORMULASI MATERIAL

Setelah dilakukan berbagai simulasi pengujian mekanis terhadap aspek MFR, fraksi ataktik, dan kandungan Etilena Kopolimer, pada tabel 4.19 dibawah ini disajikan matriks korelasi karakteristik material dengan performa fisik yang dihasilkannya.

Tabel 4.19 Matriks korelasi karakteristik material dengan performa fisik

| <i>Parameter</i>               | <i>MFR</i> | <i>Fraksi Ataktik</i> | <i>Kandungan Etilena Kopolimer</i> |
|--------------------------------|------------|-----------------------|------------------------------------|
| <i>Kekuatan Tarik</i>          | 100%       | 84%                   | 82%                                |
| <i>Regangan Tarik</i>          | -          | 88%                   | -                                  |
| <i>Fleksural Modulus</i>       | 85%        | 26%                   | 99%                                |
| <i>Ketahanan Impak Izod</i>    | 97%        | 19%                   | 2%                                 |
| <i>Ketahanan Impak Gardner</i> | 10%        | 10%                   | 43%                                |
| <i>Kekerasan</i>               | 49%        | 95%                   | 0%                                 |

Dari pemetaan diatas, dapat disimpulkan pada tabel 4.20.

Tabel 4.20 Hubungan karakteristik material dengan performa fisik

| <i>Parameter</i>               | <i>Variabel Dominan</i>     | <i>Formulasi Empiris</i> |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| <i>Kekuatan Tarik</i>          | MFR                         | < 2.4 gr/10min           |
| <i>Regangan Tarik</i>          | Fraksi Ataktik              | > 4.02wt%                |
| <i>Fleksural Modulus</i>       | Kandungan Etilena Kopolimer | < 0.82wt%                |
| <i>Ketahanan Impak Izod</i>    | MFR                         | < 2.66 gr/10min          |
| <i>Ketahanan Impak Gardner</i> | Kandungan Etilena Kopolimer | > 1.32wt%                |
| <i>Kekerasan</i>               | Fraksi Ataktik              | < 2.96wt%                |

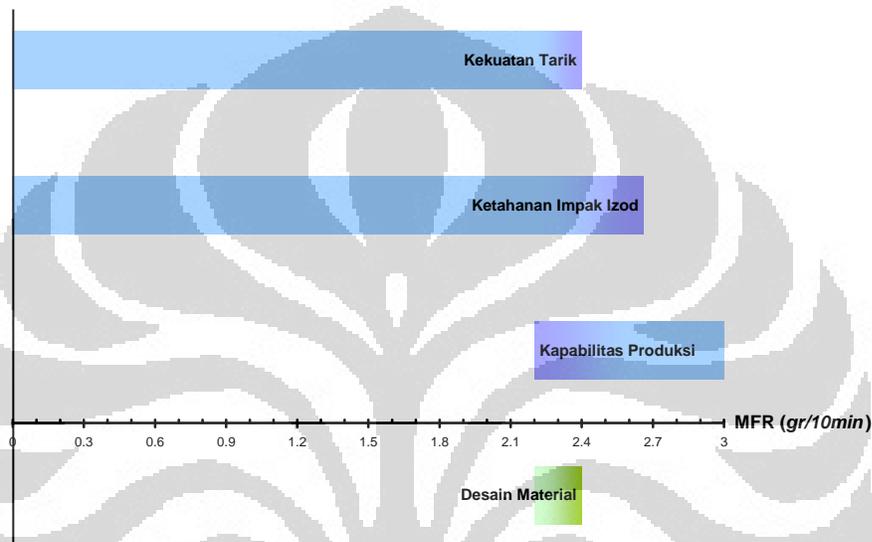
#### 4.5.1 Melt Flow Rate (MFR)

Dari tabel 4.19 dan 4.20 diatas, diketahui bahwa karakteristik material MFR mempengaruhi performa kekuatan tarik dan ketahanan impak Izod. Dari parameter kekuatan tarik, desain MFR yang sesuai adalah kurang dari 2.4 gr/10min, sedangkan dari parameter ketahanan impak Izod, desain yang sesuai adalah kurang dari 2.66 gr/10min.

Kemudian untuk menjawab permasalahan yang telah diungkapkan pada subbab 1.2, maka dengan mempertimbangkan transisi produk yang akan timbul, walaupun dalam aspek MFR, tidak ada permasalahan besar MFR yang dapat diproduksi, tetapi diharapkan MFR hasil formulasi adalah MFR yang mendekati

3.0 gram/10min atau paling tidak lebih tinggi dibanding 2.2 gr/10min yang merupakan batas atas, spesifikasi umum untuk MFR PP *thermoforming* grade.

Karena itu, seperti yang tergambar dalam diagram batang pada Gambar 4.20, desain material yang dapat memenuhi ketiga kriteria tersebut (kekuatan tarik, ketahanan impact Izod, dan kapabilitas proses), yaitu **MFR antara 2.2 hingga 2.4 gr/10min**.



Gambar 4.21 Diagram Batang Formulasi MFR

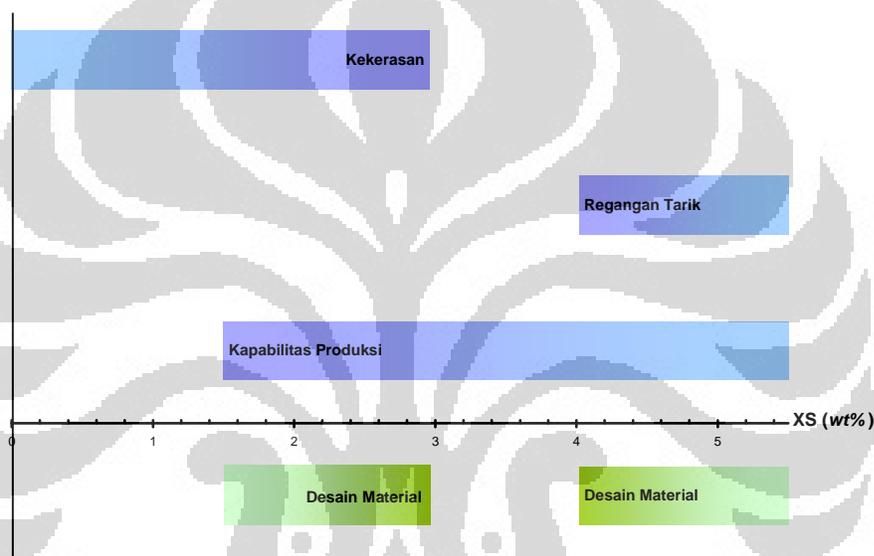
#### 4.5.2 Fraksi Ataktik

Karakteristik material selanjutnya yaitu fraksi ataktik. Dari perhitungan diatas diketahui bahwa fraksi ataktik mempengaruhi performa kekerasan dan regangan tarik dari produk. Dari parameter kekerasan, desain fraksi ataktik yang sesuai adalah kurang dari 0.52 wt%, sedangkan dari parameter regangan tarik, desain yang sesuai adalah lebih dari 4.02 wt%.

