



UNIVERSITAS INDONESIA

STUDI PENGARUH *PLASTICIZER* DIETHYLENE GLYCOL
DIBENZOATE (DEDB) TERHADAP MODULUS ELASTISITAS DARI
PRODUK PVC

SKRIPSI

MICHAEL
0806331733

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

STUDI PENGARUH *PLASTICIZER* DIETHYLENE GLYCOL
DIBENZOATE (DEDB) TERHADAP MODULUS ELASTISITAS DARI
PRODUK PVC

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

MICHAEL
0806331733

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Michael

NPM : 0806331733

Tanda Tangan : 

Tanggal : 2 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Michael
NPM : 0806331683
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi :

STUDI PENGARUH *PLASTICIZER* DIETHYLENE GLYCOL DIBENZOATE (DEDB) TERHADAP MODULUS ELASTISITAS DARI PRODUK PVC


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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. M. Chalid, S.Si., M.Sc. Eng.

()

Penguji 1 : Dra. Sari Katili, MS

()

Penguji 2 : Ir. Sumadi Agustinus

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juni 2012

KATA PENGANTAR

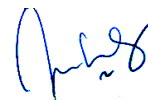
Puji syukur saya panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya saya dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

Dalam proses penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa penulis mendapat dukungan yang sangat berharga dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang telah meridhoi saya untuk menyelesaikan penulisan skripsi ini serta melancarkan segala urusan saya;
2. Kedua orang tua dan keluarga saya yang telah banyak memberikan dukungan materi dan moril kepada saya;
3. Dr. M. Chalid, S.Si., M.Sc. Eng., selaku dosen pembimbing yang telah banyak menyediakan waktu, tenaga dan pemikiran dalam mengarahkan saya dalam melakukan penelitian dan penulisan skripsi ini;
4. Teman-teman mahasiswa dan karyawan Departemen Teknik Metalurgi dan Material UI yang selalu memberikan dukungan dan perhatiannya kepada saya; dan

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian dan penulisan skripsi ini. Saya menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat saya harapkan untuk perbaikan. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 2 Juni 2012



Penulis

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

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

Nama : Michael
NPM : 0806331733
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

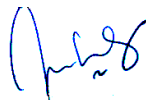
**STUDI PENGARUH *PLASTICIZER* DIETHYLENE GLYCOL
DIBENZOATE (DEDB) TERHADAP MODULUS ELASTISITAS
DARI PRODUK PVC**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan 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 : 2 Juni 2012

Yang menyatakan,



(Michael)

ABSTRAK

Nama : Michael
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul :

Studi Pengaruh *Plasticizer* Diethylene Glycol Dibenzoate (DEDB) Terhadap Modulus Elastitas dari Produk PVC

PVC (*Polyvinyl Chloride*) merupakan salah satu material polimer termoplas yang paling banyak dipakai dan diproduksi di dunia sekarang ini. PVC menempati urutan ketiga dalam jumlah produksi plastik dunia. Produksi PVC diperkirakan akan mencapai 40 juta ton per tahun pada tahun 2016. PVC dapat dimodifikasi sifat-sifat mekanisnya dengan menambahkan aditif pada formulasi campuran PVC. Penelitian ini fokus terhadap proses pencampuran bahan resin PVC dengan material aditif berupa *plasticizer* DOP dan DEDB. Pembahasan utama dalam penelitian ini adalah menganalisis efek penambahan *plasticizer* DOP dan DEDB terhadap modulus elastisitas dan fleksibilitas dari produk PVC. Untuk menganalisis efek tersebut dilakukan pengujian tarik mikro pada sampel dan pengamatan morfologi melintang permukaan patahan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Berdasarkan penelitian ini didapatkan hasil bahwa DEDB merupakan *plasticizer* yang baik untuk menggantikan DOP. Hal ini dapat dilihat dari penurunan nilai modulus elastisitas yang lebih besar dengan menggunakan DEDB. Analisis permukaan patahan dengan SEM menunjukkan bahwa suhu proses pencampuran lelehan panas mempengaruhi tingkat dispersi dan distribusi dari produk polimer.

Kata kunci:

PVC, aditif, *plasticizer*, DOP, DEDB, modulus elastisitas

ABSTRACT

Name : Michael
Study Program : Metallurgy and Material Science Engineering
Title :

Study of Influences of Diethylene Glycol Dibenzoate (DEDB)
Plasticizers Corresponds with the Moduli of Elasticity of PVC
Compounds Products

PVC (Polyvinyl Chloride) is one of the most widely used and produced thermoplast polymer material in the world today. PVC was third in the world plastics production. PVC production is expected to reach 40 million tonnes per year by 2016. PVC can be modified mechanical properties by adding a mixture of additives in PVC compounding formulation. This study focused on the process of mixing of PVC resin material with the additive in the form of DOP plasticizer and DEDB. The main discussion in this study was to analyze the effect of addition of plasticizer DOP and DEDB to the modulus of elasticity and flexibility of PVC products. To analyze the effect of micro tensile testing was conducted on the sample and the observation of fracture surface morphology of the cross section by using Scanning Electron Microscope (SEM). Based on this study showed that DEDB is a good plasticizer to replace DOP. Analysis of fracture surfaces by SEM showed that the temperature of the hot melt mixing process affects the dispersion and distribution of the polymer product.

Keywords:

PVC, additives, plasticizers, DOP, DEDB, modulus of elasticity

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|---|----------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS..... | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN..... | iii |
| KATA PENGANTAR..... | iv |
| HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH..... | v |
| ABSTRAK..... | vi |
| ABSTRACT..... | vii |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR TABEL..... | x |
| DAFTAR GAMBAR..... | xi |
| DAFTAR GRAFIK..... | xii |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xiii |
| BAB 1 PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1. Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2. Perumusan Permasalahan..... | 4 |
| 1.3. Tujuan Penelitian..... | 5 |
| 1.4. Manfaat Penelitian..... | 5 |
| 1.5. Batasan Penelitian..... | 6 |
| 1.6. Sistematika Penulisan..... | 6 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA..... | 8 |
| 2.1. <i>Polyvinyl chloride</i> (PVC)..... | 8 |
| 2.1.1. Morfologi..... | 8 |
| 2.1.2. Sifat Fisika dan Kimia PVC..... | 9 |
| 2.1.3. Produksi PVC..... | 10 |
| 2.1.3.1. Polimerisasi Suspensi..... | 10 |
| 2.1.3.2. Nilai K (Massa Molekular)..... | 12 |
| 2.2. Material Aditif untuk PVC..... | 13 |
| 2.2.1. <i>Plasticizer</i> | 13 |
| 2.2.1.1. <i>Plasticizer</i> internal..... | 13 |
| 2.2.1.2. <i>Plasticizer</i> eksternal..... | 14 |
| 2.2.1.3. Teori dan Mekanisme Kerja <i>plasticizer</i> | 16 |
| 2.2.1.4. Parameter Interaksi..... | 18 |
| 2.2.1.5. DOP..... | 22 |
| 2.2.1.6. DEDB..... | 22 |
| 2.3. Proses Pencampuran PVC dengan material Aditif..... | 23 |
| 2.3.1. Pencampuran Kering..... | 25 |
| 2.3.2. <i>Hot Melt Mixing</i> | 26 |
| 2.3.3. Teori Pencampuran Polimer..... | 27 |
| 2.4. Sifat Viskoelastis pada Plastik..... | 30 |
| 2.5. Pengujian Mekanis pada Material Plastik..... | 32 |

| | |
|---|---------------|
| BAB 3 METODE PENELITIAN..... | 33 |
| 3.1. Diagram Alir..... | 33 |
| 3.2. Bahan dan Peralatan..... | 34 |
| 3.2.1.Peralatan | 34 |
| 3.2.2.Bahan..... | 37 |
| 3.3. Prosedur Penelitian..... | 38 |
| 3.3.1. Variasi Komposisi Campuran..... | 38 |
| 3.3.2. Variasi Suhu Pencampuran Lelehan Panas..... | 39 |
| 3.3.3. Variasi Waktu Pencampuran Lelehan Panas..... | 40 |
| 3.3.4. Proses Pembuatan Sampel..... | 40 |
| 3.3.5. Pengujian Tarik Mikro..... | 42 |
| 3.3.6. Pengamatan Morfologi Patahan Lintang dari Sampel..... | 43 |
| BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN..... | 45 |
| 4.1. Morfologi Penampang Lintang Produk PVC..... | 45 |
| 4.2. Perilaku Mekanis PVC..... | 48 |
| 4.2.1. Pengaruh Variasi Komposisi..... | 48 |
| 4.2.2. Pengaruh Suhu Pencampuran Lelehan Panas..... | 52 |
| 4.2.3. Pengaruh Waktu Pencampuran Lelehan Panas..... | 57 |
| BAB V Kesimpulan..... | 60 |
| 5.1. Kesimpulan..... | 60 |
| Referensi..... | 61 |

DAFTAR TABEL

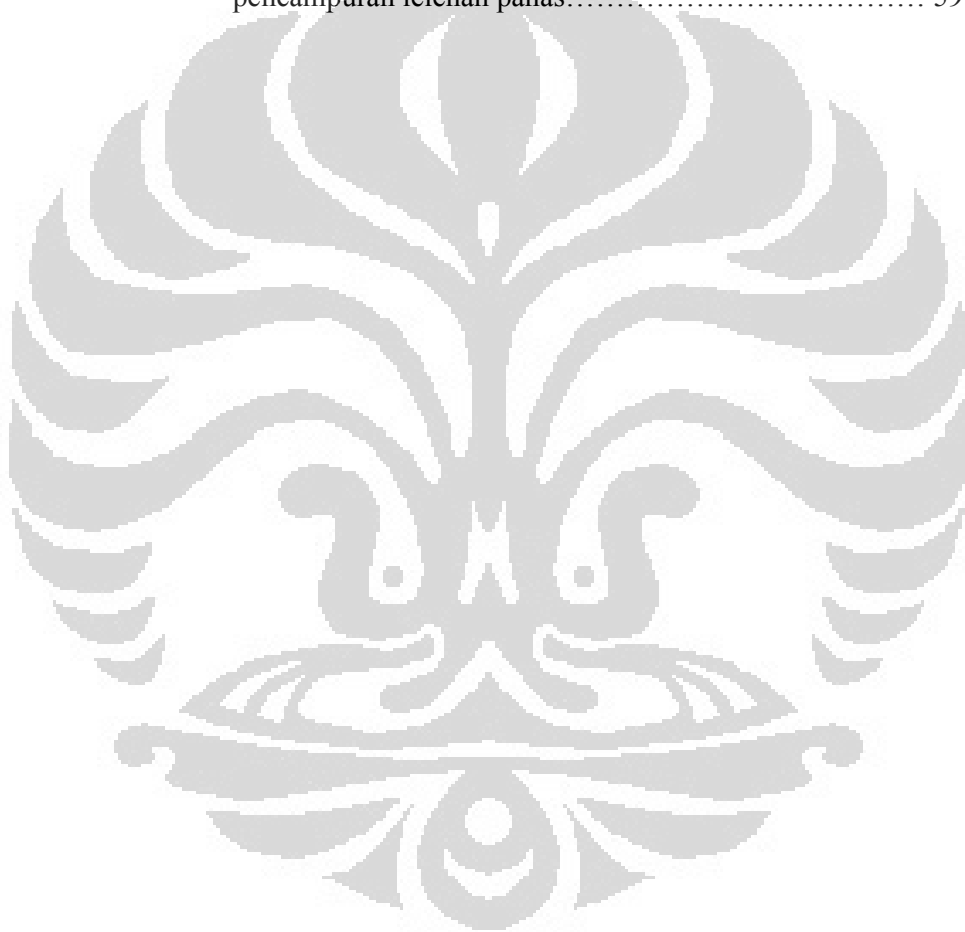
| | Halaman |
|--|---------|
| Tabel 1.1. Sifat-sifat resin PVC..... | 1 |
| Tabel 2.1. Properti dari PVC <i>unplasticized</i> | 9 |
| Tabel 2.2. Properti <i>plasticized</i> PVC 50 phr..... | 9 |
| Tabel 2.3. Komposisi pembuatan PVC dengan metode suspensi..... | 11 |
| Tabel 2.4. Mekanisme polimerisasi pada VCM..... | 12 |
| Tabel 2.5. Jenis-jenis <i>plasticizer</i> yang umum digunakan..... | 15 |
| Tabel 2.6. Jenis-jenis <i>plasticizer</i> sekunder..... | 16 |
| Tabel 2.7. Parameter kelarutan beberapa <i>plasticizer</i> | 19 |
| Tabel 2.8. Kelebihan <i>plasticizer</i> DEDB..... | 23 |
| Tabel 2.9. Tabel perbandingan DOP dan DEDB..... | 23 |
| Tabel 2.10. Komposisi umum untuk membuat PVC fleksibel..... | 24 |
| Tabel 3.1. Komposisi masterbatch PVC | 38 |
| Tabel 3.2. Variasi komposisi..... | 39 |
| Tabel 3.3. Variasi suhu pencampuran lelehan panas | 39 |
| Tabel 3.4. Variasi waktu pencampuran lelehan panas | 40 |
| Tabel 4.1. Komposisi dan variasi suhu sampel SEM..... | 45 |
| Tabel 4.2. Variasi komposisi PVC dalam phr..... | 49 |
| Tabel 4.3. Data hasil pengujian tarik mikro variasi komposisi..... | 50 |
| Tabel 4.4. Variasi suhu pencampuran lelehan panas..... | 53 |
| Tabel 4.5. Data hasil pengujian tarik mikro variasi proses suhu..... | 54 |
| Tabel 4.6. Variasi waktu mixing..... | 57 |
| Tabel 4.7. Data hasil pengujian tarik mikro variasi waktu pencampuran lelehan panas..... | 58 |

DAFTAR GAMBAR

| | | Halaman |
|---------------------|---|---------|
| Gambar 2.1. | Struktur kimia polimer PVC..... | 8 |
| Gambar 2.2. | Diagram alir dari polimerisasi suspensi pada PVC..... | 10 |
| Gambar 2.3. | Tingkat penguapan <i>plasticizer</i> dari PVC fleksibel..... | 21 |
| Gambar 2.4. | Struktur kimia dari di-octylphthalate (DOP)..... | 22 |
| Gambar 2.5. | Struktur kimia diethyleneglycoldibenzoate (DEDB)..... | 22 |
| Gambar 2.6. | Waktu pencampuran kering optimum untuk PVC dengan <i>Plasticizer</i> | 25 |
| Gambar 2.7. | Waktu fusi optimum PVC dengan suhu 93°C dan putaran rotor 63 RPM..... | 26 |
| Gambar 2.8. | Proses pembentukan benang cairan pada pencampuran panas polimer | 28 |
| Gambar 2.9. | Gangguan sinusoidal yang terjadi pada benang cairan silinder..... | 29 |
| Gambar 2.10. | Fenomena pemutusan benang cairan pada campuran polimer..... | 30 |
| Gambar 2.11. | Kelakuan tegangan dan regangan pada material elastis dan viskoelastis pada nilai waktu yang berbeda | 31 |
| Gambar 2.12. | Sifat tarik umum dari U-PVC..... | 32 |
| Gambar 3.1. | Diagram alir eksperimen..... | 33 |
| Gambar 3.2. | Gambar proses awal formulasi sampel..... | 34 |
| Gambar 3.3. | Blender untuk pencampuran kering | 35 |
| Gambar 3.4. | <i>Rheomixer</i> yang dipakai..... | 35 |
| Gambar 3.5. | Contoh alat <i>Hot Pressing</i> | 36 |
| Gambar 3.6. | SEM..... | 37 |
| Gambar 3.7. | Alat Uji Tes Tarik Mikro..... | 37 |
| Gambar 3.8. | Contoh hasil pencampuran kering antara PVC, DOP, DEDB, dan stabilizer..... | 38 |
| Gambar 3.9. | Bentuk cetakan <i>dog bone</i> | 42 |
| Gambar 3.10. | Proses penarikan sampel PVC..... | 43 |
| Gambar 3.11. | Nitrogen cair yang dipakai..... | 43 |
| Gambar 3.12. | Hasil patahan dilapisi platina dengan metode <i>sputtering</i> | 44 |
| Gambar 4.1. | Morfologi permukaan penampang lintang produk PVC proses suhu 120 °C dengan pembesaran 1000x..... | 46 |
| Gambar 4.2. | Morfologi permukaan penampang lintang produk PVC proses suhu 105 °C dengan pembesaran 1000x..... | 47 |

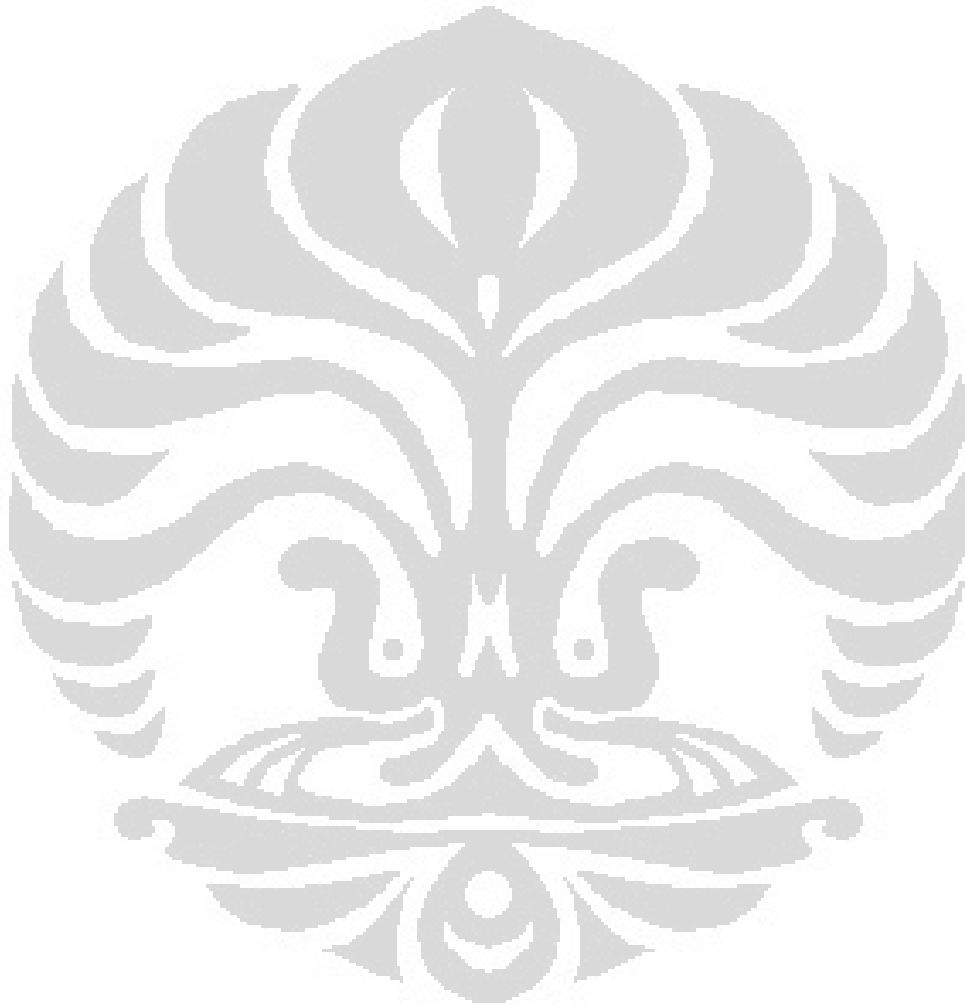
DAFTAR GRAFIK

| | | |
|--------------------|---|----|
| Grafik 4.1. | Tegangan dan regangan variasi komposisi..... | 49 |
| Grafik 4.2. | Hubungan modulus young's dengan komposisi <i>Plasticizer</i> | 51 |
| Grafik 4.3. | Tegangan-regangan variasi suhu pencampuran lelehan panas..... | 53 |
| Grafik 4.4. | Hubungan modulus Young's dengan suhu proses pencampuran lelehan panas..... | 56 |
| Grafik 4.5. | Tegangan-regangan waktu pencampuran lelehan panas... | 57 |
| Grafik 4.6. | Hubungan modulus young's dengan lama waktu pencampuran lelehan panas..... | 59 |