Dalam mengatur besar taktisitas, pada produksi PP, parameter yang mempengaruhinya adalah jenis katalis, kokatalis, dan SCA (red. Selective Control Agent). Seperti yang sudah dijelaskan pada Bab 2, rentang fraksi ataktik yang dapat dihasilkan dihasilkan secara komersial dengan sistem katalis terbaru adalah 1.5 wt% hingga 7 wt%. Karena itu, seperti yang tergambar dalam diagram batang pada Gambar 4.21, desain material yang dapat memenuhi ketiga kriteria tersebut

(kekerasan, regangan tarik, dan kapabilitas proses), yaitu fraksi ataktik antara 1.5wt% hingga 2.96 wt% dan/atau lebih dari 4.02 wt%.

Seperti yang sudah dibahas sebelumnya, bahwa MFR desain sebaiknya diturunkan ke 2.4 gr/10min, maka diharapkan bahan tersebut sudah mendapatkan keuletan dari MFR sedang (korelasi 97%). Sehingga untuk mendapatkan sifat kekakuan yang baik yang dipersyaratkan oleh proses *thermoforming* kecepatan tinggi, maka formulasi untuk fraksi ataktik adalah nilai yang serendah-rendahnya atau dengan kata lain **Fraksi Ataktik antara 1.5 hingga 2.96 wt%**.



Gambar 4.22 Diagram Batang Formulasi Fraksi Ataktik

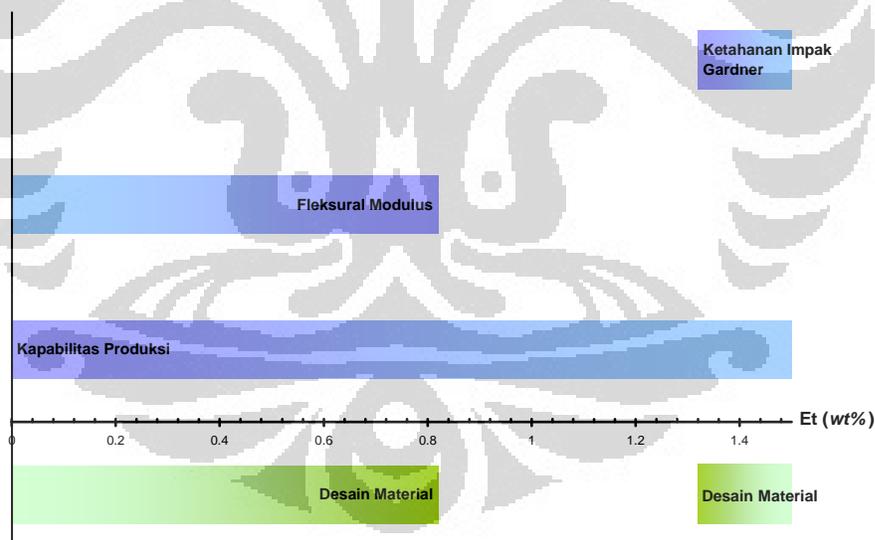
#### 4.5.3 Kandungan Etilena Kopolimer

Kemudian karakteristik material selanjutnya yang hendak diformulasikan yaitu kandungan etilena kopolimer. Dari perhitungan diatas diketahui bahwa kandungan etilena kopolimer mempengaruhi performa ketahanan impak Gardner dan fleksural modulus dari produk. Dari parameter ketahanan impak Gardner, desain kandungan etilena kopolimer yang sesuai adalah lebih dari 1.32wt%, sedangkan dari parameter fleksural modulus, desain yang sesuai adalah kurang dari 0.82wt%.

Kemudian secara teoritis, tidak ada keterbatasan dalam penambahan etilena kopolimer. Namun perlu juga diingat bahwa penambahan etilena

kopolimer ini juga akan menyebabkan perubahan struktur kristal PP akibat peningkatan fraksi ataktik total seperti yang sudah dibahas pada subbab 4.1.1.c. Penggambaran batasan-batasan desain ini digambarkan dalam diagram pada Gambar 4.22.

Dalam menentukan formulasi ini, telah diperhitungkan bahwa desain material yang sesuai adalah dengan MFR antara 2.2 hingga 2.4 gr/10min dan XS antara 1.5 wt% hingga 2.96 wt%. Dari kedua parameter karakteristik tersebut, keduanya sesuai pembahasan sebelumnya, akan menghasilkan performa produk yang bersifat tangguh. Karena secara umum memiliki MFR sedang dan fraksi ataktik yang rendah. Karena itulah, jika pada penambahan etilena ini digunakan spesifikasi lebih dari 1.32 wt%, maka diperkirakan *top load* atau kekakuan produk jauh menurun (dari perhitungan telah diketahui korelasi 99%). Maka dalam formulasi ini diarahkan yaitu ***Kandungan Etilena Kopolimer kurang dari 0.82wt%*** agar produk yang dihasilkan tetap bersifat tangguh (kekakuan dan keuletan yang berimbang).



Gambar 4.23 Diagram Batang Formulasi Kandungan Etilena Kopolimerisasi

#### 4.6 TRIAL APLIKASI THERMOFORMING

Setelah dilakukan formulasi diatas, kemudian disiapkan material dengan spesifikasi seperti yang tercantum pada Tabel 4.21.

Tabel 4.21 Spesifikasi sampel hasil formulasi

| <i>Parameter</i>                            | <i>Satuan</i> | <i>Nilai</i> |
|---|---------------|--------------|
| Kode Variasi Sampel                         |               | 5A2V         |
| <i>Melt Flow Rate (MFR) – 230°C/2.16 kg</i> | gr/10 min     | 2.38         |
| Fraksi Ataktik                              | % wt          | 4.1          |
| Kandungan Etilen Kopolimer                  | % wt          | 0.8          |
| Antioksidan 1                               | Ppm           | 1081         |
| Antioksidan 2                               | Ppm           | 865          |
| <i>Acid Schavenger</i>                      | Ppm           | 529          |

Kemudian dilakukan trial aplikasi dengan mengamati kemampuan proses, tahapan *stacking*, dan juga pengujian *drop test* (1.5m). Hasil dari *trial* tersebut disajikan dalam Tabel 4.22.

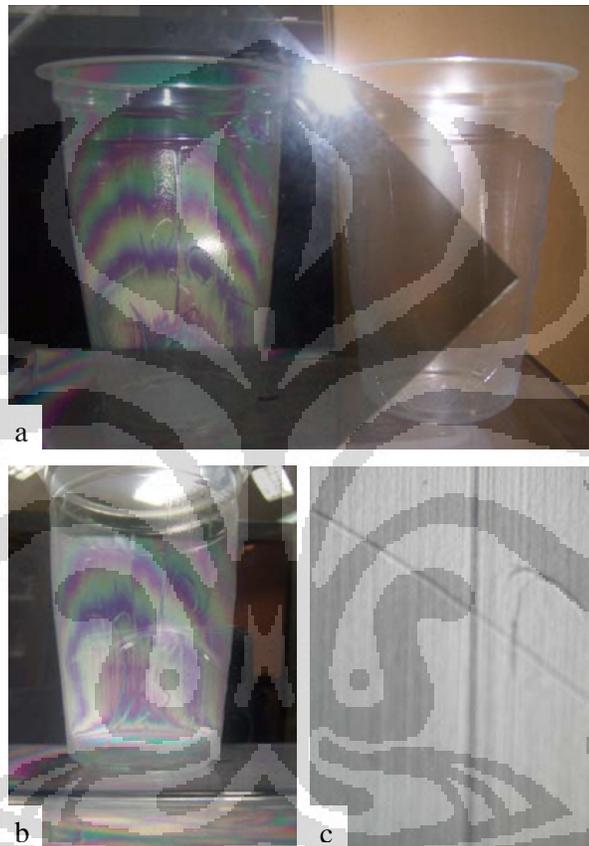
Tabel 4.22 Kesimpulan trial

| <i>Parameter</i>             | <i>Formula Dasar – Variasi 5B3V</i> | <i>Trial Sampel – Variasi 5A2V</i> |
|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| <i>Stabilitas Proses</i>     | OK                                  | OK                                 |
| <i>Proses Stacking</i>       | OK                                  | OK                                 |
| <i>Hasil drop test:</i>      |                                     |                                    |
| <i>Sampel 1</i>              | 9/32 = 28%                          | 3/32 = 9%                          |
| <i>Sampel 2</i>              | 8/32 = 25%                          | 3/32 = 9%                          |
| <i>Sampel 3</i>              | 7/32 = 22%                          | 2/32 = 6%                          |
| <i>Sampel 4</i>              | 8/32 = 25%                          | 1/32 = 3%                          |
| <i>Sampel 5</i>              | 7/32 = 22%                          | 2/32 = 6%                          |
| <i>Rata-rata drop Test</i>   | 24%                                 | 7%                                 |
| <i>Spesifikasi drop test</i> | 5/32 = 16%                          |                                    |

Dari data diatas diketahui, bahwa formulasi tersebut telah dapat memenuhi spesifikasi performa produk. Namun, dari hasil tersebut, sebenarnya masih ada ruang untuk perbaikan (*room for improvement*) lebih lanjut, yaitu dari aspek desain gelas dan cetakan yang digunakan.

Pada Gambar 4.23, adalah perbandingan foto gelas yang menjadi objek *trial* jika dilihat dengan menggunakan kaca polar. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa cup tersebut memiliki goresan-goresan yang menjadi konsentrasi tegangan

pada gelas tersebut. Hal ini terlihat dari adanya pola-pola tegangan sisa yang meruncing<sup>[4]</sup>. Goresan ini diduga berasal dari kondisi *plug-assist* yang sudah tidak baik (terbakar). Namun, karena pada saat pengujian, mesin sedang beroperasi komersial, maka investigasi lebih lanjut mengenai kondisi mesin ini akan dilakukan kemudian.



Gambar 4.24 a. Foto gelas kondisi biasa dan dengan kaca polar; b. Foto goresan (polar); c. Foto goresan (perbesaran 100x)

## BAB 5 KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian mekanis dan analisis statistik yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa kecepatan alir lelehan (*melt flow rate, MFR*) sebagai suatu nilai yang mewakili karakteristik panjang rantai atau berat molekul polipropilena (PP) sangat mempengaruhi kekuatan tarik luluh dan ketahanan impak Izod material tersebut. Hal ini dimungkinkan karena seiring dengan meningkatnya kecepatan alir lelehan (atau menurunnya berat molekul), maka pelibatan rantai (*chain entanglement*) pada material polimer juga menurun, mengakibatkan turunnya kekuatan tarik luluh dan ketahanan impak Izod dari material masing-masing hingga sebesar 100 dan 97 %.

Dari penelitian dapat diketahui pula bahwa fraksi ataktik yang secara umum menggambarkan kondisi kristalinitas dari material PP, mempengaruhi regangan tarik saat luluh dan kekerasan material. Semakin tinggi fraksi ataktik, yang mengakibatkan turunnya kandungan struktur kristalin dari PP, maka semakin turun regangan tarik saat luluh dan kekerasan dari material. Dari hasil perhitungan statistik, diketahui bahwa nilai korelasi fraksi ataktik terhadap regangan tarik saat luluh adalah sebesar 88%, sementara terhadap kekerasan adalah sebesar 95%.

Penelitian juga memberikan informasi penting lainnya, yaitu bahwa kandungan kopolimer etilena mempengaruhi performa modulus fleksural dan ketahanan impak Gardner. Hal ini disebabkan penambahan kopolimer etilena juga akan menurunkan kandungan struktur kristalin dari PP, sebagaimana halnya efek penambahan dengan pengaruh fraksi ataktik, nilai korelasi penambahan kopolimer etilena terhadap modulus fleksural dan ketahanan impak Gardner masing-masing sebesar 99 dan 43%.

Penelitian ini menunjukkan bahwa performa terbaik material PP untuk *thermoforming* cup didapat pada rentang MFR antara 2.2–2.4 gr/10min, fraksi ataktik antara 1.5–2.96 wt%, dan kandungan etilena kopolimer kurang dari 0.82 wt%. Hasil tersebut memenuhi persyaratan uji aplikasi, stabilitas proses, tahapan penyusunan, dan kontrol kualitas produk. Formulasi tersebut dapat ditawarkan sebagai solusi terhadap permasalahan yang dihadapi oleh industri *thermoforming* cup saat ini, berkaitan dengan kecepatan produksi dan pengurangan biaya.

## DAFTAR ACUAN

- [1] <http://www.plasticmag.com/thermoforming.asp?fIssue=Sep/Oct-07&aid=4657>. (27 Februari 2009)
- [2] <http://plastics.turkavkaz.ru/processes/thermoforming/process.htm>. (29 Februari 2009)
- [3] <http://www.gabler-maschinenbau.de/thermoform/en/maschinen/m-line/index.html>. (27 Februari 2009)
- [4] Charles A. Harper, *Handbook of Plastic Processes*, (New Jersey: Wiley, 2006), hal. 291.
- [5] Tim A. Osswald et al, *Material Science of Polymer for Engineers 2nd eds*, (Butterworth-Heinemann: Hanser, 2003), hal 43-87.
- [6] R. J. Crawford, *Plastics Engineering 3<sup>rd</sup> eds*. (Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998). hal. 36.
- [7] Harold Belofsky, *Plastics: Product Design and Process Engineering*, (New York: Hanser, 1995), hal. 56-210.
- [8] Ruben J Hernandez et al, *Plastic Packaging*, (Munich: Hanser, 2000), hal 21-63.
- [9] T. Aoyagi, M. Doib (2000), "Molecular Dynamics Simulation Of Entangled Polymers In Shear Flow", Elsevier Science Ltd, Volume 10, Issues 3-4, June, Pages 317-321.
- [10] A.B. Lugãoa et al (2007), "Review on The Production Process and Uses of Controlled Rheology Polypropylene", Elsevier Ltd, Volume 76, Issues 11-12, November-December, Pages 1688-1690.
- [11] Rajesh H. Somani et al (2006), "Effects of high molecular weight species on shear-induced orientation and crystallization of isotactic polypropylene", Elsevier Ltd, Volume 47, Issue 15, July, Pages 5657-5668.
- [12] Franco Ferrari et al (1999), "Topological Entanglement of Polymers and Chern-Simons Field Theory", J. Phys. A: Math. Gen. 32 1347-1357.
- [13] A.C. Chang et al (2002), "Mechanisms of ductile tear in blown film from blends of polyethylene and high melt strength polypropylene", Elsevier Science Ltd, Polymer 43, 6515-6526.