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 ASTM D 1708 – 06A



BAB 1

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

PVC (*Polyvinyl Chloride*) merupakan salah satu material polimer termoplas yang paling banyak dipakai dan diproduksi di dunia sekarang ini. PVC menempati urutan ketiga dalam jumlah produksi plastik dunia setelah PE (*Polyethylene*) dan PP (*Polypropylene*). Produksi PVC diperkirakan akan mencapai 40 juta ton per tahun pada tahun 2016^[1]. Tingkat kebutuhan yang tinggi tersebut sangat terkait dengan keunggulan produk PVC. Material PVC mempunyai keunggulan sebagai berikut^[3]:

- material polimer termoplastik yang menawarkan perbandingan harga dan performa produk yang lebih baik daripada polimer termoplas
- proses pembuatan PVC yang mudah dan kemampuannya untuk didaur ulang
- mempunyai sifat-sifat mekanik dan termal yang baik dan dapat dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan

Berikut ini (tabel 1.1) merupakan sifat-sifat dari resin PVC.

| Sifat | Nilai |
|--------------------------------------|-------------|
| nilai-K | 60-70 |
| penampakan | bubuk putih |
| suhu polimerisasi (°C) | 170 +/- 30 |
| tingkat penguapan (%) | 0.05 |
| kandungan zat lain dalam resin (phr) | <50 |
| massa jenis spesifik resin | 0.44-0.52 |
| massa jenis | 1.3-1.6 |
| kekerasan (shore A,D) | 40 |
| kekuatan tarik (kg/cm ²) | 460 |
| elongasi saat perpatahan (%) | 50 |

Tabel 1.1 Sifat-sifat Resin PVC^[3]

Kemampuan polimer PVC untuk dimodifikasi sifat-sifat mekaniknya sesuai kebutuhan menyebabkan keberagaman aplikasi PVC. Modifikasi dilakukan dengan menambahkan aditif pada formulasi campuran PVC *compounding*. Aplikasi pemakaian PVC antara lain adalah pipa, kabel, kulit imitasi, botol, peralatan rumah tangga, lantai, mainan anak, dan alas kaki^[4].

Berdasarkan sifat akhir produknya, PVC secara umum terbagi atas dua jenis yaitu *unplasticized* PVC dan *plasticized* PVC^[4]. Perbedaan sifat ini dapat terjadi karena perbedaan material aditif yang ditambahkan pada produk PVC. Pada PVC *unplasticized*, tidak ditambahkan aditif berupa *plasticizer* sementara pada formulasi *plasticized* PVC ditambahkan aditif berupa *plasticizer*. Produk PVC tanpa *plasticizer* mempunyai sifat yang keras dan rigid sementara penambahan *plasticizer* pada PVC menghasilkan produk dengan sifat yang lembut dan elastis.

Material aditif adalah bahan kimia yang ditambahkan dalam polimer dengan tujuan memperbaiki sifat polimer dan mempermudah proses produksi^[3]. Berdasarkan tujuan, aditif dapat dikelompokkan sebagai berikut untuk^[2]:

- meningkatkan sifat polimer : *antioxidant, U/V light stabilizer, heat stabilizer, flame retardant, anti static agent*
- mempermudah proses produksi : *processing aid, lubricant, slip agent, anti block agent*
- memodifikasi produk : *plasticizer, blowing agent, nucleating agent*

Dari sekian banyak aditif yang ada, *plasticizer* adalah aditif yang paling banyak digunakan dalam industri polimer. Produksi *plasticizer* dunia mencapai 4,5 juta ton pada tahun 2003^[4]. Dan dari seluruh produksi *plasticizer* di dunia, 90% digunakan sebagai aditif pada PVC^[4].

PVC menggunakan *plasticizer* untuk mengubah sifat dasar *unplasticized* PVC yang rigid dan keras menjadi lebih lembut dan fleksibel. *Plasticizer* yang paling umum digunakan pada PVC adalah dari bahan-bahan kimia yang berbasis *phtalate*. *Phtalate* adalah jenis *plasticizer* yang paling banyak digunakan di dunia. Penggunaan *phtalate* mencapai 87% dari penggunaan *plasticizer* dunia^[6]. *Plasticizer phtalate* yang paling

sering dipakai adalah *di-(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP)* atau biasa disebut *dioctyl phthalate(DOP)* ^[4].

Penggunaan *plasticizer* berbasis *phthalate* (DOP) pada polimer menghasilkan produk PVC (*compounded PVC*) yang memiliki sifat-sifat yang diinginkan sebagai seperti:

- sifat insulasi yang lebih baik, hal ini penting seperti pada aplikasi kabel
- *compounds* yang dihasilkan memiliki tingkat elastisitas yang lebih baik dengan penurunan kekuatan yang tidak begitu signifikan

Akan tetapi penggunaan DOP pada PVC diindikasikan sebagai bahan kimia berbahaya. Sejak tahun 1982 hingga sekarang telah dilakukan banyak penelitian tentang bahaya *plasticizer* berbasis kimia *phthalate* terhadap kesehatan manusia. Hasil penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa *phthalate* berbahaya pada manusia dan menyebabkan mutasi gen pada kromosom sel telur wanita dan kemungkinan kemandulan pada pria. Selain itu, *plasticizer* ini berpotensi mengganggu kesehatan dalam jangka panjang karena *phthalate* bersifat karsinogenik bagi anak-anak ^[1].

Oleh karena isu kesehatan dan isu lingkungan yang muncul, kebutuhan *plasticizer* yang berbasis *non-phthalate* menjadi semakin tinggi. *Plasticizer diethyleneglycoldibenzoate (DEDB)* adalah turunan dari *plasticizer* berbasis *benzoate* yang umum digunakan dan telah banyak digunakan sebagai *plasticizer* alternatif. *Plasticizer* ini mempunyai kelebihan dibandingkan dengan DOP, sebagai berikut ^[6]:

- tidak bersifat karsinogenik dan merugikan kesehatan
- waktu pencampuran dengan polimer yang lebih cepat
- suhu pencampuran panas yang lebih rendah sehingga efisiensi proses produksi meningkat
- kecepatan fusi(pencampuran) yang lebih baik sehingga meningkatkan kapasitas produksi
- jumlah pemakaian *plasticizer* yang lebih sedikit sehingga meningkatkan efisiensi produksi
- kemampuan didaur ulang dan sifat *biodegradeable* dari DEDB

Kelebihan-kelebihan tersebut sangat menarik untuk dikembangkan lebih lanjut sehingga penelitian tentang pengaruh DEDB sebagai *plasticizer* pada PVC *compounding* perlu dilakukan.

1.2 Perumusan Masalah

Plasticizer ini bekerja dengan cara memberikan ruang kosong (*free volume*) pada polimer yang menyebabkan polimer memiliki ruang untuk bergerak sehingga setelah penambahan aditif ini molekul-molekul polimer dapat mempunyai sifat yang lunak dan fleksibel. *Plasticizer* yang paling banyak digunakan dalam pembuatan *plasticized* PVC selama ini adalah *dioctylphthalate* (DOP). DOP juga mempunyai fungsi minor sebagai pelumas (*lubricant*) pada waktu proses pencampuran dan produksi polimer^[6].

Dari sisi kesehatan, pemakaian DOP sebagai *plasticizer* dalam produk polimer seperti produk PVC setelah diteliti lebih lanjut ternyata memiliki dampak yang tidak. *Phthalate* pada DOP telah terbukti berbahaya bagi kesehatan manusia^[1].

Sementara dari sisi produksi, DOP dibuat dengan menggunakan bahan baku dari fraksi ringan minyak bumi. Hal ini menyebabkan harga jualnya tidak stabil terlebih dengan krisis minyak bumi pada saat ini. Hal ini menyebabkan harga produksi produk PVC yang tinggi.

Untuk itu, perlu dicari *plasticizer* untuk menggantikan DOP secara gradual. *Plasticizer* pengganti ini harus mempunyai sifat *plasticizer* yang baik seperti DOP. *Plasticizer* pengganti juga harus bisa mempunyai fungsi minor sebagai pelumas dan mempunyai harga yang relatif lebih murah. Salah satu material yang dapat menggantikan penggunaan *dioctylphthalate* adalah *diethyleneglycoldibenzoate* (DEDB). *Plasticizer* ini menjadi alternatif karena sifatnya yang aman bagi kesehatan. *Plasticizer* ini juga dapat berfungsi sebagai pelumas internal^[6]. Berdasarkan segi ekonomis, harga *plasticizer* DEDB juga lebih murah 30% dengan nilai efisiensi yang lebih tinggi karena suhu pada saat pencampuran lelehan-panas lebih rendah^[10].

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disebutkan sebelumnya, tujuan dilaksanakan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mempelajari kemungkinan untuk menggantikan *plasticizer* DOP dengan DEDB
2. Mempelajari pengaruh *plasticizer* DEDB dan DOP terhadap modulus elastisitas dari PVC dengan pengujian tarik dan pengamatan morfologi produk dengan menggunakan SEM.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah :

1. Bagi industri polimer yang menghasilkan produk PVC

Industri polimer yang berkaitan diharapkan dapat menghasilkan produk PVC yang tidak membahayakan kesehatan dan lebih baik sifat mekaniknya daripada yang sudah ada dengan biaya produksi yang lebih rendah.

2. Bagi peneliti di bidang metalurgi dan material

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dan acuan untuk penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan topik yang serupa maupun dengan topik yang akan dikembangkan lebih lanjut.

1.5 Batasan Penelitian

Dalam menganalisis masalah pada penelitian ini, peneliti membatasi pada hal-hal sebagai berikut :

1. Material polimer yang digunakan dalam penelitian adalah PVC sementara aditif yang ditambahkan berupa DOP dan DEDB

2. Penelitian dilakukan untuk mengetahui pengaruh komposisi dan variasi proses terhadap perubahan modulus elastisitas dari PVC
3. Alat pencampuran yang dipakai adalah *dry mixer* dan *rheomixer (hot melt mixer)*
4. Karakterisasi dan pengujian yang dilakukan berupa pengujian mikro tarik untuk polimer dan juga pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM

1.6 Sistematika Penulisan

Dalam sistematika penulisan ini, peneliti hendak memberikan gambaran umum mengenai apa yang diuraikan dalam masing-masing bab, sehingga isi dari Tugas Akhir ini dapat terlihat dengan jelas tanpa melupakan hubungan antara bab yang satu dengan bab yang lainnya.

Pembahasan dalam lima bab secara ringkas dapat diuraikan sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab ini merupakan pendahuluan yang menjelaskan mengenai latar belakang dibuatnya penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian serta sistematika dari penulisan Tugas Akhir ini.

Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi tentang teori-teori umum yang relevan dengan penelitian sehingga dapat diperoleh pengertian dan pengetahuan yang menunjang analisis permasalahan dalam penelitian ini.

Bab III Metode Penelitian

Bab ini menjelaskan mengenai rancangan penelitian, prosedur pelaksanaan, spesifikasi alat, dan spesifikasi material uji

Bab IV Pembahasan

Bab ini merupakan inti dari penelitian yang berisi data-data yang diperoleh selama penelitian dan pembahasan tentang data yang ada sesuai dengan permasalahan yang ditetapkan dalam penelitian

Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab terakhir ini menguraikan mengenai kesimpulan dari hasil penelitian yang dilakukan dan pemberian saran-saran yang diharapkan akan berguna bagi semua pihak yang memiliki kepentingan serupa terhadap topik penelitian ini.

Bab 2

Tinjauan Pustaka

2.1 PolyVinyl Chloride (PVC)

PVC merupakan polimer sintetik yang dibuat dari monomer vinyl klorida(VCM).



Gambar 2.1 Struktur kimia polimer PVC ^[5]

PVC memiliki harga yang relatif murah dan aplikasi yang sangat luas dan hampir tidak terbatas. Akan tetapi, PVC juga mempunyai kelemahan yaitu tidak stabil pada suhu tinggi ^[5].

2.1.1 Morfologi

Ukuran butir dari PVC sangat beragam dan bergantung pada proses pembuatan dari PVC tersebut. Pada proses pembuatan PVC dengan teknik suspensi dan polimerisasi maka diameter ukuran butir adalah 100-180 μm . Sementara dengan proses emulsi ukuran diameter butir PVC adalah 0.1–3.0 μm . Namun produk PVC akan mempunyai ukuran butir 5–50 μm ^[5]. Keunikan struktur molekul PVC terletak pada atom klorin yang menyebabkan perubahan polaritas pada struktur rantai polimer PVC. Atom klorin akan berikatan dengan atom hidrogen pada atom yang ada di sebelahnya menyebabkan ikatan antar molekul pada rantai-rantai PVC. Ikatan antar molekul ini membentuk suatu struktur menyerupai “jaringan”. Jaringan ini akan dapat dilepaskan kembali apabila PVC dipanaskan kembali. Sedangkan tipe pengulangan rantai atom PVC mempunyai kecenderungan bersifat sindiotaktik menyebabkan material PVC yang amorf memiliki sedikit bagian yang kristalin. Sifat-sifat ini yang menyebabkan PVC memiliki properti kekakuan yang tinggi. Viskositas yang juga masih tinggi pada massa molekular yang cukup rendah dan kemampuan mekanikal yang baik jika diisi dengan aditif seperti

plasticizer. Penambahan *plasticizer* dalam PVC resin ini menyebabkan sifat elastis dan fleksibel yang lebih memperluas aplikasi PVC [5].

2.1.2 Sifat Fisika dan Kimia PVC

| Sifat | Uji | Nilai |
|---|------------------------------|------------------------------------|
| kekuatan tarik pada suhu kamar, MPa | BS 2782:301G ISO R527 | 55 |
| modulus tarik (regangan 1%, 100 detik), GPa | BS 4618 ISO R899 | 2.7 - 3.0 |
| modulus tarik (regangan 1%, 3tahun), GPa | ISO R899 | 1.7 |
| impak Izod, J/m | BS 2782:306A ISO R180 | 107 (tanpa modifikasi) |
| | | 534 (modifikasi) |
| gravitasi spesifik | ISO R1183 | 1.38 - 1.45 |
| koefisien ekspansi linier termal, 1/K | BS 4618:3.1 | $6 \cdot 10^{-5}$ |
| koefisien konduktivitas panas, W/mK | | 0.14 |
| kemampubakaran | ASTM D2863 (Fenimore Martin) | 45 |
| ketahanan terhadap cuaca | | sangat baik (terutama warna putih) |
| ketahanan terhadap asam | | sangat baik |
| temperatur kerja maksimum | pengalaman di lapangan | 60°C |

Tabel 2.1 Properti dari PVC *unplasticized* [15]

PVC jarang sekali digunakan dalam keadaan murninya. Sebelum digunakan, biasanya PVC dicampurkan terlebih dahulu dengan *stabilizer*, pelumas, *plasticizers*, *filler*, dan bahan-bahan aditif lainnya. Bahan aditif ini yang kemudian akan mengubah sifat fisik dan mekanik dari PVC. Pada tabel 2.1 menunjukkan sifat properti mekanik dari PVC yang belum ditambahkan dengan *plasticizer*. Penambahan *plasticizer* mengubah sifat mekanik PVC. *Plasticizer* yang ditambahkan mulai dari 20-100 phr dan tergantung pada kebutuhan aplikasi PVC. Berikut (tabel 2.2) merupakan tabel sifat PVC dengan penambahan *plasticizer* sebanyak 50 phr [15].

| Sifat | Uji | Nilai |
|-------------------------|--------------|-------------|
| gravitasi spesifik | ISO R1183 | 1.19 - 1.68 |
| kekuatan tarik, MPa | BS 2782.320A | 7.5 - 30 |
| elongasi waktu patah, % | BS 2782.320A | 140 - 400 |
| nilai kelembutan | BS 2782 365A | 5 - 100 |

| | | |
|-------------------------------------|------------------------|---------------------|
| suhu patah flekstural | BS 2782 159B | -20 - -60 |
| resistivitas volume pada suhu ruang | BS 2782 202A | $10^{10} - 10^{15}$ |
| ketahanan terhadap penuaan | pengalaman di lapangan | sangat baik |
| ketahanan terhadap ozon | pengalaman di lapangan | sangat baik |

Tabel 2.2 Properti *Plasticized PVC 50 phr* ^[15]

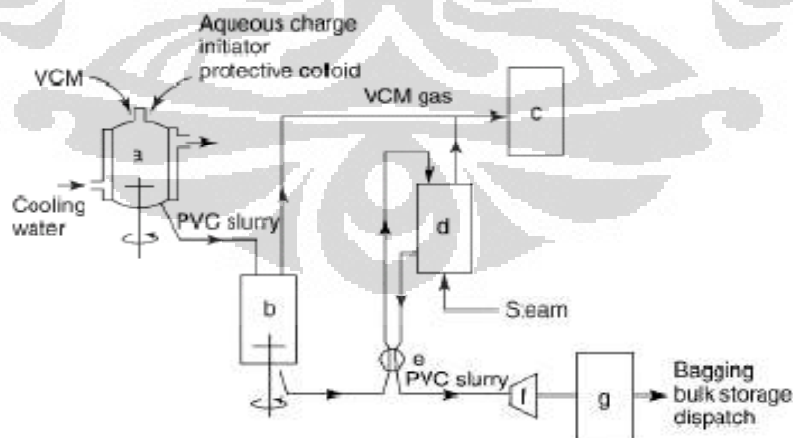
Massa molekular PVC juga akan sangat berpengaruh pada sifat dari polimer tersebut. Tentang *K-value* (massa molekular) akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

PVC memiliki ketahanan terhadap kimia yang baik kecuali dengan pelarut klorin. Karena sifatnya yang tahan secara kimia maka salah satu aplikasi PVC adalah sebagai pipa pada pabrik pembuatan zat kimia.