- [14] Giovanna Machado et al (2009), "*Morphological and crystalline studies of isotactic polypropylene plastically deformed and evaluated by small-angle X-ray scattering, scanning electron microscopy and X-ray diffraction*", Elsevier Ltd, Volume 45, Issue 3, March, Pages 700-713.
- [15] David Harper dan Michael Wolcott (2004), "*Interaction between coupling agent and lubricants in wood-polypropylene composites*", Elsevier Science Ltd, Volume 35, Issue 3, March, Pages 385-394.
- [16] Chixing Zhou et al (2002), "*Isothermal and nonisothermal crystallization kinetics of elastomeric polypropylene*", Elsevier Science Ltd, Polymer Testing 21, 583-589.
- [17] H. B. Chen et al (2002), "*Fracture toughness of  $\alpha$ - and  $\beta$ -phase polypropylene homopolymers and random- and block-copolymers*", Elsevier Science Ltd, Volume 43, Issue 24, November, Pages 6505-6514.
- [18] Feng Zuoa et al (2007), "*The role of interlamellar chain entanglement in deformation-induced structure changes during uniaxial stretching of isotactic polypropylene*", Elsevier Ltd, Volume 48, Issue 23, November, Pages 6867-6880.
- [19] Sujeet K dan Desmon B.J. Lim (2006), "*Effects of normal load on single-pass scratching of polymer surfaces*", Elsevier B.V, Volume 260, Issues 7-8, April, Pages 751-765.
- [20] Atsushi Fujii et al (1987), "*Method for The Preparation of a Crystalline Thermoplastic Resin Sheet*", US Patent No. 4680157, July, hal.3.
- [21] G. Gruenwald, *Thermoforming: A Plastics Processing Guide*, (Pennsylvania: Technomic, 1998), 98
- [22] <http://www.bex.battenfeld.com/en/machinery/film-sheet-extrusion/thermoforming-filmsheet/?PHPSESSID=068ca95d952bc6e39dac4b23f868bc8e>  
(18 Maret 2009)
- [23] <http://teaching.shu.ac.uk/hwb/chemistry/tutorials/molspec/nmr1.htm>.  
(29 Februari 2009)
- [24] Douglas A. Lind et al, *Statistical Techniques in Bussiness and Economics with Global Data Sets, 13th eds*, (Carolina: McGraw-Hill, 2007), hal. 60.
- [25] Hair et al, *Multivariate Data Analysis*, (New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1998), hal. 73.
- [26] Wiliam D. Callister, Jr. *An Intoduction: Materials Science and Engineering*. 6th ed. (Danvers: John Wiley & Sons, 2004), hal 484 - 493.

- [27] Feng Zuo et al (2007), “*The role of interlamellar chain entanglement in deformation-induced structure changes during uniaxial stretching of isotactic polypropylene*”, *Polymer* 48, 6867-6880.
- [28] Claudio De Rosa et al (2007), “*Stress-Induced Phase Transitions in Metallocene-Made Isotactic Polypropylene*”, *Lect. Notes Phys.* 714, 345–371.
- [29] Claudio De Rosa et al (2003), “*Mechanical Properties and Elastic Behavior of High-Molecular-Weight Poorly Syndiotactic Polypropylene*”, *Macromolecules*, 36, 7607-7617.
- [30] F. Jay et al (1999), “*Shear-induced crystallization of polypropylenes: effect of molecular weight*”, *Journal of Materials Science* 34, 2089 – 2102.
- [31] Jason G. Oakley et al (1998), “*Molecular Origins of Nonlinear Viscoelasticity*”, *Mikrochim. Acta* 130, 1-28.
- [32] M. B. Elias et al (2000), “*Thermal and Dynamic-Mechanical Characterization of Uni- and Biaxially Oriented Polypropylene Films*”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 59, 143 – 155.
- [33] Iryna Yakimets et al (2007), “*Model to predict the viscoelastic response of a semi-crystalline polymer under complex cyclic mechanical loading and unloading conditions*”, *Mech Time-Depend Mater* 11: 47–60.
- [34] J. Agde Tjernlund et al (2006), “*An Experimental Investigation of the Relationship between Molecular Structure and Length Scales in Inelastic Deformation of an Amorphous Thermoplastic*”, *Micron- and Nano-Scales*, 143–150.
- [34] Gernot M. Wallner et al (2006), “*Effect of Material Structure and Additives on the Optical Properties of PP Cast Films*”, *Monatshefte für Chemie* 137, 887–897.
- [35] J. J. Janimak et al (2001), “*Inter-relationships between tie-molecule concentrations, molecular characteristics and mechanical properties in metallocene catalysed medium density polyethylenes*”, *Journal of Materials Science* 36, 1879 – 1884.
- [36] Andrzej Pawlak dan Andrzej Galeski (2005), “*Plastic Deformation of Crystalline Polymers: The Role of Cavitation and Crystal Plasticity*”, *Macromolecules*, 38, 9688-9697.
- [37] Yutaka Koike dan Miko Cakmak (2004), “*Atomic Force Microscopy Observations on the Structure Development during Uniaxial Stretching of PP from Partially Molten State: Effect of Isotacticity*”, *Macromolecules*, 37, 2171-2181.

- [38] J. Aurrekoetxea et al (2001), “*Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene*”, *Journal of Materials Science* 36, 2607 – 2613.
- [39] Claudio De Rosa et al (2007), “*Phase Transitions in Isotactic Polypropylene*”, *Lect. Notes Phys.* 714, 345–371.
- [40] R. J. Davies et al (2004), “*The use of synchrotron X-ray scattering coupled with in situ mechanical testing for studying deformation and structural change in isotactic polypropylene*”, *Colloid Polym Sci*, 282: 854–866.
- [41] Claudio De Rosa et al (2005), “*Influence of Chain Microstructure on the Crystallization Kinetics of Metallocene-Made Isotactic Polypropylene*”, *Macromolecules*, 38, 10080-10088.
- [42] Jie Zhang et al (2008), “*Mechanical Property, Thermal Property and Crystal Structure of Isotactic Polypropylene Samples Prepared by Vibration Injection Molding*”, *Polymer Bulletin* 59, 855–864.
- [43] M. Bonnet et al(2001), “*Mechanical and thermal induced chain conformational transformations in syndiotactic polypropylene (sPP)*”, *Journal of Materials Science* 36, 635– 641.
- [44] S. Henning et al (2005), “*Microhardness of a- and b-modified isotactic polypropylene at the initial stages of plastic deformation: analysis of micromechanical processes*”, *Colloid Polym Sci*, 283: 486–495.
- [45] Wei Zeng et al (2005), “*Morphologies of long chain branched isotactic polypropylene crystallized from melt*”, *Colloid Polym Sci*, 284: 322–326.
- [46] Qamer Zia et al (2008), “*Rigid Amorphous Fraction in Isotactic Polypropylene*”, *Macromolecules*, 41, 8095-8102.
- [47] H. Matsumoto et al (2008), “*A study of the chain-folded lamellae structure and its array in the isotactic polypropylene spherulites by HAADF-STEM and HV-TEM Tomography techniques*”, *EMC, Vol. 2: Materials Science*, pp. 775–776.
- [48] Seong Han Kim et al (2002), “*Surface Science Studies of Ziegler-Natta Olefin Polymerization System: Correlations between Polymerization Kinetics, Polymer Structures, and Active Site Structures on Model Catalysts*”, *Korean J Chem. Eng.*, 19(1), 1-10.
- [49] N. K. Bourne dan J. C. F. Millett (2008), “*Tacticity in shocked polymer hydrocarbons*”, *J Mater Sci*, 43:185–189.