2.1.3 Produksi PVC

PVC secara umum diproduksi melalui 3 cara yaitu suspensi (80% dari produksi PVC bumi dengan cara ini), emulsi (12%) dan densitas ruah sebanyak 8%. Bagian berikutnya akan menjelaskan tentang polimerisasi suspensi karena sampel bahan dasar pada percobaan ini dibuat melalui polimerisasi suspensi.

2.1.3.1 Polimerisasi Suspensi ^[15]

Gambar 2.2 Diagram alir dari polimerisasi suspensi pada PVC ^[15]

- a. Reaktor
- b. *Blowdown vessel*
- c. Plant untuk Recovery VCM
- d. Kolum *stripping*
- e. Proses pertukaran panas
- f. *Centrifuge*
- g. Pengering

Polimerisasi suspensi dilakukan dengan cara mengaduk VCM cair pada reaktor tekanan tinggi sambil didinginkan terus dari proses eksoterm yang terjadi dari penggabungan VCM. Hasilnya nanti adalah partikel dengan ukuran 30-40 μm . Partikel ini kemudian distabilkan dengan menggunakan *granulating agent*. Zat lain yang tidak kalah penting untuk ditambahkan adalah inisiator pengikat monomer menjadi rantai polimer.

Berikut ini (tabel 2.3) adalah komposisi dalam reaktor yang biasa dipakai untuk proses polimerisasi suspensi.

| bahan | komposisi |
|------------------|-----------------|
| VCM | 100 parts |
| air | 90-130 parts |
| koloid pelindung | 0.05-0.15 parts |
| inisiator | 0.03-0.08 parts |

Tabel 2.3 Komposisi pembuatan PVC dengan metode suspensi ^[15]

Komposisi pembuatan PVC di atas merupakan komposisi dasar dalam pembuatan PVC dengan metode suspensi. Untuk mendapatkan hasil dengan bentuk morfologi yang diinginkan perlu ditambahkan aditif tambahan lagi berupa oksigen, buffer, *granulating agents*, *agent* penambah panjang rantai, komonomers, dan *antioxidants*. Ditambah lagi dengan tingkat agitasi, homogenisasi, dan prosedur waktu penambahan aditif yang tepat.

| Stage | Species | Conversion % | When formed | Size |
|---------------------------------------|---|--------------|---|-----------------|
| Initiation $I_2 + VCM \rightarrow$ | Coiled macroradicals | | | |
| 1st aggregation step | Microdomains (ca 10 macroradicals) | <1 | 10-20 nm | ? |
| 2nd aggregation step | Domains (primary particles) (ca 10 ² microdomains) | 1-2 | 0.1-0.2 μ m | |
| Growth (Intraparticle) | Primary particles | | | 0.6-0.8 μ m |
| 3rd aggregation step | Agglomerates | 4-20 | (primary) now 0.2-1.4 μ m 1-2 μ m | |
| Growth (Interparticle) | Fused agglomerates | 30 | | 2-10 μ m |

From Ref. 13, courtesy of Elsevier Applied Science Publishers.

Tabel 2.4 Mekanisme polimerisasi pada VCM ^[15]

2.1.3.2 Nilai K (Massa Molekular) ^[15]

Secara umum, nilai K didapatkan dari nilai porositas dan densitas ruah polimer. Semakin besar porositas dari polimer dan densitas ruahnya, maka nilai K juga akan semakin besar. Pada aplikasi lebih lanjut dari PVC, produk resin PVC yang mempunyai nilai K lebih besar mempunyai aplikasi pemakaian untuk produk yang lebih fleksibel. Berikut contoh dari aplikasi pemakaian PVC dengan nilai K tertentu ^[15]

1. Aplikasi resin fleksibel(K 70): porositas $\geq 30\%$, densitas ruah $\geq 500\text{g/L}$
2. Aplikasi resin ekstruder(K 66-68): porositas $\geq 20\%$ densitas ruah $\geq 560\text{g/L}$
3. Aplikasi resin botol(K 57-60):porositas $\geq 18-20\%$ densitas ruah $\geq 580\text{g/L}$

2.2 Material Aditif untuk PVC

2.2.1 *Plasticizer*

Polimer dapat dijadikan fleksibel dengan memanfaatkan penambahan *plasticizer* secara internal maupun eksternal. *Plasticizer* bekerja pada material polimer amorf seperti PVC. Polimer amorf mempunyai struktur tidak teratur dan mempunyai suhu temperatur transisi glass (T_g). Pada saat material polimer mencapai suhu T_g , sifat polimer yang rigid berubah menjadi elastis karena ikatan-ikatan antar molekul yang disebabkan ikatan antara klorin dan hidrogen terlepas kembali. *Plasticizer* menurunkan suhu temperatur transisi glass pada PVC.

2.2.1.1 *Plasticizer internal* ^[15]

Plasticizer yang bekerja secara internal dibuat dengan cara kopolimerisasi atau mencangkokkan polimer lain yang mempunyai sifat lebih lentur pada rantai utama polimer. Dengan pencangkokan, antar rantai utama polimer akan memiliki jarak yang lebih renggang sehingga fleksibilitas dapat dicapai. Penggunaan *plasticizer* internal memiliki keuntungan yaitu *plasticizer* tidak mudah bermigrasi keluar dari polimer.

Sudah banyak usaha yang dilakukan untuk membuat PVC yang memakai sistem *plasticizer* internal. Kesulitan yang dihadapi dengan jika ingin memakai sistem ini pada PVC adalah sebagai berikut.

1. Afinitas PVC dengan *plasticizer* yang akan disambung/dicangkok ke PVC tinggi sehingga memerlukan tekanan tinggi agar reaksi bisa berlangsung
2. Karena biasanya PVC yang dipakai sudah dalam bentuk tercampur dengan aditif lain dan tidak murni, hal ini menyebabkan kontaminasi yang menyebabkan proses plastisasi internal sulit berlangsung
3. Reaksinya kimianya sulit dan kompleks serta memerlukan waktu kerja yang panjang sehingga menambah biaya produksi

2.2.1.2 *Plasticizer* Eksternal ^[15]

Plasticizer eksternal dipakai dengan cara menambahkan bahan *plasticizer* pada saat pencampuran kering polimer yang kemudian akan dilanjutkan dengan mixing dan pencairan polimer. *Plasticizer* agent ini kemudian akan bercampur di dalam polimer meningkatkan kelembutan dan kemampuan elongasi dari polimer.

Secara umum *plasticizer* harus memiliki sifat tidak mudah menguap, tidak mudah bermigrasi dari polimer, tidak mahal, tidak beracun, dan cocok dengan polimer yang akan diplastisasi. *Plasticizer* sendiri dapat dibagi menjadi dua yaitu *plasticizer* primer dan sekunder. *Plasticizer* primer ditambahkan dengan tujuan utama memberikan sifat lentur pada polimer dan memiliki kecocokan yang tinggi dengan polimer tersebut. *Plasticizer* sekunder biasanya tidak memiliki kompatibilitas dengan polimer sebaik *plasticizer* primer. Penambahan *plasticizer* sekunder saja juga tidak akan menambahkan sifat elongasi dan kelembutan polimer. *Plasticizer* sekunder bisa ditambahkan untuk meningkatkan kemampuan *plasticizer* utama dan meningkatkan performa polimer seperti ketahanan terhadap api dan sebagai pelumas tambahan. *Plasticizer* sekunder juga biasa ditambahkan untuk dapat mengurangi biaya produksi dari polimer jika dengan hanya menggunakan *plasticizer* primer. *Plasticizer* sekunder biasa juga dapat disebut sebagai ekstender.

| Plasticizers | Carbon chain | Molecular weight | Vapor pressure, Pa ^a (mm Hg @ 200°C) | Specific gravity 25° / 25°C | Viscosity, mPa.s/cP@25°C |
|--|-----------------|------------------|---|-----------------------------|--------------------------|
| Dinormalhexyl phthalate (DnHP) | 16 ^b | 335 | 400 | 1.008 | 30 |
| Diisoheptyl phthalate (DIHP) | 7 | 362 | 280 | 0.983 | 30 |
| Diheptyl phthalate (DnHP) | 17 | 362 | 253 | 0.983 | 30 |
| Di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) | 8 | 391 | 173 | 0.982 | 58 |
| Diheptylnonyl phthalate (DnHNP) | 17, 19 | 398 | 147 | 0.978 | 49 |
| Dinormaloctyldecyl phthalate (DNODP) | 16, 18, 110 | 401 | 80 | 0.965 | 34 |
| Diheptylnonylundecyl phthalate (DnHNUP) | 17, 19, 111 | 414 | 107 | 0.969 | 41 |
| Diisononyl phthalate (DINP) | 9 | 418 | 67 | 0.970 | 72 |
| Dinonyl phthalate (DNP) | 9 | 418 | 57 | 0.971 | 80 |
| Dinormalnonyl phthalate (DnNP) | 19 | 418 | 43 | 0.967 | 39 |
| Diisodecyl phthalate (DIDP) | 10 | 447 | 47 | 0.964 | 88 |
| Dinormalnonyldecylundecyl phthalate (DnNDUP) | 19, 110, 111 | 450 | 40 | 0.958 | 48 |
| Dinonylundecyl phthalate (DnNUP) | 19, 111 | 458 | 40 | 0.954 | 50 |
| Diundecyl phthalate (DUP) | 111 | 475 | 80 | 0.952 | 54 |
| Diisonundecylodecyl phthalate (DUDP) | 11, 12 | 502 | 20 | 0.955 | 185 |
| Ditridecyl phthalate (DTDP) | 13 | 530 | 11 | 0.951 | 160 |
| Di(2-ethylhexyl) teraphthalate (DOTP) | 8 | 391 | 160 | 0.981 | 63 |
| Butylbenzyl phthalate (BBP) | 4, 7 | 312 | 253 | 1.119 | 42 |
| Diheptylnonyl adipate (DrHNA) | 17, 19 | 370 | 440 | 0.920 | 12 |
| Di(2-ethylhexyl) adipate (DEHA) | 8 | 370 | 307 | 0.924 | 14 |
| Diisononyl adipate (DINA) | 9 | 398 | 227 | 0.924 | 2.0 |
| Diisodecyl adipate (DIDA) | 10 | 426 | 77 | 0.916 | 25 |
| Triheptylnonyl trimellitate (TnHNTM) | 17, 19 | 530 | 16 | 0.984 | 105 |
| Tri(2-ethylhexyl) trimellitate (TOTM) | 8 | 530 | 21 | 0.987 | 220 |
| Triisononyl trimellitate (TINTM) | 9 | 589 | 13 | 0.975 | 315 |
| Di(2-ethylhexyl) sebacate (DOS) | 8 | 426 | 131 | 0.911 | 25 |
| Di(2-ethylhexyl) azelate (DOZ) | 8 | 412 | 147 | 0.914 | 15 |

^aTo convert Pa to mm Hg, divided by 133.3.

^b is linear.

Tabel 2.5 Jenis-jenis *plasticizer* yang umum digunakan ^[15]

| Dicarboxylic acid | Diol | Viscosity | Properties and applications |
|-------------------|--|---|---|
| Adipic acid | 1,2-Propane diol, 1,3-propane diol, 1,3-butane diol, 1,4-butane diol, 1,6-hexane diol, neopentyl glycol | High, >10,000 mPa·s (cP); medium, 4000–8000 mPa·s (cP) | High resistance to gasoline, oils, fats, and bitumen; migration-resistant; tubing, films, cable insulation, and jacketing |
| | | Low, <4000 mPa·s (cP) | Oil and fat resistance markedly less satisfactory; for spread coating alone or in combination with high viscosity esters; other uses as above |
| Azelaic acid | 1,2-Propane diol, 1,3-propane diol, 1,3-butane diol, 1,4-butane diol, 1,5-pentane diol, 1,6-hexane diol | High, >10,000 mPa·s (cP) | High oil, gasoline, and fat resistance; adhesive tapes; other uses as for polysebacates |
| | | Medium, 4000 to 8000 mPa·s (cP) | Easily processible; good compatibility; generally applicable polyester plasticizers |
| o-Phthalic acid | Ethylene glycol, 1,2-Propane diol, 1,3-Propane diol, 1,3-Butane diol, 1,4-Butane diol | Low, <4000 mPa·s (cP) | Easily processible; poor resistance to oils, fats, gasoline; reduced flexibility at low temperature |
| | | <2000 mPa·s (cP) | Easy processing; for special applications |
| Sebacic acid | Ethylene glycol, 1,3-Propane diol, 1,3-Butane diol, 1,4-Butane diol, Neopentyl glycol | High, >10,000 mPa·s (cP) | Good resistance to gasoline, oil, fat, uv light; highly migration-resistant; good electrical properties; for high quality articles |
| | | Medium, 4000–8000 mPa·s (cP) | Good compatibility with PVC, easily processible; for spread coating; protective clothing |

Tabel 2.6 Jenis-jenis *plasticizer* sekunder ^[15]

Sementara definisi yang diberikan ASTM D-883 tentang *plasticizer* adalah sebagai berikut. *Plasticizer* adalah material yang ditambahkan ke dalam plastik untuk meningkatkan kemampuan untuk dibentuk dan fleksibilitas. Penambahan *plasticizer* juga memiliki efek menurunkan viskositas cair polimer, modulus elastisitas, dan temperatur transisi glass (T_g) ^[15].

2.2.1.3 Teori dan Mekanisme Kerja *Plasticizer*

Teori dan mekanisme kerja *plasticizer* didasarkan atas asumsi bahwa kekerasan pada polimer PVC muncul dari interaksi intermolekul melalui atom klorin dengan hidrogen pada molekul yang lain. Oleh karena banyaknya interaksi tersebut, sehingga struktur dari PVC menyerupai jaringan (*rigid network*). Kondisi ini yang menyebabkan PVC cenderung memiliki sifat yang rigid.

Untuk membuat polimer tersebut menjadi elastis perlu penambahan plasticizer pada PVC *compounding*. Beberapa teori di bawah ini akan menjelaskan tentang kemampuan *plasticizer* untuk membuat polimer menjadi elastis. Dari teori-teori yang ada ini, ada yang memasukkan analisis parameter-parameter seperti polaritas, solubilitas, interaksi antar atom, dan termodinamika dari interaksi yang terjadi antar polimer dan *plasticizer*. Tetapi ada juga yang menganggap pencampuran antara polimer dengan *plasticizer* secara simpel hanyalah pelumasan yang terjadi pada ruang antar rantai polimer. Semua aspek teori ini penting untuk dikaji jika ingin mengerti secara menyeluruh tentang konsep plastisasi.

Teori Pelumasan ^[3]

Pada saat pemanasan, ikatan friksi intermolekul pada rantai polimer ini melemah membuat *plasticizer* dapat melumasi rantai-rantai yang tadinya berikatan dan memiliki friksi. Sehingga pada saat pendinginan, rantai polimer sudah memiliki lapisan tipis *plasticizer* yang melindungi rantai-rantai polimer dari friksi dan terbentuknya lagi *rigid network*. Teori ini menjelaskan tentang *plasticizer* juga memiliki aplikasi lain sebagai pelumas internal.

Teori Gel ^[3]

Teori Gel merupakan pengembangan lebih lanjut dari teori pelumasan. Pada teori ini, *plasticizer* yang dipakai menghancurkan ikatan resin pada dan membentuk fasa gel dari polimer. Polimer dianggap mempunyai ikatan yang berbentuk tiga dimensi pada jaringan rantai-rantai polimer. *Plasticizer* akan masuk ke tengah-tengah jaringan tiga dimensi tersebut menyebabkan ikatan jaringan dan antar rantai jadi melemah. Ikatan yang melemah ini membentuk fasa gel. Fasa gel ini dapat menyebabkan *plasticizer* yang ada di antara rantai polimer untuk lebih *mobile* karena adanya jarak antar rantai polimer yang lebih luas. Hal ini yang mengakibatkan fleksibilitas pada polimer dapat tercapai.

Teori Free-volum ^[3]

Teori *free-volum* merupakan pengembangan lebih lanjut dari kedua teori yang ada sebelumnya. Teori ini yang kemudian dapat menjelaskan plastisasi internal maupun

eksternal. *Free-volum* adalah suatu ukuran yang diberikan untuk memperhitungkan jarak antara kedua rantai polimer. Jarak ini yang kemudian menentukan kemampuan rantai polimer untuk bergerak, hal ini yang berpengaruh besar terhadap tingkat fleksibilitas material. Penambahan *plasticizer* menyebabkan *free-volum* pada resin dapat bertambah besar dan memastikan *free-volum* ini tetap ada di dalam material setelah material dicairkan kemudian didinginkan kembali menjadi produk. *Plasticizer* mencegah interaksi antar rantai-rantai yang bersebelahan. *Free-volum* juga akan dapat bertambah dengan gerakan atom-atom pada ujung-ujung rantai polimer, cabang dari rantai polimer, ataupun rantai utama polimer itu sendiri. Hal ini secara tidak langsung juga menjelaskan proses terjadinya plastisasi internal dengan metode adisi ataupun pencangkakan. Rantai yang ditambahkan atau dicangkakan pada rantai utama polimer bertindak sebagai molekul kecil yang bergerak sehingga menambahkan *free-volum* pada polimer. Penambahan *plasticizer* yang memiliki berat molekul yang lebih ringan dari polimer juga berpengaruh besar pada besar *free-volum*. Hal ini dikarenakan ruang kosong yang ada menjadi lebih besar lagi karena berat molekul yang lebih kecil.

Teori Termodinamik dan Mekanik ^[3]

Pengamatan migrasi *plasticizer* keluar dari polimer menunjukkan bahwa *plasticizer* tidak secara permanen berikatan dengan polimer, akan tetapi lebih pada kesetimbangan dinamis antara polimer dan *plasticizer*. *Plasticizer* dapat dipaksa masuk ke dalam polimer jika diberikan gaya yang cukup. Apabila polimer telah menjadi produk dan gaya yang dipakai untuk membuat *plasticizer* berikatan pada polimer dihilangkan maka *plasticizer* sedikit demi sedikit akan mengalami migrasi keluar karena ikatan yang terjadi tidak permanen.

2.2.1.4 Parameter Interaksi

Kompatibilitas adalah tingkat kemampuan polimer dan *plasticizer* untuk bercampur tanpa menyebabkan terjadinya fasa baru. Faktor yang mempengaruhi kompatibilitas ini dapat dijelaskan dalam bentuk parameter interaksi

Parameter solubilitas Hildebrand ^[15]

Cara paling mudah untuk melihat kompatibilitas antar polimer dan *plasticizer* adalah dengan memperhatikan parameter solubilitas (kelarutan). Parameter solubilitas Hildebrand dapat diperhitungkan dengan membagi konstanta aditif (F) dengan molar volume dari polimer (V), seperti yang dinyatakan dalam persamaan 2.1 .

$$\delta = \Sigma F/V \quad (2.1)$$

Parameter kelarutan dapat digunakan untuk mengecek kecocokan interaksi (kompatibilitas) antara polimer dengan *plasticizer* yang digunakan. *Plasticizer* dengan parameter solubilitas yang mirip atau sama dengan material polimer yang akan dipakai akan memiliki tingkat kompatibilitas yang tinggi dibandingkan dengan *plasticizer* yang memiliki parameter solubilitas yang berbeda dengan polimernya. Contoh parameter kelarutan PVC (9.66) mirip dengan parameter kelarutan dari DOP (8.95) sehingga DOP merupakan *plasticizer* yang cocok untuk PVC.

| <i>Plasticizer</i> | Solubilitas parameter (H) |
|--------------------------------------|---------------------------|
| minyak parafin | 7.5 |
| dioctyl phthalate | 7.9 |
| dibutoxyethyl phthalate | 8 |
| tricrescyl phosphate | 8.4 |
| dioctyl sebacate | 8.6 |
| triphenyl phosphate | 8.6 |
| chlorinated biphenyl (arochlor 1248) | 8.8 |
| dihexyl phthalate | 8.9 |
| hydrogenated terphenyl (HB-40) | 9 |
| dibutyl sebacate | 9.2 |
| dibutyl phthalate | 9.3 |
| dipropyl phtalate | 9.7 |
| diethyl phtalate | 10 |
| dimethyl phtalate | 10.7 |
| santicizer 8 | 11.9 |
| glycerol | 16.5 |

Tabel 2.7 Parameter kelarutan dari beberapa *plasticizer* ^[15]

Parameter Polaritas ^[3]

Parameter ini menjelaskan hubungan antara aktivitas *plasticizer* untuk *plasticizer* non-polimer. Parameter ini dihitung dengan cara:

$$\Phi = [M(A_p/P_o)]/1000 \quad (2.2)$$

M = massa molar *plasticizer*

A_p = jumlah atom C pada *plasticizer* tidak termasuk dengan atom C pada gugus aromatik dan karboksil

P_o = Jumlah dari karbonil polar pada *plasticizer*

Faktor 1000 dipakai agar angka yang dihasilkan lebih mudah ditulis. Parameter ini memberikan perkiraan keaktifan yang tepat untuk *plasticizer* dalam bentuk monomer.

Temperatur Transisi Solid-Gel ^[5]

Temperatur transisi solid-gel adalah temperatur saat satu butir PVC larut pada *plasticizer* berlebih yang dipakai. Makin efisien tingkat pelarutan *plasticizer* itu terhadap resin PVC maka nilai temperatur transisi solid-gel akan semakin rendah. Hal ini menyebabkan proses mixing tidak memerlukan suhu yang tinggi sehingga dapat menekan biaya produksi.

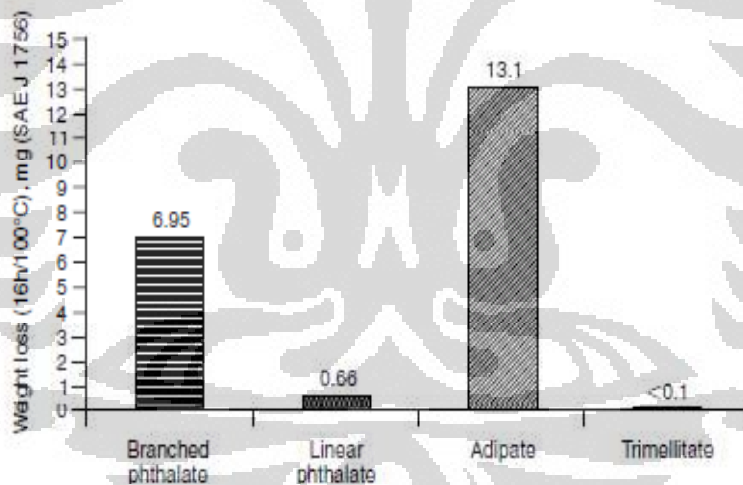
Interaksi Spesifik ^[5]

Atraksi dan interaksi antar PVC dan *plasticizer* harus tetap ada setelah material selesai diproses menjadi produk. Hal ini untuk mencegah terjadinya migrasi pada saat material telah selesai diproses.

Selain *plasticizer* yang sudah umum digunakan ada juga yang disebut *performance plasticizer* dan *speciality plasticizer*. Kebanyakan *plasticizer* yang ada merupakan *plasticizer* dengan pemakaian umum. *Performance plasticizer* mempunyai kemampuan larut lebih baik ke dalam polimer dan dapat digunakan pada polimer yang diaplikasikan pada suhu yang rendah akan tetapi harga produksi dengan pemakaian *plasticizer* ini menjadi lebih tinggi karena mahal. Contoh *performance plasticizer* yang dapat larut

dengan cepat pada polymer adalah butylbenzylphthalate dan dihexylphthalate. *Plasticizer* untuk aplikasi suhu rendah antara lain di-n-undecylphthalate dan di-2-ethylhexyladipate, sementara performance *plasticizer* yang dianggap tidak dapat bermigrasi sehingga disebut permanent stabilizer adalah tri-2-ethylhexyltrimellitate, triisononyltrimellitate, dan diisodecyl phthalate. *Speciality plasticizer* bekerja pada polimer sebagai *plasticizer* sekaligus mengurangi migrasi, meningkatkan kekuatan material, dan ketahanan api.

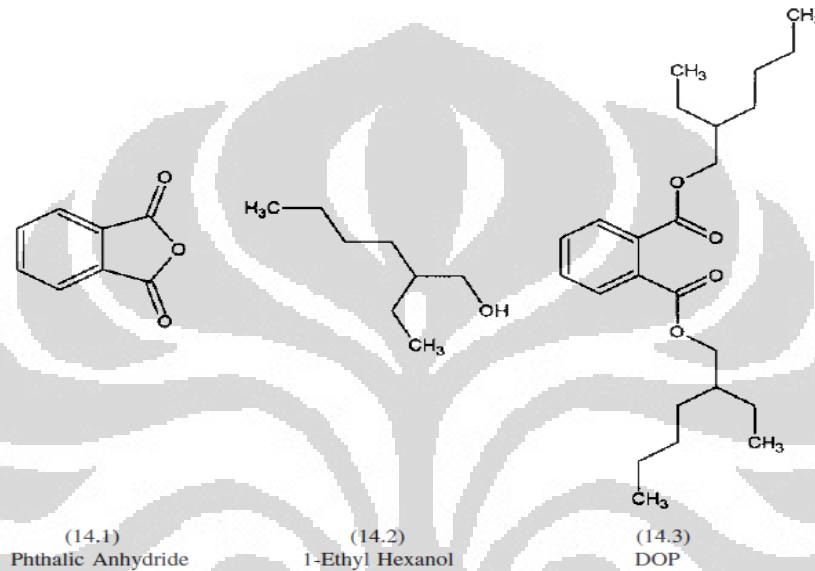
Plasticizer berdasarkan unsur kimia pembentuknya dapat dibagi menjadi tiga kelompok besar yaitu phthalateesters, trimellitateesters, dan adipateesters. Ada hubungan antara kompabilitas dan migrasi pada polimer. Biasanya, semakin banyak gugus ester pada *plasticizer* maka tingkat migrasi dari *plasticizer* akan berkurang akan tetapi *plasticizer* akan semakin tidak kompatibel dengan polimer (lihat gambar 2.3).



Gambar 2.3 Tingkat penguapan *plasticizer* dari PVC fleksibel ^[5]

2.2.1.5 DOP

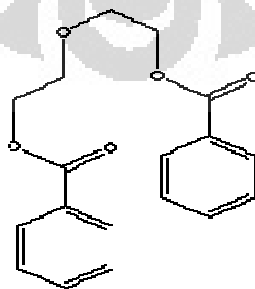
DOP merupakan *plasticizer* jenis *phthalateesters* yang paling banyak digunakan dalam proses pembuatan PVC. DOP dibuat dengan cara mereaksikan 2-etilheksanol dengan *phthalicanhydride*. Reaksi seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.4



Gambar 2.4 Struktur kimia dari di-octylphthalate (DOP) ^[2]

2.2.1.6 DEDB

Diethyleneglycoldibenzoate (gambar 2.5) merupakan *plasticizer* yang biasa digunakan untuk resin selulosa, *polymethylmethacrylate*, *polystyrene*, PVC, *polyvinylacetate*, dan turunan vinyl lain. DEDB mempunyai ketahanan terhadap noda yang baik.



Gambar 2.5 Struktur kimia diethyleneglycoldibenzoate (DEDB) ^[7]

Beberapa kelebihan *plasticizer* DEDB (tabel 2.8)

| Ciri-ciri | Keuntungan |
|--|---|
| waktu pencampuran kering lebih singkat | waktu pencampuran kering lebih cepat |
| suhu pencampuran rendah | suhu pencampuran kering lebih rendah |
| | waktu proses pencampuran kering lebih cepat |
| pelarut yang baik | temperatur gelas lebih rendah |
| | waktu fusi yang lebih cepat |
| pelembut yang efisien | pemakaian <i>plasticizer</i> lebih hemat |
| bersifat permanen | tidak mudah dilarutkan |
| | tidak mudah menguap |

Tabel 2.8 Kelebihan *plasticizer* DEDB ^[10]

Secara umum perbandingan sifat dari DOP dan DEDB adalah sebagai berikut (tabel 2.9)

| Sifat | DOP | DEDB |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| warna | 40 | 50 |
| proporsi D | 0.984 | 1.176 - 1.18 |
| nilai keasaman | 0.02 | 0.02 - 0.03 |
| titik nyala, °C >= | 190 - 200 | 170 - 190 |
| ester, % >= | 98 - 99 | 98.5 |
| resistivitas volume | $1 \cdot 10^{11} - 2.2 \cdot 10^{11}$ | $1 \cdot 10^{11} - 2.2 \cdot 10^{11}$ |
| temperatur alir minimum | -39 | -20 |
| kekuatan tarik | 260 | 276 |
| tingkat penguapan | 4.5 | 5.5 |

Tabel 2.9 Tabel perbandingan DOP dan DEDB ^[7]

2.3 Proses Pencampuran PVC dengan Material Aditif

Proses pencampuran PVC dengan *plasticizer* dibagi menjadi 2 tahap yaitu pencampuran kering dan pencampuran lelehan-panas. Pada proses pencampuran kering yang terjadi adalah proses pencampuran secara fisik. Pada proses pencampuran lelehan-panas yang terjadi adalah proses pencampuran/plastisasi secara intermolekul.

Berikut merupakan tahap-tahap yang terjadi saat pencampuran PVC dengan *plasticizer* [5].

1. tahap adsorpsi - *plasticizer* dicampurkan dengan resin PVC
2. tahap adhesi - *plasticizer* berpenetrasi ke dalam resin dan mengisi ruang dalam resin
3. tahap absorpsi - bagian polar pada resin PVC melepaskan ikatan satu sama lain
4. tahap plastisasi intermolekul - bagian polar yang lepas kemudian berinteraksi dengan *plasticizer*
5. tahap plastisasi intramolekul - struktur resin tersusun ulang dengan adanya ikatan penuh dengan *plasticizer*

Tahap satu dan dua terjadi pada pencampuran kering. Hal yang mempengaruhi pencampuran kering adalah peralatan yang dipakai misalnya blender. Tahap kedua juga bergantung pada kekentalan dari *plasticizer*, ukuran partikel polimer, ukuran pori-pori resin, dan *free volum* dalam polimer.

Pada tahap tiga sampai empat terjadi pada pencampuran lelehan panas. Penentu keberhasilan proses ini adalah polaritas molekul, volume molekul, dan berat molekul.

Keempat tahapan di atas harus berlanjut pada tahap ke lima agar *plasticizer* “dapat tinggal” di dalam produk material polimer.

Berikut (tabel 2.10) adalah komposisi umum yang dipakai untuk membuat PVC fleksibel.

| Komposisi | part berdasar berat | parts per hundred resin (phr) | wt% |
|--------------------|---------------------|-------------------------------|------|
| PVC | 75 | 100 | 50 |
| <i>plasticizer</i> | 45 | 60 | 30 |
| <i>filler</i> | 26.25 | 35 | 17.5 |
| <i>stabilizer</i> | 3 | 4 | 2 |
| pelumas | 0.75 | 1 | 0.5 |
| total | 150 | 200 | 100 |

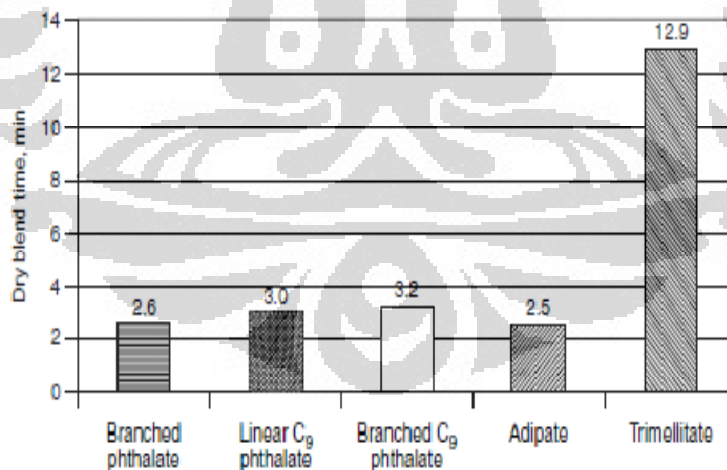
Tabel 2.10 Komposisi umum untuk membuat PVC fleksibel ^[5]

2.3.1 Pencampuran Kering

Fungsi utama dari alat campur kering adalah untuk mendistribusikan *stabilizer*, pelumas, *filler*, dan *modifiers* secara merata dengan hemat. Hasil campuran diharapkan bebas debu, tidak mudah menguap, dan kering. Hasil campuran yang baik ini pada waktu penuangan tidak akan mengalami penggumpalan atau menempel menjadi gumpalan-gumpalan. Semakin baik dan kompatibel polimer dengan *plasticizer* yang dipakai maka waktu dan suhu pada waktu *dry mixing* akan turun secara otomatis. Hal ini menyebabkan proses produksi bisa berlangsung secara cepat dan biaya juga bisa ditekan.

Berdasarkan definisinya proses *dry mixing* adalah proses pencampuran resin, biasanya PVC, dengan *plasticizer* dan aditif lainnya yang dilakukan dalam suatu wadah tertutup yang pada bagian bawahnya terdapat rotor yang berputar dengan kecepatan tinggi dan dilakukan pada suhu di bawah suhu transisi glass (T_g) material yang dicampur.

Berikut (gambar 2.6) merupakan waktu pencampuran kering yang optimum antara PVC dengan *plasticizer* tertentu.



Gambar 2.6 Waktu pencampuran kering optimum untuk PVC dengan *plasticizer* ^[5]

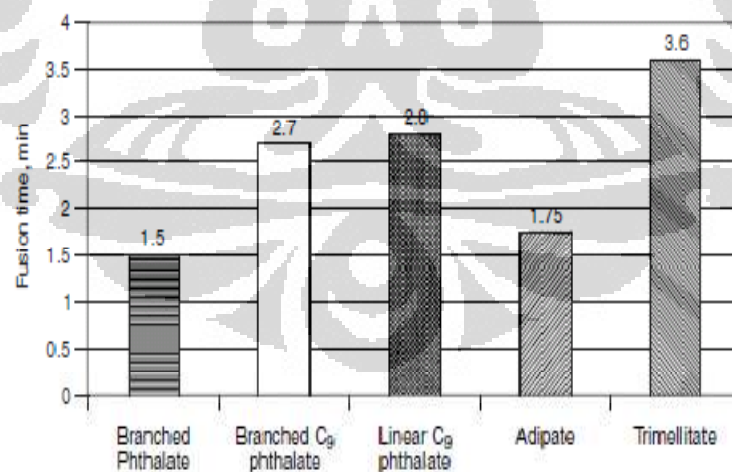
2.3.2 Hot Melt Mixing ^[5]

Pencampuran lelehan-panas bertujuan untuk mencampur PVC dalam waktu 5-8 menit dengan suhu pencampuran optimum antara 110-150°C. Proses ini menyatukan semua campuran aditif dan partikel PVC menjadi pasta. Setelah proses pencampuran lelehan-panas, pasta yang dihasilkan dari pencampuran tersebut akan masih bersifat lengket karena suhunya yang masih tinggi, untuk itu diperlukan proses pendinginan di mana suhu pasta diturunkan sampai pada suhu kira-kira 40°C.

Setelah proses pendinginan tersebut, aditif dan partikel polimer sudah menyatu dalam bentuk pasta. Pasta ini yang kemudian akan dipakai dalam proses produksi polimer dengan cara ekstrusi.

Waktu fusi adalah waktu yang diperlukan plasticizer untuk bercampur dengan polimer dan memberikan properti mekanik yang maksimum. Waktu fusi biasanya dihitung dengan memperhatikan variasi waktu dan suhu dari pencampuran. Waktu fusi juga mempunyai hubungan dengan percabangan dan besar molekul *plasticizer*.

Berikut (gambar 2.7) merupakan waktu fusi yang optimum antara plasticizer dan PVC.



Gambar 2.7 Waktu fusi optimum PVC dengan suhu 93°C dan putaran rotor 63 RPM ^[5]

2.3.3 Teori Pencampuran Polimer^[13]

Tujuan dari proses pencampuran polimer adalah sebagai berikut:

- mengurangi ketidakseragaman pada komposisi
- meningkatkan kemungkinan untuk menemukan volume dalam jumlah kecil pada campuran untuk memperbaiki distribusi
- memperkecil ukuran dari *domain*
- memecahkan partikel yang teraglomerasi

Proses pencampuran dua atau lebih cairan dengan partikel padat membutuhkan dua proses. Proses pencampuran dispersif (intensif) di mana partikel padat dan fasa cair dipecah menjadi ukuran partikel yang lebih kecil. Partikel yang sudah memiliki ukuran yang kecil harus didistribusikan pada campuran sehingga campuran dapat menjadi homogen. Langkah ini disebut pencampuran distributif. Kedua parameter ini adalah parameter yang penting pada proses pencampuran material

Pencampuran Distributif^[13]

Aliran laminar menyebabkan perubahan bentuk. Pencampuran distributif tidak memerlukan energi antar muka, pemecahan partikel dan pengurangan ukuran partikel.

Pencampuran distributif terjadi pada viskositas tinggi sehingga turbulensi pada campuran tidak mudah terjadi dan proses penghancuran ukuran partikel terjadi pada kecepatan yang sangat rendah. Mekanisme yang terjadi pada pencampuran distributif adalah konveksi. Mekanisme ini mencakup pergerakan dari partikel cairan, partikel padat, atau aglomerat dari satu posisi ke posisi lainnya. Konveksi menyebabkan terjadinya tegangan antar muka antara komponen campuran. Akan tetapi, karena terjadi pada viskositas yang tinggi, maka tegangan antar muka dapat diabaikan dan pencampuran yang terjadi terus menerus akan mengurangi ketidakseragaman campuran dalam tingkat molekuler.