- [50] Todd D. Jones et al (2002), "*Effect of Tacticity on Coil Dimensions and Thermodynamic Properties of Polypropylene*", *Macromolecules*, 35, 5061-5068.
- [51] Claudio De Rosa et al (2006), "*A Microscopic Insight into the Deformation Behavior of Semicrystalline Polymers: The Role of Phase Transitions*", *PRL* 96, 167801.
- [52] N. J. L. Van Ruth et al (2006), "*Viscoelastic behaviour during the crystallisation of isotactic polypropylene*", *J Mater Sci*, 41, 3899–3905.
- [53] H. P. Wang et al (2006), "*Amorphous Phase of Propylene/Ethylene Copolymers Characterized by Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy*", *Macromolecules*, 39, 1488 – 1495.
- [54] Bernard A. G. Schrauwen et al (2004), "*Intrinsic Deformation Behavior of Semicrystalline Polymers*", *Macromolecules*, 37, 6069-6078.
- [55] A. R. Kamdar et al (2006), "*Miscibility of Propylene-Ethylene Copolymer Blends*", *Macromolecules*, 39, 1496-1506.
- [56] Jian Li et al (2002), "*Isothermal and nonisothermal crystallization kinetics of elastomeric polypropylene*", Elsevier Science Ltd, *Polymer Testing* 21, 583–589.
- [57] Giovanna Machado et al (2009), "*Morphological and crystalline studies of isotactic polypropylene plastically deformed and evaluated by small-angle X-ray scattering, scanning electron microscopy and X-ray diffraction*", *European Polymer Journal* 45, 700–713.

### LAMPIRAN 1: KARAKTERISASI SAMPEL

| Parameter          | Unit     | 5B3V              | 0B2V             | 7B1A                          | 3B1S    | 4B2V    | 7B2V    | Spesifikasi |
|--------------------|----------|-------------------|------------------|-------------------------------|---------|---------|---------|-------------|
| MF                 | gr/10min | 2.93              | 2.79             | 3.4                           | 2.52    | 3.1     | 3.04    | 2.5 - 3.1   |
| XS                 | %w       | 3.81              | 5.34             | 4.34                          | 4.05    | 4.35    | 4.19    | 3.8 - 4.6   |
| Et                 | %w       | 0.59              | 0.57             | 0.54                          | 0.44    | 0.99    | 0.87    | 0.5 - 0.7   |
| Anti Oksidan 1     | ppm      | 517               | 605              | 1081                          | 738     | 749     | 498     | 300 - 1800  |
| Anti Oksidan 2     | ppm      | 452               | 897              | 1027                          | 686     | 620     | 408     | 300 - 1800  |
| Acid Schavenger    | ppm      | 509               | 543              | 511                           | 386     | 409     | 521     | 100 - 550   |
| Nucleating Agent   | ppm      | Negatif           | Negatif          | Negatif                       | Negatif | Negatif | Negatif | Negatif     |
| MP 1st             | °C       | 159.57            | 158.33           | 159.7                         | 159.66  | 155.8   | 156.06  | 159 - 160   |
| MP 2nd             | °C       | 155.13            | 154.98           | 156.6                         | 156.1   | 153.86  | 153.8   | 153 - 157   |
| CT                 | °C       | 104.93            | 105.3            | 106.5                         | 105.85  | 103.47  | 104.8   | 103 - 107   |
| <b>Keterangan:</b> |          |                   |                  |                               |         |         |         |             |
| MFR                |          | Normal            | Normal           | High                          | Low     | Normal  | Normal  |             |
| XS                 |          | Normal (Low Site) | High             | Normal                        | Normal  | Normal  | Normal  |             |
| Et                 |          | Normal            | Normal           | Normal                        | Low     | High    | High    |             |
|                    |          |                   |                  |                               |         |         |         |             |
| Parameter          | Unit     | M8                | M9               | P5                            |         |         |         |             |
| MF                 | gr/10min | 1.82              | 2.3              | 1.7                           |         |         |         |             |
| XS                 | %w       | 3.81              | 4.33             | 4.6                           |         |         |         |             |
| Et                 | %w       | Negatif           | Negatif          | Negatif                       |         |         |         |             |
| Anti Oksidant 1    | ppm      | 910               | 821              | 1428                          |         |         |         |             |
| Anti Oksidant 2    | ppm      | 760               | 771              | 1228                          |         |         |         |             |
| Acid Schavenger    | ppm      | 671               | 505              | 1100                          |         |         |         |             |
| Nucleating Agent   | ppm      | Negatif           | Negatif          | 389                           |         |         |         |             |
| MP 1st             | °C       | 161.8             | 162.26           | 160.36                        |         |         |         |             |
| MP 2nd             | °C       | 159               | 158.6            | 158.02                        |         |         |         |             |
| CT                 | °C       | 107.14            | 105.95           | 118.26                        |         |         |         |             |
| <b>Keterangan:</b> |          | Kontrol Low MFR   | Kontrol High MFR | Kontrol Low MFR,<br>Nucleated |         |         |         |             |