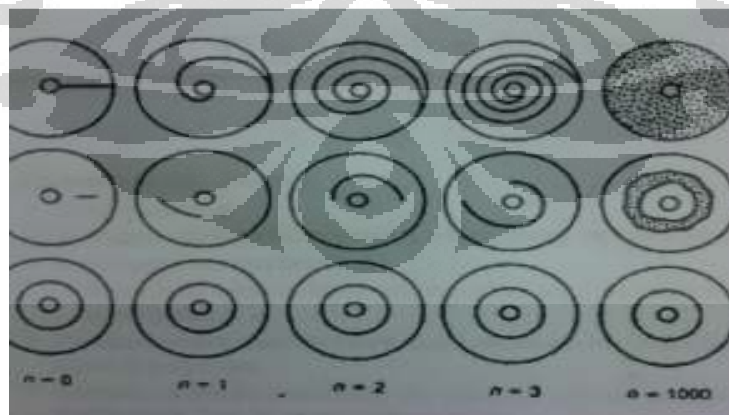
Pencampuran Dispersif^[13]

Parameter yang penting untuk dapat terjadi pencampuran dispersif adalah tegangan. Tujuan utama dari pencampuran dispersi adalah pemecahan ukuran partikel dan pengurangan ukuran partikel cair maupun solid.

Pencampuran dispersif menitikberatkan pada pengurangan ukuran partikel menjadi ukuran sub-mikron. Gaya yang diberikan pada partikel harus lebih besar dari tegangan antar muka antara partikel dan lelehan matriks. Jika hal ini tidak dapat dipenuhi, tegangan antar muka akan menyebabkan partikel cairan tetap menjadi agregat. Penghancuran partikel cairan dapat dijelaskan dengan mekanisme pemecahan benang cairan.

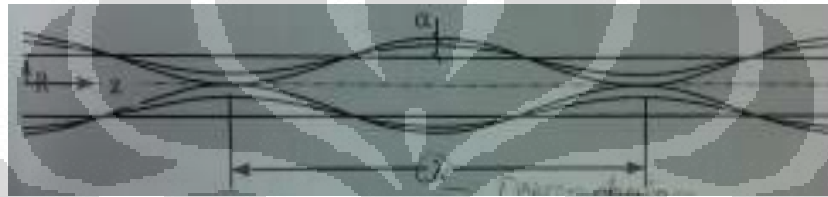
Mekanisme Pemecahan Benang Cairan^[13]

Pada fase awal pencampuran panas, ukuran partikel cenderung besar dan akan membentuk suatu benang akibat dari perputaran dari mixer. Benang ini tidak stabil. Benang panjang ini diasumsikan berbentuk silinder bulat panjang yang memutar pada campuran polimer. Silinder bulat panjang ini mempunyai luas permukaan yang lebih besar daripada kumpulan bola dengan jari-jari dan total volume yang sama. Luas permukaan total akan berkurang jika silinder ini pecah menjadi bola.



Gambar 2.8 Proses pembentukan benang cairan pada pencampuran panas polimer

Hal yang terjadi pada proses pencampuran lelehan panas adalah gangguan pada benang cairan *plasticizer* akibat perputaran *mixer*. Gangguan ini mengakibatkan gelombang sinusoidal lokal pada benang cairan tersebut. Bila gangguan gelombang sinusoidal mempunyai panjang gelombang yang besar ($> 2\pi R_0$ dengan R_0 merupakan besar radius dari benang cairan yang terbentuk) maka akan menyebabkan area antar muka dari benang tersebut berkurang dari bentuk silinder awal. Area antar muka yang berkurang menyebabkan tegangan antar muka makin tinggi. Hal ini dapat diamati pada gambar 2.9.

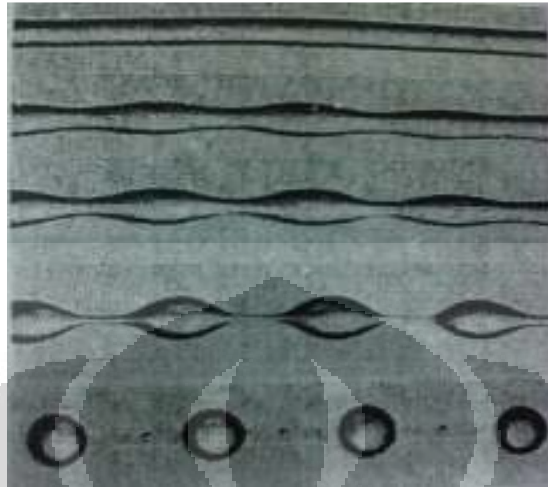


Gambar 2.9 Gangguan sinusoidal yang terjadi pada benang cairan silinder

Tegangan antar muka yang makin tinggi menyebabkan amplitudo dari gelombang sinusoidal yang terbentuk semakin besar. Jika amplitudo gelombang sinusoidal mencapai ukuran radius dari silinder benang yang ada, maka benang tersebut akan putus dan pecah. Pertambahan besar amplitudo berhubungan eksponensial dengan waktu:

$$\alpha = \alpha_0 \exp(qt) \quad (2.3)$$

Cepat tumbuh sinusoidal, q , berbanding lurus dengan tegangan antar muka. Tegangan antar muka sendiri bergantung pada viskositas dari campuran dan juga perputaran dari *mixer* sendiri. Perputaran *mixer* yang cepat menghasilkan gangguan awal yang lebih besar menyebabkan gelombang sinusoidal lebih cepat tumbuh dan memecahkan benang cairan yang ada. Proses pemutusan benang cairan *plasticizer* menjadi bola dengan ukuran lebih kecil dapat diamati pada gambar 2.10. bola-bola tersebut kemudian akan membentuk benang cairan *plasticizer* lagi dengan ukuran jari-jari yang lebih kecil dan proses pemecahan benang dapat diulangi kembali.



Gambar 2.10 Fenomena pemutusan benang cairan pada campuran polimer

2.4 Sifat Viskoelastis pada Plastik^[12]

Viskoelastis adalah sifat yang muncul pada material polimer. Sifat ini secara khusus menunjukkan sifat mekanis yang merupakan gabungan dari sifat viskositas dari cairan dan sifat elastis dari benda padat. Pada produk PVC, sifat ini muncul sehingga nantinya akan mempengaruhi grafik dari pengujian tarik dari sampel produk PVC.

Untuk benda uji yang dikenakan gaya dari satu arah (*uniaxial*), tegangan *engineering*, σ , adalah gaya yang dikenakan baik tarik maupun kompresif dibagi dengan luas area penarikan awal. Regangan *engineering*, ϵ , adalah pertambahan panjang (atau pengurangan panjang) yang dibagi dengan ukuran panjang asli sampel. Pada material elastis sempurna (Hookean) tegangan yang diberikan pada sampel, σ , berbanding lurus dengan regangan, ϵ , dan hubungan tegangan dan regangan untuk gaya satu arah dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$\sigma = \text{konstanta} \times \epsilon \quad (2.4)$$

Konstanta yang dimaksud adalah modulus elastisitas dari material tersebut.

Pada lelehan sampel yang mempunyai sifat *newtonian* tegangan geser, τ , dengan kecepatan regangan (dy/dt) maka hubungan dapat dijelaskan sebagai berikut.

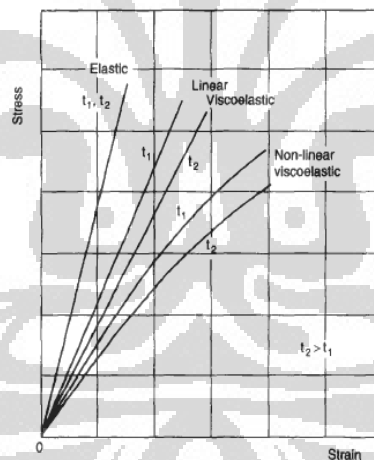
$$\tau = \text{konstanta } d\gamma/dt \quad (2.5)$$

Konstanta ini yang merupakan angka kekentalan (viskositas) dari lelehan sampel.

Pada keadaan riil, lelehan polimer memiliki sifat tidak ideal dan memiliki sifat yang mewakili kedua sifat ideal tersebut. Sifat ini yang kemudian disebut sifat viskoelastis pada polimer. Pada material polimer yang memiliki sifat viskoelastis tegangan merupakan produk fungsi dari regangan dan waktu.

$$\sigma = \varepsilon \times f(t) \quad (2.6)$$

Perhitungan ini merupakan dasar dari material yang memiliki sifat viskoelastis linier. Hal ini menunjukkan bahwa, pada uji tarik mikro, tegangan akan berbanding lurus dengan regangan pada variasi waktu yang sama. Respon dari sampel material polimer dapat diamati pada gambar 2.11.



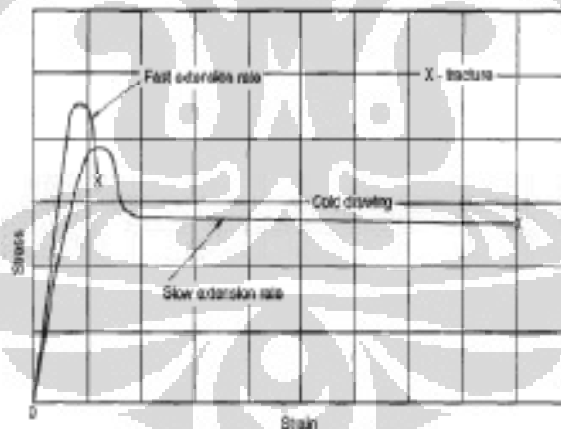
Gambar 2.11 Kelakuan tegangan dan regangan pada material elastis dan viskoelastis pada nilai waktu yang berbeda

Dari gambar tersebut dapat diamati karakter khusus pada material viskoelastis. Pada material viskoelastis menunjukkan hubungan antara tegangan konstan pada material dengan regangan yang dipengaruhi oleh waktu (*creep*). Juga dapat diamati hubungan antara regangan konstan dengan tegangan yang dipengaruhi oleh waktu (*relaxation*).

Jika tegangan tidak diberikan lagi maka material akan memiliki kemampuan untuk kembali ke bentuk awalnya.

2.5 Pengujian Mekanis pada Material Plastik ^[12]

Tes yang paling sering dilakukan pada plastik adalah tes tarik. Akan tetapi, pada material plastik, tes tarik harus dilakukan dengan hati-hati dan hasil dari tes tarik tersebut tidak dapat mewakili nilai dari suatu batch produk. Hal ini disebabkan karena pada material plastik, hasil yang didapatkan dari tes tarik dapat berbeda dengan hanya sedikit perubahan dari kondisi tes. Di bawah ini merupakan contoh dari material U-PVC yang dites dengan kecepatan tarik yang berbeda. Pada kecepatan tinggi (1mm/s) U-PVC menunjukkan sifat yang getas dengan modulus elastisitas dan kekuatan yang tinggi. Sementara pada kecepatan tarik yang rendah (<0.05mm/s) material yang sama menunjukkan penurunan nilai modulus elastisitas dan kekuatan sementara sifat material menjadi sangat *ductile*. Alasan ini yang menyebabkan satu hasil tes tidak dapat merepresentasikan nilai dari suatu produk sampel.



Gambar 2.12 Sifat tarik umum dari U-PVC

Karakteristik unik yang ditunjukkan pada PVC ini terjadi karena perbedaan kecepatan tarik dari material. Hal ini disebabkan karena pada kecepatan tarikan rendah rantai molekul pada polimer memiliki waktu untuk menyusun diri kembali di bawah pengaruh tegangan. Akibat dari efek tersebut, maka satu nilai tes tarik tidak dapat digunakan untuk menilai suatu campuran polimer. Standar tes tarik untuk polimer adalah BS 2782,

ASTM D638, dan ASTM D790. Untuk uji tarik mikro menggunakan ASTM D1708-06A. Seperti sudah dijelaskan sebelumnya, tegangan satu arah, σ , adalah gaya dibagi dengan luas area dan regangan, ϵ , adalah perubahan panjang dibagi dengan panjang awal. Modulus elastisitas merupakan perbandingan dari tegangan/regangan.

Sifat Mekanis dari Plastik

Berdasarkan pengertian di atas maka

$$\sigma = \frac{W}{a} \quad (2.7)$$

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.8)$$

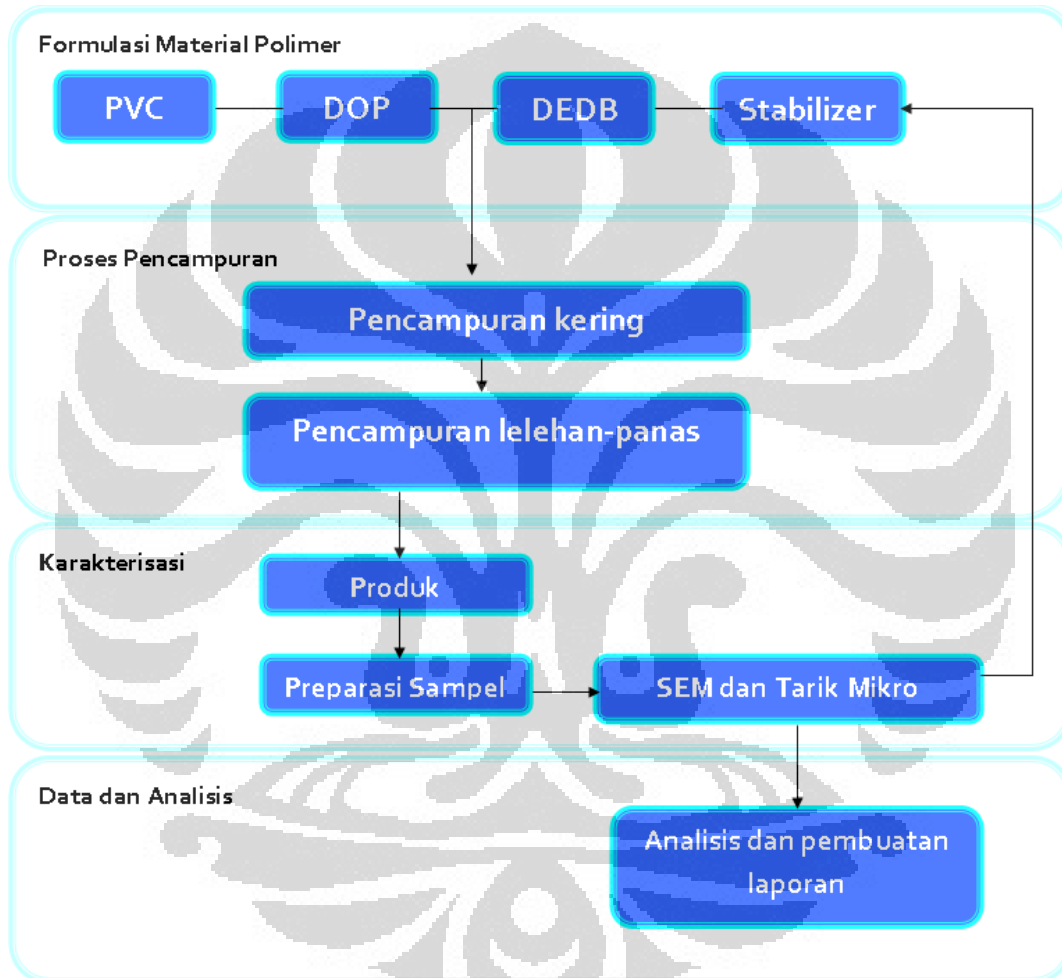
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{W L_0}{a \delta} \quad (2.9)$$

E (rumus 2.9) merupakan modulus elastisitas dari sampel produk PVC.

Bab 3

Metode Penelitian

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir eksperimen

3.2 Bahan dan Peralatan

3.2.1 Peralatan

Peralatan yang digunakan pada proses penelitian ini meliputi:

a. Alat formulasi sampel

Alat yang digunakan untuk menghitung dan mengukur komposisi dari sampel:

- Timbangan digital (gambar 3.2)
- Gelas kimia 100 ml dan 200 ml
- Pipet
- Alat pengaman diri berupa masker dan sarung tangan



Gambar 3.2 Gambar proses awal formulasi sampel

b. Alat pencampuran kering

Alat yang digunakan untuk melakukan proses pencampuran kering pada sampel:

- Blender berdaya 350W dengan putaran *blade* 2500 rpm (gambar 3.3)
- Wadah blender khusus untuk pencampuran bahan kering



Gambar 3.3 Blender untuk pencampuran kering

c. Alat pencampuran lelehan-panas

Alat yang digunakan untuk melakukan proses pencampuran panas pada sampel:

- Rheomixer berdaya 2000 W, putaran *blade* 100-110 rpm, variasi suhu yang dipakai untuk percobaan 105-165 °C. Kapasitas optimal *rheomixer* adalah 40-60 gr (gambar 3.4)
- Kompresor udara



Gambar 3.4 *Rheomixer* yang dipakai

d. Alat preparasi sampel

Alat yang digunakan untuk menekan sampel menjadi bentuk sampel uji berupa *Dog Bone*:

- *Hot Pressing Machine* (gambar 3.5)
- Cetakan *Dog Bone*
- Aluminium Foil
- Termocouple dan termometer
- Alat pengaman diri berupa kacamata dan sarung tangan anti panas



Gambar 3.5 Contoh alat Hot Pressing

e. Alat Uji Karakterisasi sampel

Alat untuk mengkarakterisasi dan menguji sampel yang ada :

- SEM (gambar 3.6)
- Mesin Uji Mikro Tarik (gambar 3.7)



Gambar 3.6 SEM



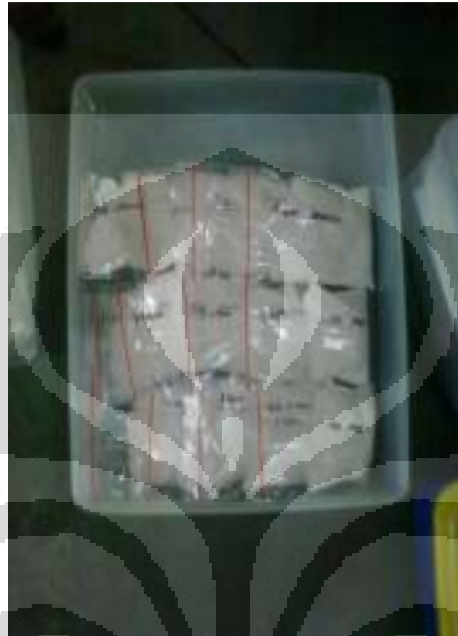
Gambar 3.7 Alat Uji Tes Tarik Mikro

3.2.2 Bahan

Bahan-bahan yang dipakai untuk menyiapkan sampel penelitian ini berupa:

1. Resin PVC
2. DOP

3. Stabilizer Powder dengan basis barium/zinc
4. DEDB klinis 90 % dari Sigma Aldrich catalog no. 369365-1L



Gambar 3.8 Contoh hasil pencampuran kering antara PVC, DOP, DEDB, dan stabilizer

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Variasi Komposisi Campuran

Komposisi campuran yang dipakai adalah berdasarkan formulasi yang telah ada dari literatur ^[5]. Dari formulasi tersebut dilakukan perubahan variasi berupa perubahan komposisi *plasticizer* DOP dengan DEDB secara gradual.

Variasi komposisi yang sudah ada adalah seperti pada tabel (tabel 3.1) ^[5] :

| Batch | DOP (phr) | DEDB (phr) | stabilizer powder (phr) | PVC (phr) | Temperatur (°C) |
|-------|-----------|------------|-------------------------|-----------|-----------------|
| 1 | 70 | 0 | 1.75 | 100 | 150 |

Tabel 3.1 Komposisi masterbatch PVC

Setelah melakukan perhitungan ulang didapatkan variasi komposisi baru (tabel 3.2) sebagai berikut.

| Percobaan | DOP (phr) | DEDB (phr) | Stabilizer Powder (phr) | PVC (phr) | Temperatur (°C) | Waktu Planetary Mixing (s) | Waktu Hot Mixing (s) | Putaran rotor <i>rheomixer</i> (rpm) |
|-----------|-----------|------------|-------------------------|-----------|-----------------|----------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| 1 | 21 | 0 | 0.525 | 30 | 150 | 300 | 240 | 100 |
| 2 | 15 | 6 | 0.525 | 30 | 150 | 300 | 240 | 100 |
| 3 | 10.5 | 10.5 | 0.525 | 30 | 150 | 300 | 240 s | 100 |
| 4 | 6 | 15 | 0.525 | 30 | 150 | 300 | 240 s | 100 |
| 5 | 0 | 21 | 0.525 | 30 | 150 | 300 | 240 s | 100 |

Tabel 3.2 Variasi komposisi

Komposisi yang dipakai dalam phr dan suhu yang dipakai adalah dalam Celcius.

Komposisi berat yang dipakai dimaksudkan untuk mencapai kondisi kapasitas optimum pada waktu pencampuran lelehan panas dengan alat *rheomixer*.

3.3.2 Variasi Suhu Pencampuran Lelehan Panas

Selain mengatur variasi komposisi dari campuran, dibuat pula eksperimen dengan variasi percobaan perbedaan suhu. Eksperimen ini bertujuan untuk mengetahui pada suhu berapa campuran PVC mencapai kondisi terbaik. Kondisi pencampuran yang baik akan dapat diamati lebih lanjut dengan melakukan pengujian tarik mikro pada hasil campuran variasi suhu pencampuran lelehan panas (tabel 3.3).

| Percobaan | DOP (phr) | DEDB (phr) | Stabilizer powder (phr) | PVC (phr) | Temperatur (°C) | Waktu Planetary Mixing | Waktu Hot Melt Mixing | Putaran Rotor <i>rheomixer</i> (rpm) |
|-----------|-----------|------------|-------------------------|-----------|-----------------|------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| 1 | 10.5 | 10.5 | 0.525 | 30 | 165 | 300 s | 240 s | 100 |
| 2 | 10.5 | 10.5 | 0.525 | 30 | 150 | 300 s | 240 s | 100 |
| 3 | 10.5 | 10.5 | 0.525 | 30 | 135 | 300 s | 240 s | 100 |
| 4 | 10.5 | 10.5 | 0.525 | 30 | 120 | 300 s | 240 s | 100 |
| 5 | 10.5 | 10.5 | 0.525 | 30 | 105 | 300 s | 240 s | 100 |

Tabel 3.3 Variasi suhu pencampuran lelehan panas

Komposisi yang dipakai dalam phr dan suhu yang dipakai adalah dalam Celcius. Komposisi berat yang dipakai dimaksudkan untuk mencapai kondisi kapasitas optimum pada waktu pencampuran lelehan panas dengan alat *rheomixer*. Temperatur yang dipakai 105-165 °C dengan deviasi perbedaan suhu dari suhu yang diatur +/- 3 °C.

3.3.3 Waktu Pencampuran Lelehan-Panas

Variasi lain yang ingin diketahui pengaruhnya terhadap campuran PVC adalah variasi waktu pencampuran. Berdasarkan variasi waktu yang telah ada, waktu pencampuran panas yang ideal adalah sekitar 5-8 menit untuk polimer. Akan tetapi, hal ini sulit dicapai untuk PVC karena sifatnya yang mudah terdegradasi jika terkena suhu tinggi pada waktu yang lama. Maka dibuat variasi percobaan waktu pencampuran lelehan-panas (tabel 3.4) sebagai berikut.

| Percobaan | DOP (phr) | DEDB (phr) | Stabilizer powder (phr) | PVC (phr) | Temperatur (°C) | Waktu Planetary Mixing (s) | Waktu Hot Melt Mixing (s) | Putaran rotor <i>rheomixer</i> (rpm) |
|-----------|-----------|------------|-------------------------|-----------|-----------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 15 | 6 | 0.525 | 30 | 150 | 300 | 120 | 100 |
| 2 | 15 | 6 | 0.525 | 30 | 150 | 300 | 240 | 100 |
| 3 | 15 | 6 | 0.525 | 30 | 150 | 300 | 360 | 100 |
| 4 | 15 | 6 | 0.525 | 30 | 150 | 300 | 480 | 100 |

Tabel 3.4 Variasi waktu pencampuran lelehan panas

Komposisi yang dipakai dalam phr dan suhu yang dipakai adalah dalam Celcius. Komposisi berat yang dipakai dimaksudkan untuk mencapai kondisi kapasitas optimum pada waktu pencampuran panas dengan alat *rheomixer*. Hal yang bisa diamati dengan proses waktu pencampuran panas ini adalah bentuk fisik dari PVC setelah proses dan pengujian kekuatan dari hasil campuran tersebut.

3.3.4 Proses Pembuatan Sampel

Pencampuran kering adalah proses pengadukan bersama polimer dengan aditif yang dipakai dalam bentuk solidnya. Hasil pencampuran kering ini akan dipakai selanjutnya

untuk proses pencampuran panas. Tujuan dari proses pencampuran kering ini adalah untuk mendapatkan hasil resin dan aditif yang sudah terdistribusi dengan baik sebelum kemudian melakukan proses pencampuran panas. Proses ini dapat menekan biaya karena dapat mempersingkat waktu yang dipakai untuk pencampuran panas. Energi yang dipakai untuk mencampur juga lebih sedikit karena polimer yang dipakai masih dalam bentuk solid.

Proses pencampuran kering sendiri bisa menggunakan berbagai proses dan alat akan tetapi dalam penelitian ini yang dipakai adalah blender dengan daya 350 watt dan putaran blade 2500 rpm.

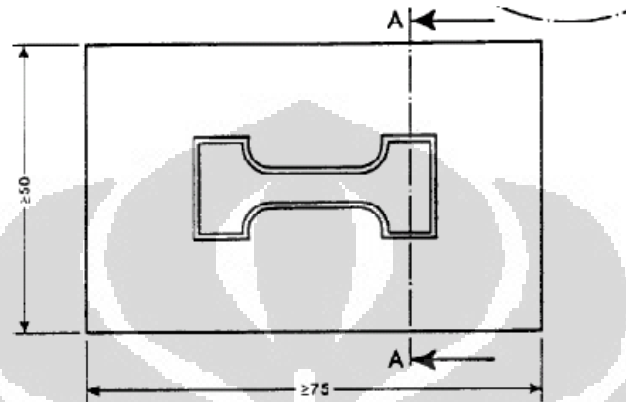
Proses pembuatan sampel dari produk pencampuran lelehan panas adalah dengan menggunakan alat *hot pressing machine*. Alat ini bekerja dengan cara memberikan tekanan pada suhu tinggi pada benda yang akan diproses. Kedua dinding *hot pressing machine* mempunyai alat pemanas yang dapat diatur suhunya dan dinding bagian bawah dapat bergerak ke atas dengan menggunakan tempa hidrolis. Tekanan pada benda kerja secara otomatis diberikan pada benda waktu dinding bagian atas dan bagian bawah menekan benda kerja.

Tujuan dari perlakuan ini adalah membentuk benda yang diproses, dalam penelitian ini PVC, menjadi bentuk pelat yang kemudian dapat diuji dengan alat uji tarik mikro. Tetapi bentuk pelat saja tidak dapat untuk diuji tarik mikro. Uji tarik mikro membutuhkan bentuk benda uji *dog bone*. Cara membuat *dog bone* untuk pengujian adalah dengan menaruh cetakan berbentuk *dog bone* yang diinginkan pada dinding bagian bawah dan menaruh sampel yang akan ditekan di atas cetakan tersebut. Setelah ditekan, PVC cair akan mengalir mengisi rongga cetakan yang telah ada.

Semakin banyak jumlah rongga yang ada maka tekanan pada benda kerja akan semakin tidak homogen. Karena itu cetakan yang digunakan seharusnya mempunyai permukaan yang benar-benar rata dan lubang cetakan yang tidak terlalu banyak.

Setelah ditekan selama 4 menit dengan suhu 175 °C, benda kerja kemudian didinginkan sampai suhu 40 °C dengan menggunakan pendingin yang dialiri air di bagian bawah dari mesin penekan panas ini. Hal ini bertujuan agar pada material tidak terjadi kejutan

temperatur yang menyebabkan benda kerja mengalami penyusutan kembali. Benda kerja yang telah membentuk *dog bone* (gambar 3.9) kemudian dibersihkan dan dipakai untuk melakukan pengujian tarik mikro.



Gambar 3.9 Bentuk cetakan *dog bone*

3.3.5 Pengujian Tarik Mikro

Pengujian tarik mikro (gambar 3.10) terutama bertujuan untuk mengetahui modulus elastisitas dari material uji.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat UTM. Pengujian ini dilakukan sesuai dengan ASTM D1708-06A. ASTM D1708-06A akan dilampirkan.

Dari masing-masing eksperimen akan dilakukan 2 kali proses pencampuran panas. Tiap-tiap hasil pencampuran panas ini kemudian akan dibuat 3 buah *dog bone* untuk diuji tarik. Tujuan dari cara pengambilan sampel ini adalah agar data yang didapatkan dapat mewakili nilai rata-rata suatu produk pada suatu variasi tertentu.



Gambar 3.10 Proses penarikan sampel PVC

3.3.6 Pengamatan Morfologi Patahan Lintang dari Sampel

Pengamatan struktur mikro dari campuran bertujuan untuk mengamati tingkat dispersi dan distribusi dari material yang dicampurkan pada PVC. Homogenitas campuran akan mempengaruhi sifat mekanis dari PVC tersebut.

Preparasi sampel yang dipakai untuk pengamatan SEM:

1. Menyiapkan nitrogen cair (gambar 3.11) pada wadah termos dan tang pencapit untuk memegang dan mematahkan sampel



Gambar 3.11 Nitrogen cair yang dipakai

2. Sepotong kecil sampel hasil pencampuran panas kemudian dicelupkan ke dalam nitrogen cair dengan menggunakan tang penjepit.
3. Pada kondisi suhu rendah, material menjadi rapuh dan dapat dipatahkan dengan cara menekuk dengan tang tanpa merusak tekstur sampel
4. Permukaan hasil perpatahan lintang kemudian dipreparasi lebih lanjut dengan dilapisi platina (gambar 3.12)



Gambar 3.12 Hasil patahan dilapisi platina dengan metode *sputtering*

5. Mengamati morfologi permukaan perpatahan lintang yang telah dilapisi dengan platina dengan menggunakan SEM

Bab 4

Hasil Penelitian dan Pembahasan

Penelitian yang dilakukan pada material PVC dengan penambahan *plasticizer* meliputi pemvariasian campuran PVC. Pengaruh dari penelitian ini diamati dengan pengujian tarik mikro dengan menggunakan alat UTM dan pengamatan morfologi permukaan penampang lintang produk PVC dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pembahasan hasil pengamatan dapat diawali dengan hasil pengamatan morfologi.

4.1 Morfologi Penampang Lintang Produk PVC

Pengamatan morfologi hasil patahan dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pengamatan dilakukan pada penampang melintang sampel PVC yang dipatahkan dengan metode pencelupan ke dalam nitrogen cair. Pengamatan morfologi ini bertujuan untuk melihat pengaruh dari variasi proses suhu pencampuran lelehan-panas terhadap morfologi permukaan penampang lintang pada sampel produk PVC.

Produk PVC yang diamati mempunyai formulasi seperti pada tabel 4.1.

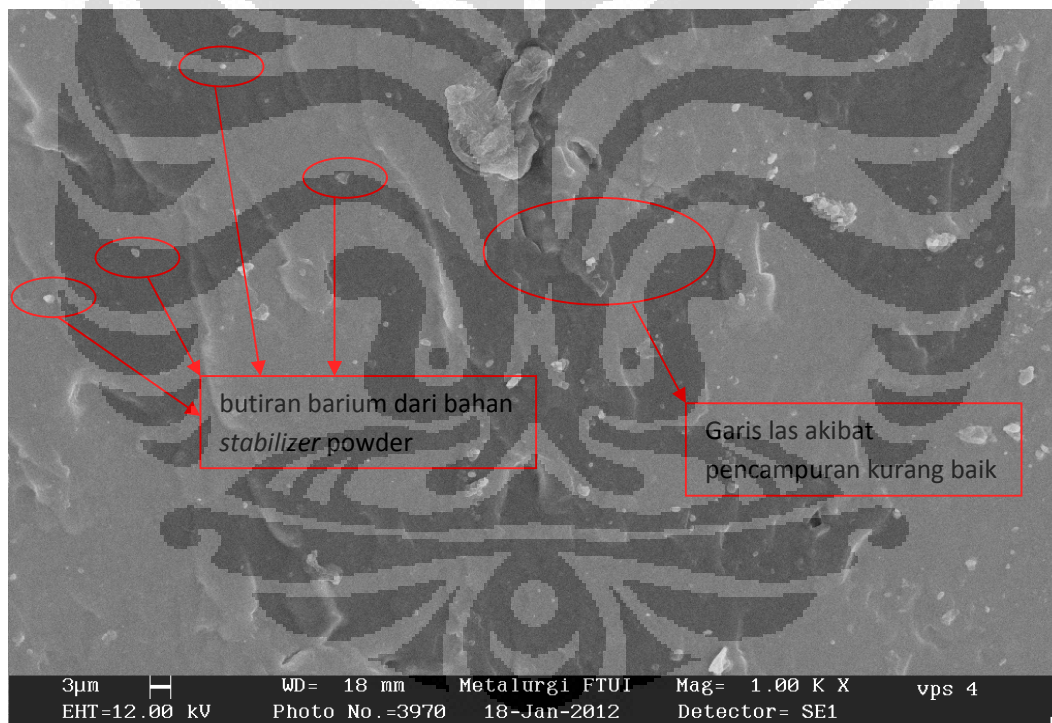
| Eksperimen | DOP | DEDB | <i>Stabilizer powder</i> | PVC | Temperatur |
|---------------|-----|------|--------------------------|-----|------------|
| Suhu Mixing 4 | 35 | 35 | 1.75 | 100 | 120 |
| Suhu Mixing 5 | 35 | 35 | 1.75 | 100 | 105 |

Tabel 4.1 Komposisi dan variasi suhu sampel SEM

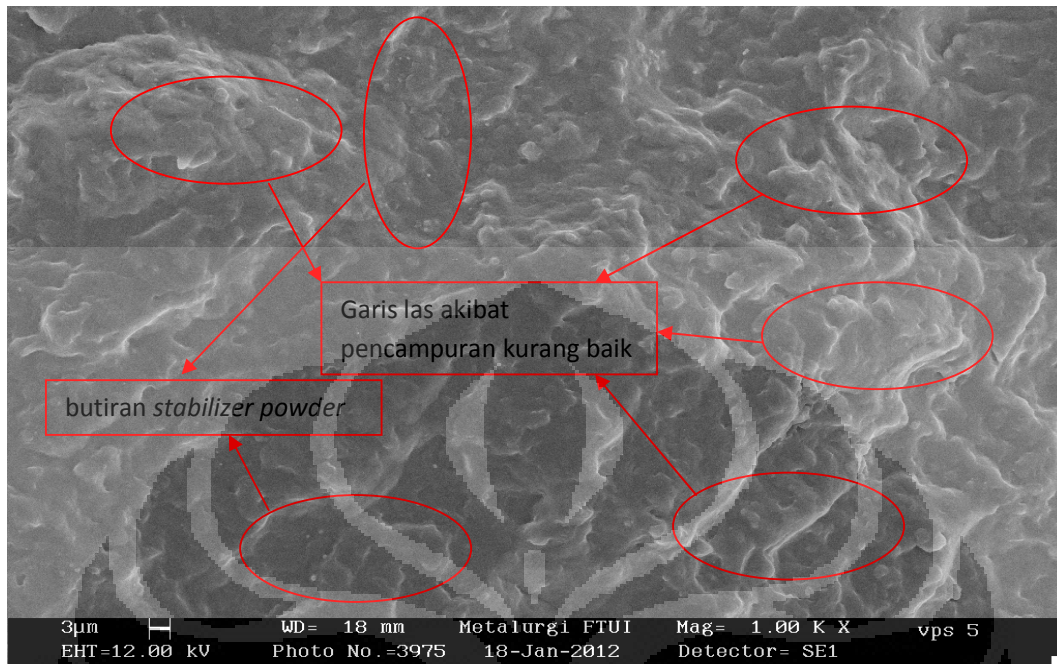
Pada gambar hasil pengamatan dengan SEM, PVC sebagai matriks sedangkan *plasticizer* dan *stabilizer powder* akan bertindak sebagai fasa terdispersinya. Tingkat keberhasilan dari campuran ini adalah kecilnya ukuran fase terdispersi dan distribusinya di dalam matriks PVC tersebut.

Secara umum penambahan suhu akan meningkatkan distribusi dan dispersi dari *plasticizer* dan *stabilizer* yang dicampurkan. Peningkatan ini akan terjadi sampai dengan suhu optimum. Jika suhu optimum sudah terlewati maka kemampuan pencampuran dispersi akan menurun. Hal ini dapat terjadi karena tegangan permukaan antar matriks PVC dengan terdispersi yang bertambah. Perbedaan yang jauh antara viskositas matriks PVC yang rendah (relatif encer) dengan fasa terdispersi (*stabilizer*) yang cenderung masih padat.

Sampel PVC yang diamati pada gambar 4.1 dan gambar 4.2 merupakan hasil pengamatan morfologi patahan yang diamati secara melintang pada sampel dengan pencampuran lelehan panas pada suhu 120 °C dan 105 °C.



Gambar 4.1 Morfologi permukaan penampang lintang produk PVC proses suhu 120 °C dengan pembesaran 1000x



Gambar 4.2 Morfologi permukaan penampang lintang produk PVC proses suhu 105 °C dengan pembesaran 1000x

DOP dan DEDB yang dipakai pada eksperimen ini berbentuk cair sementara PVC dan *stabilizer* yang dipakai dalam bentuk serbuk. Pada temperatur percobaan yang lebih rendah, diharapkan bentuk fisik material campuran akan lebih mudah diamati karena proses pencampuran yang terjadi belum sempurna.