## LAMPIRAN 2: PENGOLAHAN DATA PENGUJIAN TARIK

| Sampel                | 5B3V              |                    | 0B2V             |                       | 7B1A                       |                    | 3B1S                  |                    | 4B2V             |                    | 7B2V             |                    |
|-----------------------|-------------------|--------------------|------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
|                       | Tensile Strength  | Tensile Elongation | Tensile Strength | Tensile Elongation    | Tensile Strength           | Tensile Elongation | Tensile Strength      | Tensile Elongation | Tensile Strength | Tensile Elongation | Tensile Strength | Tensile Elongation |
|                       | Mpa               | %                  | Mpa              | %                     | Mpa                        | %                  | Mpa                   | %                  | Mpa              | %                  | Mpa              | %                  |
| 1                     | 28.1              | 13                 | 27.3             | 14                    | 27.4                       | 13                 | 28.8                  | 13                 | 28               | 13                 | 27.31            | 13                 |
| 2                     | 28.2              | 13                 | 27.1             | 13                    | 27.4                       | 13                 | 28.4                  | 13                 | 27.9             | 13                 | 28.9             | 13                 |
| 3                     | 28.3              | 13                 | 27.1             | 14                    | 27.4                       | 13                 | 28.6                  | 13                 | 27.9             | 13                 | 27.1             | 13                 |
| 4                     | 28.2              | 13                 | 26.9             | 14                    | 27.3                       | 13                 | 29                    | 13                 | 27.7             | 13                 | 27.4             | 13                 |
| 5                     | 28.2              | 13                 | 27               | 13                    | 27.5                       | 13                 | 29.2                  | 13                 | 27.6             | 13                 | 27.3             | 13                 |
| max                   | 28.3              | 13                 | 27.3             | 14                    | 27.5                       | 13                 | 29.2                  | 13                 | 28               | 13                 | 28.9             | 13                 |
| rata2                 | 28.2              | 13                 | 27.08            | 13.6                  | 27.4                       | 13                 | 28.8                  | 13                 | 27.82            | 13                 | 27.60            | 13                 |
| min                   | 28.1              | 13                 | 26.9             | 13                    | 27.3                       | 13                 | 28.4                  | 13                 | 27.6             | 13                 | 27.1             | 13                 |
| stdev                 | 0.07              | 0.00               | 0.15             | 0.55                  | 0.07                       | 0.00               | 0.32                  | 0.00               | 0.16             | 0.00               | 0.73             | 0.00               |
| Ket.                  |                   |                    |                  |                       |                            |                    |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
| MFR                   | Normal            |                    | Normal           |                       | High                       |                    | Low                   |                    | Normal           |                    | Normal           |                    |
| XS                    | Normal (Low Site) |                    | High             |                       | Normal                     |                    | Normal                |                    | Normal           |                    | Normal           |                    |
| Et                    | Normal            |                    | Normal           |                       | Normal                     |                    | Low                   |                    | High             |                    | High             |                    |
|                       |                   |                    |                  |                       |                            |                    |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
| Sampel                | M8                |                    | M9               |                       | P5                         |                    | Sampel                | MF                 | Strength         | Elongation         |                  |                    |
|                       | Tensile Strength  | Tensile Elongation | Tensile Strength | Tensile Elongation    | Tensile Strength           | Tensile Elongation |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
|                       | Mpa               | %                  | Mpa              | %                     | Mpa                        | %                  |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
| 1                     | 28                | 13                 | 27.8             | 13                    | 29                         | 13                 | 2.52                  | 28.8               | 13               |                    |                  |                    |
| 2                     | 28.3              | 13                 | 27.9             | 13                    | 29.1                       | 13                 | 2.93                  | 28.2               | 13               |                    |                  |                    |
| 3                     | 28.7              | 13                 | 27.6             | 13                    | 28.9                       | 13                 | 3.4                   | 27.4               | 13               |                    |                  |                    |
| 4                     | 28.2              | 13                 | 27.5             | 13                    | 29                         | 13                 |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
| 5                     | 28.3              | 13                 | 28.2             | 13                    | 29                         | 13                 |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
| max                   | 28.7              | 13                 | 28.2             | 13                    | 29.1                       | 13                 |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
| rata2                 | 28.3              | 13                 | 27.8             | 13                    | 29                         | 13                 | rata2                 | 2.950              | 28.133           | 13.000             |                  |                    |
| min                   | 28                | 13                 | 27.5             | 13                    | 28.9                       | 13                 | stdev                 | 0.440              | 0.702            | 0.000              |                  |                    |
| stdev                 | 0.25              | 0.00               | 0.27             | 0.00                  | 0.07                       | 0.00               | correl                | -0.999             | #DIV/0!          |                    |                  |                    |
| Ket.                  | Kontrol Low MFR   |                    | Kontrol High MFR |                       | Kontrol Low MFR, Nucleated |                    | koef. determinasi (%) | 100%               | #DIV/0!          |                    |                  |                    |
|                       |                   |                    |                  |                       |                            |                    | a                     | 32.834             | 13.000           |                    |                  |                    |
|                       |                   |                    |                  |                       |                            |                    | b                     | -1.594             | 0.000            |                    |                  |                    |
|                       |                   |                    |                  |                       |                            |                    |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
| XS                    | Strength          | Elongation         | Et               | Strength              | Elongation                 |                    |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
|                       |                   |                    |                  |                       |                            | 3.81               | 28.2                  | 13                 | 0.44             | 28.8               | 13               |                    |
|                       |                   |                    |                  |                       |                            | 4.34               | 27.4                  | 13                 | 0.59             | 28.2               | 13               |                    |
| 5.34                  | 27.08             | 13.6               | 0.87             | 27.6                  | 13                         |                    |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
| rata2                 | 4.497             | 27.560             | 13.200           | 0.99                  | 27.82                      | 13                 |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
| stdev                 | 0.777             | 0.577              | 0.346            | rata2                 | 0.723                      | 28.105             | 13.000                |                    |                  |                    |                  |                    |
| correl                | -0.914            | 0.940              |                  | stdev                 | 0.252                      | 0.525              | 0.000                 |                    |                  |                    |                  |                    |
| koef. determinasi (%) | 84%               | 88%                |                  | correl                | -0.905                     | #DIV/0!            |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
| a                     | 30.611            | 11.315             |                  | koef. determinasi (%) | 82%                        | #DIV/0!            |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
| b                     | -0.679            | 0.419              |                  | a                     | 29.468                     | 13.000             |                       |                    |                  |                    |                  |                    |
|                       |                   |                    |                  | b                     | -1.886                     | 0.000              |                       |                    |                  |                    |                  |                    |

### LAMPIRAN 3: PENGOLAHAN DATA PENGUJIAN FLEKSURAL

| Sampel       | 5B3V                    | 0B2V                    | 7B1A                       | 3B1S                    | 4B2V                    | 7B2V                    | Sampel                       |                 |
|--------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------|
|              | Flexural Modulus<br>Mpa | Flexural Modulus<br>Mpa | Flexural Modulus<br>Mpa    | Flexural Modulus<br>Mpa | Flexural Modulus<br>Mpa | Flexural Modulus<br>Mpa | MF                           | Flex.Mod        |
| 1            | 1047                    | 955                     | 912                        | 1092                    | 991                     | 1011                    | 2.52                         | 1061            |
| 2            | 1029                    | 970                     | 891                        | 1035                    | 1020                    | 1002                    | 2.93                         | 1047            |
| 3            | 1053                    | 961                     | 941                        | 1065                    | 1016                    | 991                     | 3.4                          | 924             |
| 4            | 1055                    | 987                     | 937                        | 1042                    | 1008                    | 997                     | <b>rata2</b>                 | 2.950           |
| 5            | 1051                    | 955                     | 939                        | 1071                    | 1046                    | 1004                    | <b>stdev</b>                 | 0.440           |
| <b>max</b>   | 1055                    | 987                     | 941                        | 1092                    | 1046                    | 1011                    | <b>koef. determinasi (%)</b> | 85%             |
| <b>rata2</b> | 1047                    | 965.6                   | 924                        | 1061                    | 1016.2                  | 1001                    | <b>a</b>                     | 1477.509        |
| <b>min</b>   | 1029                    | 955                     | 891                        | 1035                    | 991                     | 991                     | <b>b</b>                     | -158.252        |
| <b>stdev</b> | 10.49                   | 13.45                   | 21.89                      | 22.99                   | 20.03                   | 7.52                    |                              |                 |
| <b>Ket.</b>  |                         |                         |                            |                         |                         |                         |                              |                 |
| <b>MFR</b>   | Normal                  | Normal                  | High                       | Low                     | Normal                  | Normal                  | <b>XS</b>                    | <b>Flex.Mod</b> |
| <b>XS</b>    | Normal (Low Site)       | High                    | Normal                     | Normal                  | Normal                  | Normal                  | 3.81                         | 1047            |
| <b>Et</b>    | Normal                  | Normal                  | Normal                     | Low                     | High                    | High                    | 4.34                         | 924             |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | 5.34                         | 965.6           |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>rata2</b>                 | 4.497           |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>stdev</b>                 | 0.777           |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>correl</b>                | -0.50790977     |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>koef. determinasi (%)</b> | 26%             |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>a</b>                     | 1162.781        |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>b</b>                     | -40.900         |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         |                              |                 |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>Et</b>                    | <b>Flex.Mod</b> |
| <b>max</b>   | 1026                    | 1019                    | 1023                       |                         |                         |                         | 0.44                         | 1061            |
| <b>rata2</b> | 1009                    | 1009                    | 1013                       |                         |                         |                         | 0.59                         | 1047            |
| <b>min</b>   | 996                     | 998                     | 995                        |                         |                         |                         | 0.87                         | 1001            |
| <b>stdev</b> | 12.61                   | 9.41                    | 12.14                      |                         |                         |                         | 0.99                         | 991             |
| <b>Ket.</b>  | Kontrol Low MFR         | Kontrol High MFR        | Kontrol Low MFR, Nucleated |                         |                         |                         |                              |                 |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>rata2</b>                 | 0.723           |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>stdev</b>                 | 0.252           |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>correl</b>                | -0.99390948     |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>koef. determinasi (%)</b> | 99%             |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>a</b>                     | 1122.457        |
|              |                         |                         |                            |                         |                         |                         | <b>b</b>                     | -134.889        |

### LAMPIRAN 4: PENGOLAHAN DATA PENGUJIAN IMPAK

| Sampel | 5B3V                             | 0B2V                             | 7B1A                             | 3B1S                             | 4B2V                             | 7B2V                             | Sampel                |             |           |       |
|--------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------|-----------|-------|
|        | Izod Impact Strength<br>J/m      | MF                    | Izod Impact | Gard. Imp |       |
| 1      | 11.5                             | 12.6                             | 8.74                             | 16.1                             | 14.1                             | 14.18                            | 2.52                  | 16.1        | 2.63      |       |
| 2      | 12                               | 11.12                            | 9                                | 15                               | 14                               | 14.67                            | 2.93                  | 11.5        | 2.81      |       |
| 3      | 11.1                             | 13                               | 7.5                              | 17                               | 15.5                             | 13.9                             | 3.4                   | 8.74        | 2.56      |       |
| 4      | 11                               | 15                               | 9.1                              | 16.4                             | 13                               | 13.8                             | rata2                 | 2.960       | 12.113    | 2.667 |
| 5      | 11.6                             | 11.9                             | 9                                | 16.1                             | 13.8                             | 14.3                             | stdev                 | 0.440       | 3.718     | 0.129 |
| 6      | 11.8                             | 12                               | 9.1                              | 15.98                            | 14.22                            | 14.24                            | correl                | -0.983      | -0.309    |       |
| max    | 12                               | 15                               | 9.1                              | 17                               | 15.5                             | 14.67                            | koef. determinasi (%) |             | 97%       | 10%   |
| rata2  | 11.50                            | 12.60                            | 8.74                             | 16.10                            | 14.10                            | 14.18                            | a                     | 36.608      | 2.934     |       |
| min    | 11                               | 11.12                            | 7.5                              | 15                               | 13                               | 13.8                             | b                     | -8.303      | -0.091    |       |
| stdev  | 0.39                             | 1.34                             | 0.62                             | 0.65                             | 0.81                             | 0.31                             |                       |             |           |       |
| Sampel | Gardner Impact Strength<br>kg.cm | XS                    | Izod Impact | Gard. Imp |       |
|        | 2.81                             | 2.69                             | 2.56                             | 2.63                             | 2.81                             | 2.75                             |                       |             |           | 3.81  |
| Ket.   |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  | 4.34                  | 8.74        | 2.56      |       |
| MFR    | Normal                           | Normal                           | High                             | Low                              | Normal                           | Normal                           | 5.34                  | 12.6        | 2.69      |       |
| XS     | Normal (Low Site)                | High                             | Normal                           | Normal                           | Normal                           | Normal                           | rata2                 | 4.497       | 10.947    | 2.687 |
| Et     | Normal                           | Normal                           | Normal                           | Low                              | High                             | High                             | stdev                 | 0.777       | 1.989     | 0.125 |
|        |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  | correl                | 0.440       | -0.319    |       |
|        |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  | koef. determinasi (%) |             | 19%       | 10%   |
|        |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  | a                     | 5.881       | 2.918     |       |
|        |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  | b                     | 1.127       | -0.051    |       |
| Sampel | M8                               | M9                               | P5                               |                                  |                                  |                                  | Et                    | Izod Impact | Gard. Imp |       |
|        | Izod Impact Strength<br>J/m      | Izod Impact Strength<br>J/m      | Izod Impact Strength<br>J/m      |                                  |                                  |                                  |                       |             |           | 0.44  |
| 1      | 9.83                             | 10.25                            | 14.5                             |                                  |                                  |                                  | 0.59                  | 11.5        | 2.81      |       |
| 2      | 9.6                              | 10.43                            | 14.1                             |                                  |                                  |                                  | 0.87                  | 14.18       | 2.75      |       |
| 3      | 10                               | 10.2                             | 14.9                             |                                  |                                  |                                  | 0.99                  | 14.1        | 2.81      |       |
| 4      | 10.1                             | 10.9                             | 13.98                            |                                  |                                  |                                  | rata2                 | 0.723       | 13.970    | 2.750 |
| 5      | 9.4                              | 9.8                              | 15                               |                                  |                                  |                                  | stdev                 | 0.252       | 1.888     | 0.085 |
| 6      | 10.07                            | 9.89                             | 14.5                             |                                  |                                  |                                  | correl                | -0.146      | 0.654     |       |
| max    | 10.1                             | 10.9                             | 15                               |                                  |                                  |                                  | koef. determinasi (%) |             | 2%        | 43%   |
| rata2  | 9.83                             | 10.25                            | 14.50                            |                                  |                                  |                                  | a                     | 14.761      | 2.591     |       |
| min    | 9.4                              | 9.8                              | 13.98                            |                                  |                                  |                                  | b                     | -1.095      | 0.220     |       |
| stdev  | 0.28                             | 0.40                             | 0.41                             |                                  |                                  |                                  |                       |             |           |       |
| Sampel | Gardner Impact Strength<br>kg.cm | Gardner Impact Strength<br>kg.cm | Gardner Impact Strength<br>kg.cm |                                  |                                  |                                  |                       |             |           |       |
|        | 2.75                             | 2.88                             | 2.3                              |                                  |                                  |                                  |                       |             |           |       |
| Ket.   | Kontrol Low MFR                  | Kontrol High MFR                 | Kontrol Low MFR, Nucleated       |                                  |                                  |                                  |                       |             |           |       |