Pengamatan penampang lintang produk PVC menunjukkan bahwa pada sampel dengan suhu pencampuran lelehan-panas 105 °C, memberikan hasil yang tidak sebaik pada suhu 120 °C. Hal ini terlihat dari banyaknya PVC yang belum meleleh secara sempurna. Lelehan yang belum sempurna ini terlihat seperti *weld line* (garis las). Garis las terjadi akibat pelelehan serbuk PVC yang belum sempurna sehingga *plasticizer* dan *stabilizer* yang digunakan dalam produk PVC juga belum berfungsi secara optimal.

Pada 120 °C, morfologi yang dihasilkan menunjukkan hasil campuran yang lebih baik. Secara umum tingkat homogenitas dari sampel lebih baik dari pada proses pencampuran lelehan-panas pada suhu 105 °C. Butir-butir *stabilizer* juga menyebar dengan lebih merata. Hasil pengamatan pada gambar 4.2 menunjukkan bahwa masih terjadi garis las

akan tetapi tidak sebanyak sampel produk PVC pada pencampuran lelehan-panas suhu 105 °C.

Pengamatan morfologi ini menunjukkan bahwa suhu pencampuran lelehan-panas mempengaruhi hasil morfologi produk PVC tersebut. Pada suhu pencampuran lelehan-panas yang lebih tinggi proses pencampuran dan homogenitas sampel yang didapat akan lebih baik ^[11]. Akan tetapi, ada suhu optimum di mana proses pencampuran yang terjadi paling baik. Dispersi dan distribusi dari campuran PVC akan mempengaruhi sifat mekanis dari produk PVC tersebut.

4.2 Perilaku Mekanis PVC

Perilaku mekanis suatu produk PVC dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, misalnya formulasi campuran PVC, suhu proses pencampuran lelehan panas, dan lama waktu pencampuran lelehan panas. Pengaruh variasi-variasi tersebut dijelaskan pada poin-poin berikut ini.

Pengamatan perilaku mekanis dapat dilakukan dengan pengujian tarik (uji tarik mikro). Pengujian tarik dengan metode tarik mikro ini dilakukan dengan mengacu pada ASTM D1708-06A dengan kecepatan tarik sebesar 100mm/menit. Pengujian ini dilakukan pada 3 sampel pada masing-masing eksperimen. Tujuan dari dilakukannya pengulangan sampai dengan 3 sampel per eksperimen adalah agar data sampel dapat merepresentasikan kondisi nilai produk PVC pada keadaan yang sebenarnya.

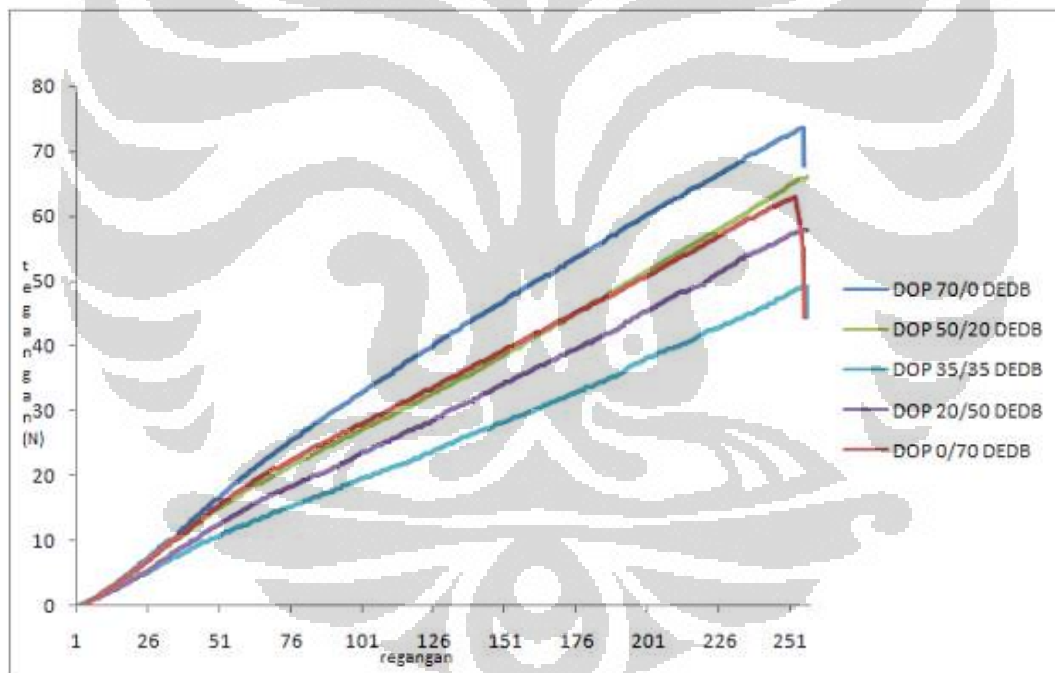
4.2.1 Pengaruh Variasi Komposisi

Pada tabel 4.3, hasil percobaan uji tarik mikro dari variasi komposisi PVC disajikan data kekakuan (*stiffness*), modulus elastisitas (*Young's modulus*), kekuatan tarik (*tensile strength*), dan kekuatan luluhnya (*yield strength*). Adapun komposisi formulasi produk PVC yang dipakai dijelaskan oleh tabel 4.2

| Percobaan | DOP | DEDB | Stabilizer | PVC |
|-------------|-----|------|------------|-----|
| Komposisi 1 | 70 | 0 | 1.75 | 100 |
| Komposisi 2 | 50 | 20 | 1.75 | 100 |
| Komposisi 3 | 35 | 35 | 1.75 | 100 |
| Komposisi 4 | 20 | 50 | 1.75 | 100 |
| Komposisi 5 | 0 | 70 | 1.75 | 100 |

Tabel 4.2 Variasi komposisi PVC dalam phr

Pada variasi komposisi ini, waktu yang dipakai untuk proses pencampuran kering adalah 300 detik. Pencampuran lelehan panas dilakukan pada suhu 150°C, putaran rotor 100 rpm, waktu pencampuran 240 detik. Setelah pencampuran lelehan panas, sampel dibentuk dengan alat *hot press* pada suhu 170°C selama 240 detik.



Grafik 4.1 Tegangan dan regangan variasi komposisi

Pada grafik 4.1 menunjukkan bahwa sampel produk PVC memiliki sifat viskoelastis non-linear. Sifat viskoelastis non-linear menunjukkan bahwa dengan tegangan konstan yang diberikan pada sampel tarik, maka regangan yang terjadi pada sampel sifatnya tidak konstan, kemudian terjadi perubahan besar regangan padahal tegangan yang

diberikan konstan. Perubahan besar regangan pada sampel menunjukkan perbedaan wilayah elastis dan plastis pada sampel PVC variasi komposisi. Pada saat regangan mulai melandai adalah titik tegangan luluhnya (*yield strength*). Setelah melewati titik ini rantai-rantai polimer di dalam sampel PVC melakukan reorientasi ulang dan mengalami deformasi plastis. Setelah melewati titik ini, bila tegangan yang diberikan pada sampel dihilangkan maka sampel tidak dapat kembali ke bentuk awalnya.

Berdasarkan grafik 4.1 dapat diamati bahwa sampel produk PVC dengan variasi komposisi DOP 70 phr dan DEDB 0 phr memiliki nilai kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang paling tinggi. Sedangkan pada komposisi DOP 35 phr dan DEDB 35 phr, produk PVC memiliki nilai kekuatan tarik dan modulus elastisitas paling rendah.

| Percobaan | Stiffness (N/m) | Young's Modulus (MPa) | Tensile Strength (MPa) | Stress at Yield (MPa) |
|-------------|-----------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Komposisi 1 | 1185,32 | 3,09 | 12,71 | 3,13 |
| Komposisi 2 | 1126,28 | 3,06 | 11,97 | 2,83 |
| Komposisi 3 | 1047,67 | 3,04 | 12,55 | 2,63 |
| Komposisi 4 | 1170,76 | 3,06 | 8,59 | 2,55 |
| Komposisi 5 | 1177,77 | 3,08 | 12,36 | 2,86 |

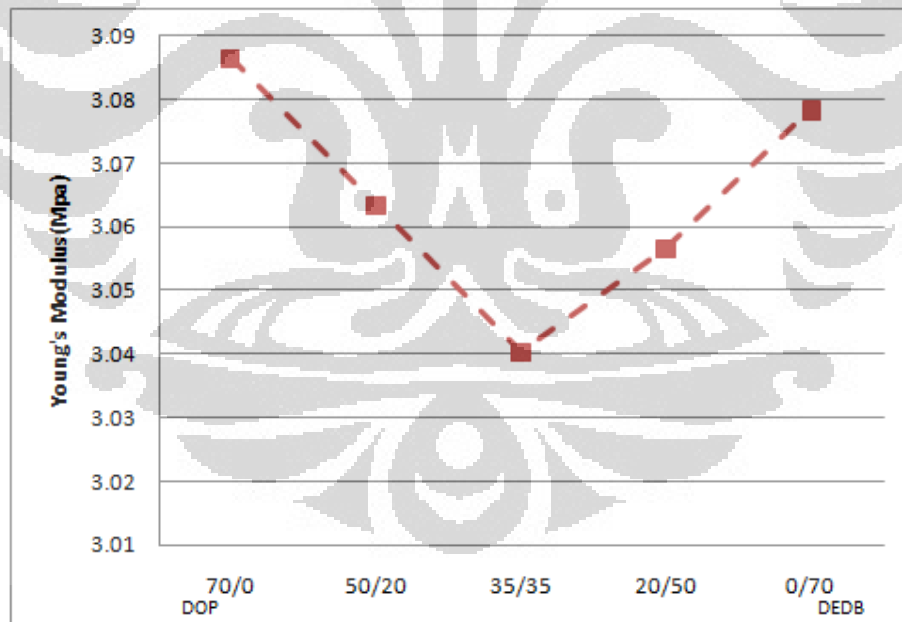
Tabel 4.3 Data hasil pengujian tarik mikro variasi komposisi

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa nilai kekakuan dan modulus elastisitas yang ingin diketahui memiliki kecenderungan menurun hingga komposisi produk PVC dengan DOP 35 phr dan DEDB 35 phr. Setelah melewati formulasi tersebut maka nilai kekakuan dan modulus elastisitas dari produk PVC cenderung naik lagi. Hal ini menunjukkan adanya titik pencampuran dan variasi formulasi PVC *compound* yang optimum untuk menurunkan nilai modulus elastisitas, yaitu pada variasi komposisi DOP 35 phr dan DEDB 35 phr.

Nilai kekuatan tarik dan kekuatan luluh produk PVC cenderung sama hingga pada komposisi DOP 20 phr dan DEDB 50 phr. Nilai kekuatan tarik dan kekuatan luluh cenderung turun karena proses plastisasi berhasil. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh teori pelumasan. *Plasticizer* juga dapat bertindak sebagai pelumas sehingga

memudahkan terjadinya slip pada rantai-rantai polimer ^[3]. Karena slip pada rantai polimer mudah terjadi maka nilai kekuatan tarik dan kekuatan luluhnya pun akan turun.

Penelitian ini menunjukkan kekuatan tarik dan kekuatan luluh yang paling rendah didapat pada produk PVC dengan komposisi DOP 20 phr dan DEDB 50 phr. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan (kompabilitas antara PVC dan plasticizer) DEDB lebih baik dibandingkan dengan DOP. Kompabilitas dari *plasticizer* DOP dan DEDB dengan PVC juga dapat diukur dengan parameter solubilitas ^[5]. Jika angka parameter solubilitas makin dekat, maka tingkat kompabilitas dari PVC dan *plasticizer* tersebut makin baik. PVC memiliki angka parameter solubilitas sebesar 9.66, sementara DOP memiliki angka 8.95. Tingkat kompabilitas kedua material ini tinggi sehingga DOP merupakan *plasticizer* yang cocok untuk PVC. Berdasarkan percobaan, seharusnya DEDB memiliki tingkat parameter solubilitas yang lebih mendekati parameter solubilitas PVC yaitu 9.66 ^[15].



Grafik 4.2 Hubungan modulus young's dengan komposisi *plasticizer*

Fenomena yang bisa menjelaskan turunnya nilai modulus elastisitas pada formulasi produk PVC DOP 35 phr dan DEDB 35 phr adalah akibat dari *plasticizer* sekunder ^[14]. *Plasticizer* sekunder mempunyai peran yang penting untuk menambahkan sifat

fleksibilitas, yang direpresentasikan dengan nilai modulus elastisitas. *Plasticizer* sekunder tidak dapat meningkatkan fleksibilitas secara signifikan. Akan tetapi pada penggabungan dengan *plasticizer* primer pada formulasi produk PVC, maka *plasticizer* sekunder akan dapat meningkatkan fleksibilitas dibandingkan bila *plasticizer* primer bekerja sendiri di dalam formulasi produk [15].

Plasticizer sekunder memiliki prinsip kerja umum dengan cara membuang HCl yang terjadi akibat degradasi PVC akibat pemanasan. *Plasticizer* sekunder biasanya memiliki senyawa kimia klorin. Senyawa kimia klorin ini juga meningkatkan ketahanan api (*fire retardancy*) dari produk PVC. Pada percobaan kali ini baik *plasticizer* primer maupun sekunder tidak memiliki gugus klorin sehingga kemungkinan tidak ada peningkatan kemampuan tahan api dari produk PVC akibat dari penambahan *plasticizer* sekunder [15].

Tingkat kompatibilitas *plasticizer* primer dengan PVC menurun dengan penambahan *plasticizer* sekunder. Hal ini juga berlaku sebaliknya. Oleh sebab itu, akan ada formulasi PVC yang memiliki kompatibilitas optimum dari *plasticizer* primer maupun sekunder. Kompatibilitas optimum dapat dilihat dari meningkatnya fleksibilitas produk PVC. Pada percobaan ini tingkat kompatibilitas optimum didapatkan pada formulasi DOP 35 phr dan DEDB 35 phr. Masih ada kemungkinan titik optimum terjadi pada range jarak antara DOP 35 phr dan DEDB 35 phr sampai dengan DOP 20 phr dan DEDB 50 phr. Dapat diperkirakan demikian karena pada campuran ini kemungkinan besar yang bertindak sebagai *plasticizer* primer adalah DEDB.

4.2.2 Pengaruh Suhu Pencampuran Lelehan Panas

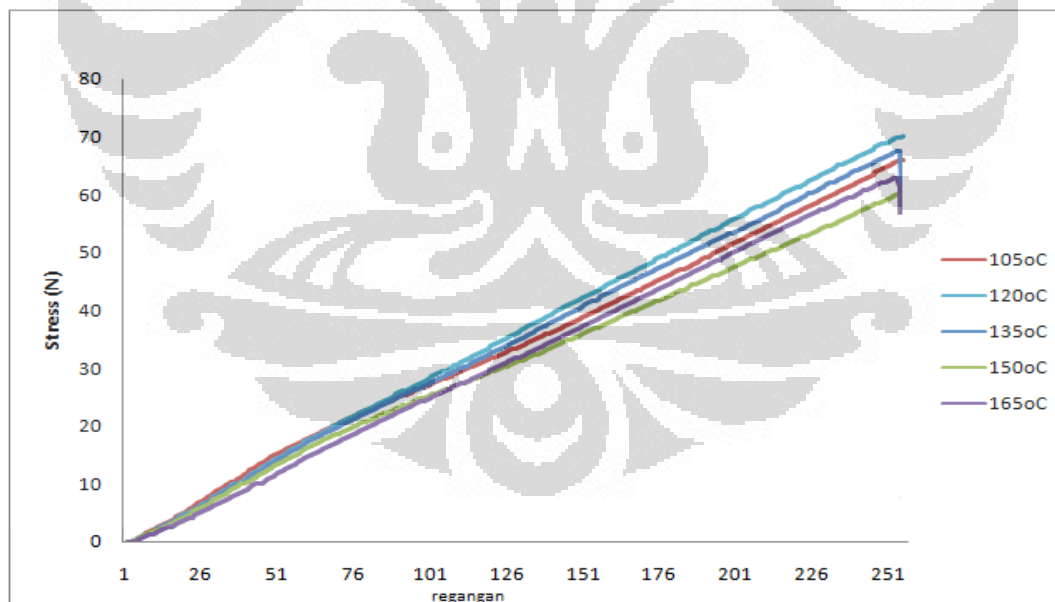
Data rerata hasil pengujian tarik mikro pada studi variasi suhu pencampuran lelehan panas ditunjukkan tabel 4.5. detail kondisi percobaan pada studi ini ditunjukkan pada tabel 4.4.

| Percobaan | Temperatur (°C) | Waktu Dry Mixing | Waktu Hot Mixing |
|---------------|-----------------|------------------|------------------|
| Suhu Mixing 1 | 165 | 300 s | 240 s |
| Suhu Mixing 2 | 150 | 300 s | 240 s |
| Suhu Mixing 3 | 135 | 300 s | 240 s |
| Suhu Mixing 4 | 120 | 300 s | 240 s |
| Suhu Mixing 5 | 105 | 300 s | 240 s |

Tabel 4.4 Variasi suhu pencampuran lelehan panas

Komposisi PVC yang dipakai adalah 100 phr dengan DOP dan DEDB masing-masing 35 phr. *Stabilizer* yang dipakai sebanyak 1.75 phr. Pencampuran lelehan panas dilakukan pada temperatur antara 105 °C-165 °C. Putaran rotor adalah 100 rpm dan *hot press* dilakukan pada suhu 175 °C selama 240 detik.

Berikut (grafik 4.3) merupakan hasil tes tarik mikro yang dilakukan pada *dog bone* hasil hot pressing.



Grafik 4.3 Tegangan-regangan variasi suhu pencampuran lelehan panas

Grafik 4.3 menunjukkan sampel-sampel produk PVC memiliki sifat viskoelastis non-linear. Sifat viskoelastis ini berlaku pada sampel proses suhu 105 °C, 120 °C, 135 °C,

dan 150 °C. Sifat viskoelastis non-linear menunjukkan bahwa dengan tegangan konstan yang diberikan pada sampel tarik, maka regangan yang terjadi pada sampel sifatnya tidak konstan dan terjadi perubahan besar regangan. Perubahan besar regangan pada sampel menunjukkan perbedaan wilayah elastis dan plastis pada sampel PVC *compounding* tersebut. Titik tegangan luluhnya (*yield strength*) didapat pada saat regangan mulai menurun secara perlahan. Setelah melewati titik ini rantai-rantai polimer di dalam sampel PVC melakukan reorientasi ulang dan mengalami deformasi plastis. Setelah melewati titik ini, bila tegangan yang diberikan pada sampel dihilangkan maka sampel tidak dapat kembali ke bentuk awalnya.