## ANALYSIS REPORT

| PARAMETER          | GARDNER IMPACT |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
|--------------------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|--------------|----|----|----|----|----|----|-----------|----------|--------|-----------|--|
| SAMPLE INDENT      | : 5B3V         |   |   |   |   |   |   |   |   |    | WEIGHT USED  |    |    |    |    |    |    |           |          |        | : 0.25 KG |  |
| DATE/TIME PREPARED |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    | CONDITIONING |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
| DATE/TIME RUN      |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    | ANALYST      |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
| SAMPLE NO.         | 1              | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11           | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18        | 19       | 20     | W x N     |  |
| HEIGHT             |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    |           |          |        | 7.5       |  |
| 7.5                |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    |           |          |        | 7.5       |  |
| 10                 | o              |   | o |   | o |   | o |   | o |    | o            |    | o  |    | o  |    | o  |           | o        | 25     |           |  |
| 12.5               |                | x |   | x |   | x |   | x |   | x  |              | x  |    | x  |    | x  |    | x         |          | 31.25  |           |  |
| 15                 |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
|                    |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    | TOTAL     | 56.25/20 |        |           |  |
|                    |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    | Impact E. | 2.813    |        |           |  |
| SAMPLE INDENT      | : 7B1A         |   |   |   |   |   |   |   |   |    | WEIGHT USED  |    |    |    |    |    |    |           |          |        | : 0.25 KG |  |
| DATE/TIME PREPARED |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    | CONDITIONING |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
| DATE/TIME RUN      |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    | ANALYST      |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
| SAMPLE NO.         | 1              | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11           | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18        | 19       | 20     | W x N     |  |
| HEIGHT             |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    |           |          |        | 7.5       |  |
| 7.5                |                | o |   | o |   |   |   |   |   |    |              | o  |    |    |    |    |    | o         |          |        | 7.5       |  |
| 10                 | x              |   | x |   | o |   | o |   | o |    | x            |    | o  |    | o  |    | x  |           | o        | 25     |           |  |
| 12.5               |                |   |   |   |   | x |   | x |   | x  |              |    |    | x  |    | x  |    |           | x        | 18.75  |           |  |
| 15                 |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
|                    |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    | TOTAL     | 51.25/20 |        |           |  |
|                    |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    | Impact E. | 2.583    |        |           |  |
| SAMPLE INDENT      | : 4B2V         |   |   |   |   |   |   |   |   |    | WEIGHT USED  |    |    |    |    |    |    |           |          |        | : 0.25 KG |  |
| DATE/TIME PREPARED |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    | CONDITIONING |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
| DATE/TIME RUN      |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    | ANALYST      |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
| SAMPLE NO.         | 1              | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11           | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18        | 19       | 20     | W x N     |  |
| HEIGHT             |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    |           |          |        | 7.5       |  |
| 7.5                |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    |           |          |        | 7.5       |  |
| 10                 | o              |   | o |   | o |   | o |   | o |    | o            |    | o  |    | o  |    | o  |           | o        | 25     |           |  |
| 12.5               |                | x |   | x |   | x |   | x |   | x  |              | x  |    | x  |    | x  |    | x         |          | 31.25  |           |  |
| 15                 |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
|                    |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    | TOTAL     | 56.25/20 |        |           |  |
|                    |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    | Impact E. | 2.8125   |        |           |  |
| SAMPLE INDENT      | : 3B1S         |   |   |   |   |   |   |   |   |    | WEIGHT USED  |    |    |    |    |    |    |           |          |        | : 0.25 KG |  |
| DATE/TIME PREPARED |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    | CONDITIONING |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
| DATE/TIME RUN      |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    | ANALYST      |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
| SAMPLE NO.         | 1              | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11           | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18        | 19       | 20     | W x N     |  |
| HEIGHT             |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    |           |          |        | 7.5       |  |
| 7.5                |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    | o            |    |    |    |    |    |    |           |          |        | 5.625     |  |
| 10                 | o              |   | o |   | o |   | x |   | o |    | x            |    | o  |    | o  |    | o  |           | x        | 25     |           |  |
| 12.5               |                | x |   | x |   | x |   |   |   | x  |              |    |    | x  |    | x  |    | x         |          | 21.875 |           |  |
| 15                 |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    |           |          |        |           |  |
|                    |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    | TOTAL     | 52.5/20  |        |           |  |
|                    |                |   |   |   |   |   |   |   |   |    |              |    |    |    |    |    |    | Impact E. | 2.625    |        |           |  |





**LAMPIRAN 6:  
DATA DETAIL PENGUJIAN *DROP-TEST* – 5B3V**

|                        |    |     |    |    |    |    |    |
|------------------------|----|-----|----|----|----|----|----|
| Tanggal : 10 Juni 2009 |    |     |    |    |    |    |    |
| Operator : Sugeng      |    |     |    |    |    |    |    |
| Sampel : A (5B3V)      |    |     |    |    |    |    |    |
| 1                      | 2  | 3   | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 1                      |    |     |    |    |    | 1  |    |
| 9                      | 10 | 11  | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|                        | 1  |     |    | 1  |    |    | 1  |
| 17                     | 18 | 19  | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|                        | 1  |     |    |    |    |    | 1  |
| 25                     | 26 | 27  | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
|                        |    | 1   |    |    | 1  |    |    |
| 1                      | 2  | 3   | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 1                      |    |     |    |    |    |    | 1  |
| 9                      | 10 | 11  | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 1                      |    |     |    | 1  |    | 1  |    |
| 17                     | 18 | 19  | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|                        |    | 1   |    |    |    |    |    |
| 25                     | 26 | 27  | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
|                        |    |     | 1  |    |    |    | 1  |
| 1                      | 2  | 3   | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
|                        |    |     |    | 1  |    |    |    |
| 9                      | 10 | 11  | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|                        | 1  |     | 1  |    |    | 1  |    |
| 17                     | 18 | 19  | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|                        |    | 1   |    |    |    |    |    |
| 25                     | 26 | 27  | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| 1                      |    |     |    |    |    | 1  |    |
| 1                      | 2  | 3   | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
|                        | 1  |     |    | 1  |    |    |    |
| 9                      | 10 | 11  | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|                        |    |     | 1  |    | 1  |    |    |
| 17                     | 18 | 19  | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|                        |    | 1   |    |    |    | 1  |    |
| 25                     | 26 | 27  | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| 1                      |    |     |    |    | 1  |    |    |
| 1                      | 2  | 3   | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
|                        | 1  |     |    |    | 1  |    |    |
| 9                      | 10 | 11  | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|                        |    | 1   |    |    |    |    | 1  |
| 17                     | 18 | 19  | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|                        |    | 1   |    |    |    |    | 1  |
| 25                     | 26 | 27  | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
|                        |    |     |    |    |    | 1  |    |
| <b>Rekapitulasi</b>    |    |     |    |    |    |    |    |
| 1                      | 2  | 3   | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 11                     | 11 |     |    | 11 | 1  | 1  | 1  |
| 9                      | 10 | 11  | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 1                      | 11 | 1   | 11 | 11 | 1  | 11 | 1  |
| 17                     | 18 | 19  | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|                        | 11 | 111 |    |    |    | 1  | 11 |
| 25                     | 26 | 27  | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| 1                      |    | 1   | 1  |    | 11 | 11 |    |

**DATA DETAIL PENGUJIAN DROP-TEST – 5A2V**

|                        |    |    |    |    |    |    |    |
|------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| Tanggal : 10 Juni 2009 |    |    |    |    |    |    |    |
| Operator : Sugeng      |    |    |    |    |    |    |    |
| Sampel : B (5A2V)      |    |    |    |    |    |    |    |
| 1                      | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
|                        | 1  |    |    |    |    | 1  |    |
| 9                      | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 17                     | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|                        |    |    | 1  |    |    |    |    |
| 25                     | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
|                        |    |    |    |    |    |    |    |
| 1                      | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 1                      |    |    |    |    |    |    |    |
| 9                      | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|                        | 1  |    |    | 1  |    |    |    |
| 17                     | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 25                     | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
|                        |    |    |    |    |    |    |    |
| 1                      | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 1                      |    |    |    |    |    |    |    |
| 9                      | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 17                     | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 25                     | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| 1                      |    |    |    |    |    |    |    |
| 9                      | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 17                     | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 1                      |    |    |    |    |    |    |    |
| 25                     | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
|                        |    |    |    |    |    |    |    |
| 1                      | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
|                        |    |    |    |    | 1  |    |    |
| 9                      | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 17                     | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 25                     | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| 1                      |    |    |    |    |    |    |    |
| <b>Rekapitulasi</b>    |    |    |    |    |    |    |    |
| 1                      | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| 11                     | 1  |    |    |    | 1  | 1  |    |
| 9                      | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|                        | 1  |    |    | 1  |    |    |    |
| 17                     | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 1                      |    |    | 1  |    |    |    |    |
| 25                     | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| 11                     |    |    |    |    |    |    |    |