Proses pencampuran lelehan panas PVC pada suhu 165° C secara umum menunjukkan sifat viskoelastis linier. Hal ini terlihat dari grafik tegangan regangannya yang membentuk garis lurus. Garis lurus pada grafik tersebut menunjukkan bahwa ada hubungan yang proporsional pada tegangan yang diberikan dengan regangan yang terjadi. Hal ini dimungkinkan karena hasil pencampuran memiliki tingkat distribusi dan dispersi yang baik ^[5]. Dari hasil grafik yang menunjukkan sifat viskoelastis linier pada suhu 165 ° C menunjukkan bahwa kenaikan suhu meningkatkan tingkat distribusi dan dispersi dari campuran produk PVC . Akan tetapi, berdasarkan teori mekanisme pemecahan benang cairan ^[13], ada titik suhu optimum di mana viskositas dari PVC menjadi terlalu rendah sehingga tidak memungkinkan terjadinya proses dispersi campuran pada produk PVC ^[13]. Berdasarkan literatur ^[11], titik suhu optimum campuran produk PVC dengan formulasi yang sama dengan eksperimen adalah pada ranah suhu 250° C ^[11].

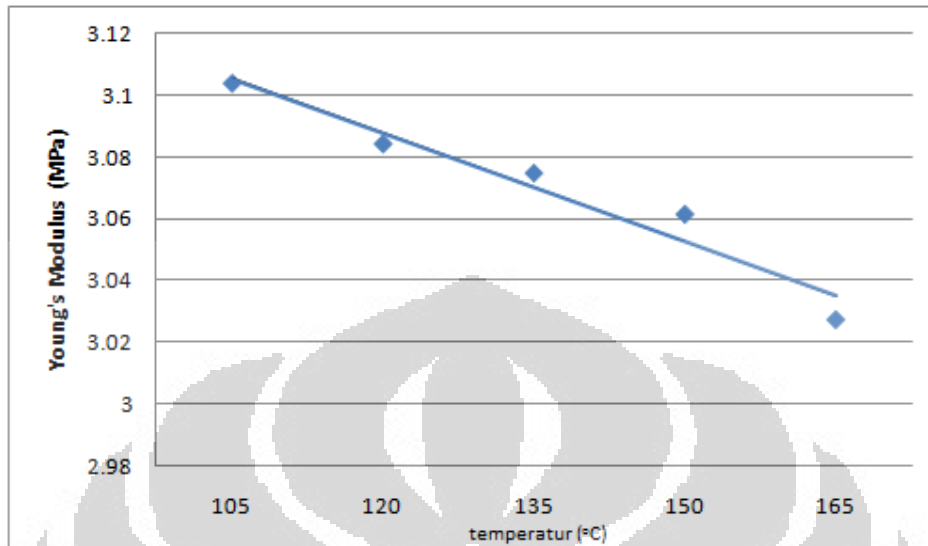
| Percobaan | Stiffness (N/m) | Young's Modulus (MPa) | Tensile Strength (MPa) | Stress at Yield (MPa) |
|---------------|-----------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Suhu Mixing 1 | 949,93 | 3,03 | 12,32 | 2,56 |
| Suhu Mixing 2 | 945,94 | 3,06 | 11,69 | 2,59 |
| Suhu Mixing 3 | 1072,29 | 3,07 | 10,77 | 2,66 |
| Suhu Mixing 4 | 992,48 | 3,08 | 10,40 | 2,68 |
| Suhu Mixing 5 | 934,86 | 3,10 | 12,65 | 2,70 |

Tabel 4.5 Data hasil pengujian tarik mikro variasi proses suhu

Tabel 4.5 menunjukkan nilai hasil dari uji tarik mikro yang dilakukan pada produk PVC dengan variasi suhu yang berbeda-beda. Dapat dilihat bahwa modulus elastisitas dan kekuatan luluh (*stress at yield*) dari produk PVC memiliki kecenderungan menurun seiring dengan kenaikan suhu proses pencampuran lelehan panas. Penurunan ini mengindikasikan bahwa dengan menaikkan suhu proses pencampuran lelehan panas, fleksibilitas dari produk akhir PVC dapat meningkat. Peningkatan fleksibilitas tidak lepas dari tingkat distribusi dan dispersi *plasticizer* yang ada di dalam produk PVC [13].

Teori yang dapat menjelaskan peningkatan fleksibilitas dengan kenaikan suhu pencampuran lelehan panas adalah teori pelumasan [3]. Pada awalnya, resin polimer mempunyai kekerasan yang muncul dari friksi intermolekul yang mengikat rantai-rantai polimer menjadi *rigid network*. Saat pemanasan terjadi ikatan friksi intermolekul pada rantai polimer ini melemah membuat *plasticizer* dapat melumasi rantai-rantai yang tadinya berikatan dan memiliki friksi. Makin tinggi suhu pencampuran lelehan panas maka tingkat dispersi dan distribusi pencampuran akan menjadi lebih baik dan mengakibatkan makin banyak rantai-rantai polimer yang dapat dilumasi oleh *plasticizer*. Pada saat material polimer sudah dingin kembali, rantai polimer sudah memiliki lapisan tipis *plasticizer* yang melindungi rantai-rantai polimer dari friksi dan terbentuknya lagi “jaringan” (*network*).

Teori lain yang dapat menjelaskan turunnya modulus elastisitas seiring dengan naiknya suhu pencampuran lelehan panas adalah teori pencampuran [5]. Kenaikan suhu pada pencampuran memberikan tingkat distribusi dan dispersi yang lebih baik, sehingga campuran sampel akan lebih homogen. Campuran sampel yang mempunyai tingkat homogenitas lebih baik mempunyai nilai modulus elastisitas yang lebih rendah karena *plasticizer* yang dipakai dapat bekerja optimal dengan mengisi ruang kosong di antara rantai polimer PVC yang terbentuk.



Grafik 4.4 Hubungan modulus Young's dengan suhu proses pencampuran lelehan panas

Dari grafik 4.4 dapat dilihat nilai modulus elastisitas dari sampel yang menurun seiring dengan makin tingginya suhu pencampuran lelehan panas. Hal ini menunjukkan bahwa besar suhu yang dipakai pada pencampuran lelehan panas akan mempengaruhi tingkat fleksibilitas dan elastisitas dari sampel PVC. Makin tinggi suhu yang dipakai maka modulus elastisitas dari sampel PVC akan semakin rendah. Sebagai perbandingan sampel PVC dengan suhu proses panas 105 °C mempunyai nilai E sebesar 3.10 MPa. Sedangkan sampel yang diproses pada suhu 160 °C mempunyai nilai E sebesar 3.03 MPa.

Kecenderungan menurunnya nilai modulus elastisitas seiring dengan naiknya suhu proses pencampuran lelehan panas ini berarti sudah sesuai dengan teori yang sudah ada. Untuk suhu optimum pencampuran sendiri belum dapat ditentukan. Literatur ^[11] melaporkan suhu optimum campuran produk PVC dengan formulasi yang sama dengan eksperimen adalah sekitar 250 °C sebelum mengalami degradasi.

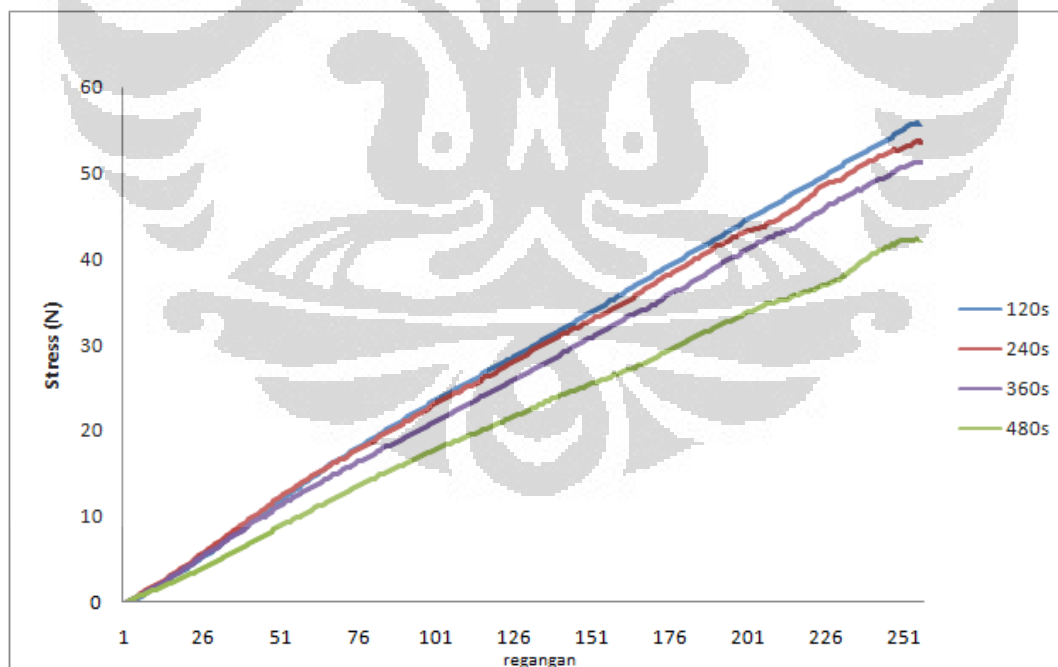
4.2.3 Pengaruh Waktu Pencampuran Lelehan Panas

Tabel 4.7 menunjukkan data rerata hasil pengujian tarik mikro dari variasi waktu pencampuran. Tabel 4.6 menunjukkan lama waktu pencampuran lelehan panas yang dipakai.

| Percobaan | Waktu Dry Mixing | Waktu Hot Mixing | Putaran rotor (rpm) |
|---------------|------------------|------------------|---------------------|
| Lama Mixing 1 | 300 s | 120 s | 100 |
| Lama Mixing 2 | 300 s | 240 s | 100 |
| Lama Mixing 3 | 300 s | 360 s | 100 |
| Lama Mixing 4 | 300 s | 480 s | 100 |

Tabel 4.6 Variasi waktu mixing

Pada studi pengaruh waktu pencampuran ini, eksperimen dilakukan dengan komposisi PVC 100 phr, DOP 50 phr, dan DEDB 20 phr. Pencampuran lelehan-panas dilakukan pada temperatur 150 °C dengan putaran rotor 100 rpm.



Grafik 4.5 Tegangan-regangan waktu pencampuran lelehan panas

Grafik 4.5 menunjukkan bahwa sampel produk PVC memiliki sifat viskoelastis non-linear karena regangan yang dihasilkan oleh pengaruh lama pencampuran, tidak bersifat tetap atau konstan. Perubahan regangan yang relatif besar mengindikasikan perubahan dari deformasi elastis dan plastis yaitu titik tegangan luluh (*yield strength*). Setelah melewati titik ini rantai-rantai polimer di dalam sampel PVC melakukan reorientasi ulang dan mengalami deformasi plastis. Setelah melewati titik ini, bila tegangan yang diberikan pada sampel dihilangkan maka sampel tidak dapat kembali ke bentuk semula.

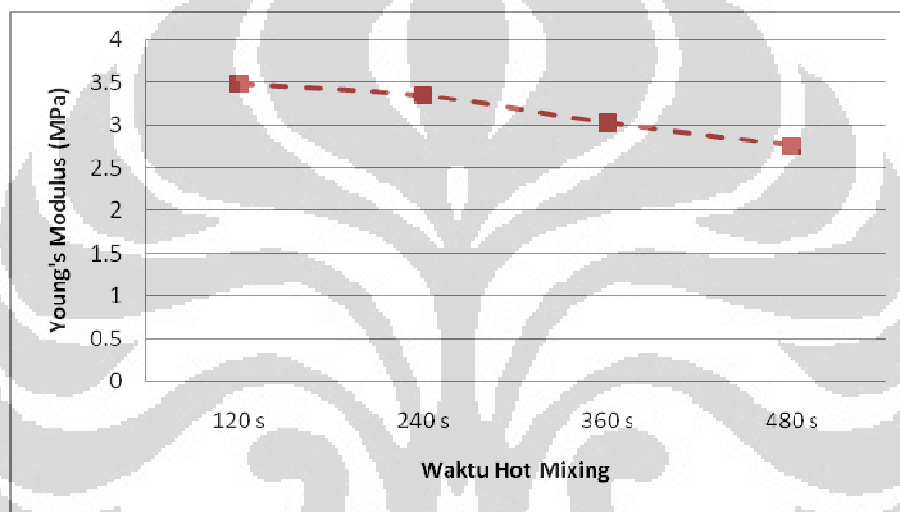
Berdasarkan grafik 4.5 dapat disimpulkan bahwa penambahan waktu pencampuran lelehan panas akan memberikan penurunan kekuatan tarik (*tensile strength*) dan kekuatan luluh (*yield strength*) dari sampel PVC. Hal ini dimungkinkan oleh tegangan geser antara PVC dan aditif (*plasticizer*) yang lebih besar dengan penambahan waktu pencampuran lelehan panas. Kondisi menghasilkan sampel produk PVC dengan tingkat distribusi dan dispersi yang lebih baik. Hal ini sesuai dengan teori mekanisme pemecahan benang cairan^[13] di mana faktor waktu berhubungan eksponensial dengan amplitudo dari gelombang sinusoidal yang akan memutuskan benang cairan *plasticizer*. Pemutusan benang cairan *plasticizer* menghasilkan ukuran partikel *plasticizer* yang lebih kecil yang selanjutnya dapat menghasilkan tingkat dispersi yang lebih baik. Aglomerasi dari *plasticizer* akan berkurang dan setelah itu karena proses waktu yang lama viskositas akan turun (sifat cairan non-Newtonian) sehingga menghasilkan tingkat distribusi yang lebih baik di dalam produk PVC. Fenomena ini menjelaskan penurunan nilai kekuatan tarik dan kekuatan luluh dari produk PVC yang dihasilkan.

| Percobaan | Stiffness (N/m) | Young's Modulus (MPa) | Tensile Strength (MPa) | Stress at Yield (MPa) |
|---------------|-----------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Lama Mixing 1 | 1017,05 | 3,49 | 11,23 | 2,63 |
| Lama Mixing 2 | 984,29 | 3,35 | 11,13 | 2,63 |
| Lama Mixing 3 | 912,69 | 3,03 | 11,39 | 2,60 |
| Lama Mixing 4 | 867,96 | 2,76 | 11,03 | 2,25 |

Tabel 4.7 Data hasil pengujian tarik mikro variasi waktu pencampuran lelehan panas

Tabel 4.7 secara umum menunjukkan seluruh sifat yang diujikan mengalami penurunan dengan penambahan waktu pencampuran lelehan panas produk PVC . Penurunan

modulus elastisitas dan kekuatan luluh (*yield strength*) sangat dimungkinkan oleh proses pencampuran *plasticizer* yang baik. Penurunan sifat mekanis ini terjadi karena *plasticizer* bertindak sesuai dengan teori-teori kerja *plasticizer* pada polimer ^[3]. Berdasarkan eksperimen, waktu pencampuran lelehan panas memiliki titik optimum terhadap modulus elastisitas. Hal ini dimungkinkan karena setelah melewati titik tersebut distribusi dan dispersi pada sampel produk PVC sudah mencapai titik optimum sehingga tidak terjadi penurunan modulus elastisitas lagi.



Grafik 4.6 Hubungan modulus young's dengan lama waktu pencampuran lelehan panas

Grafik 4.6 menunjukkan lama waktu *hot mixing* memberikan penurunan modulus elastisitas. Seharusnya penurunan modulus elastisitas yang terjadi tidak terlalu signifikan jika sudah melewati waktu optimum. Hal ini disebabkan waktu pencampuran lelehan panas yang dilakukan pada produk PVC sudah optimum. Fenomena ini dikuatkan literatur ^[15]. Literatur ini melaporkan bahwa waktu pencampuran panas optimum adalah sekitar 3 menit pada suhu 93 °C dan putaran rotor 63 rpm. Akan tetapi, penelitian ini menghasilkan waktu optimum pencampuran hingga lebih dari 3 menit. Hal ini dimungkinkan karena adanya *plasticizer* DEDB dalam sistem campuran.

Bab 5

Kesimpulan

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Studi penggantian DOP dengan DEDB menunjukkan bahwa DEDB dapat menggantikan fungsi DOP sebagai *plasticizer* akan tetapi, masih perlu dilakukan penelitian yang lebih lanjut
- faktor-faktor penentu berhasilnya suatu proses plastisasi adalah komposisi dari PVC dan *plasticizer* (DEDB dan DOP), proses pencampuran kering, proses pencampuran lelehan panas, dan kondisi dari sistem pada waktu proses berlangsung
- keberhasilan proses plastisasi dapat ditentukan dengan menurunnya modulus elastisitas dari produk PVC
- pengamatan morfologi patahan lintang dan uji mekanis dari sampel produk PVC menunjukkan kenaikan suhu dapat meningkatkan distribusi dan dispersi dari sampel produk PVC

Referensi

1. *Green Paper Environmental issues of PVC*. 2000. Commission of European Communities. Brussels
2. Charles A. Harper & Edward M. Petrie, 2003. *Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
3. *PT.Vinyl Monomer Chemical Short Course on PVC and its General Characteristics*. Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Depok. 2010
4. Thornton, Ph.D, Joe. *Environmental Impact of PVC Building Material*. Columbia University.
5. Harper, CA. 1999. *Modern Plastics Handbook*. McGraw-Hill
6. *Towards the Development of Green Plasticizers*. Cooper, David, et all. 13th annual Green Chemistry and Engineering Conference. 2009
7. *DEDB Robust Summary*. 2001. Velsicol Chemical Corporation. Rosemont, Illinois
8. Carraher, Jr. Charles. 2003. *Polymer Chemistry, 6th ed*. Dekker, Marcell
9. M. Iqbal Hasanudin, 2008. *Kajian Dampak Penggunaan Plastik PVC terhadap Lingkungan dan Alternatifnya di Indonesia*. Tesis S2 – Program Studi Ilmu Lingkungan – Program Pascasarjana Universitas Indonesia.
10. *Benzoate Plasticizer for Flexible PVC Injection Moulded Toy Applications. Plastic and Compounding*. 2001
11. Burgos, Nuria. *Degradation of poly(vinyl chloride) plasticized with non-phthalate plasticizers under sterilization conditions*. 2009. University of Alicante, Analytical Chemical Department. Alicante, Spain
12. Crawford, R.J. 2002. *Plastic Engineering 3rd edition*. Bury St. Edmund. Butterworth Heinmann.
13. Gotsis, Alexander D. 1991. *Diktaat Polymeerkunde II*. Faculteit der Scheikundige Technologie en der Materiaalkunde. TU Delft
14. Rausch, Maurice K. 1969. *Secondary Plasticizer for Thermoplastic non-Rubbery Polymers*. Delaware. United States Patent Office.

15. O'Connel, Paula. Et all. 2005 *Encyclopedia of Polymer Science and Technologies*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
16. <http://www.almaden.ibm.com/st/chemistry/ps/dissolution/solubilityparameters/S-PM.pdf> diakses pada 3 Mei 2012 7.29 WIB
17. <http://www.adhesivemag.com/articles/dibenzoate-platicizers-offer-a-safer-viable-solution-to-phthalates> diakses pada 3 Mei 7.29 WIB

