

**MIGRASI DIOKTIL FTALAT DAN ETILEN GLIKOL  
KE DALAM STRUKTUR POLIURETAN  
DENGAN PEMANJANG RANTAI DIAMINA AROMATIK  
DAN PENGARUHNYA TERHADAP KINERJA MATERIAL**

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk  
Memperoleh gelar Magister Sains**



Oleh:


Yophi Yulindo

0606001084

**PROGRAM PASCASARJANA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU MATERIAL  
UNIVERSITAS INDONESIA  
JAKARTA  
2008**


## LEMBAR PERSETUJUAN

Tesis dengan judul "Migrasi dioktil ftalat dan etilen glikol ke dalam struktur poliuretan dengan pemanjang rantai diamina aromatik dan pengaruhnya terhadap kinerja material" ini telah disetujui oleh:



**Dr. Emil Budianto**

Pembimbing

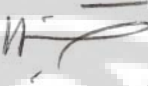


**Dr. Azwar Manaf, M. Met**

Penguji I

**Dr. Muhammad Hikam**

Penguji II



**Dr. Budhy Kurniawan**

Penguji III

Mengetahui,

Ketua Program Studi Pasca Sarjana Ilmu Material  
Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia



**Dr. Bambang Soegitono**

**Migrasi dioktil ftalat dan etilen glikol ke dalam struktur poliuretan dengan pemanjang rantai diamina aromatik dan pengaruhnya terhadap kinerja material**

**ABSTRAK**

Penelitian ini mempelajari migrasi dioktil ftalat dan etilen glikol ke dalam struktur poliuretan dengan pemanjang rantai diamina aromatik MCDEA (Benzamina-4,4'-metilena-bis[3-kloro-2,6-dietil]). Interaksi molekuler antara dioktil ftalat dan etilen glikol dengan material poliuretan diperkirakan berdasarkan data percobaan sorpsi dan desorpsi pada temperatur 25, 45 dan 65°C. Pengaruh sorpsi dioktil ftalat dan etilen glikol terhadap sifat mekanik, perilaku termal dan morfologi poliuretan dipelajari melalui hasil pengukuran kuat tarik, kekerasan, DSC dan SEM. Hasil yang diperoleh menunjukkan adanya suatu mekanisme sorpsi yang berbeda antara kedua jenis zat yang dipengaruhi oleh polaritas molekulnya. Dioktil ftalat yang merupakan molekul dengan kepolaran rendah lebih cenderung bermigrasi ke dalam segmen lunak, sedangkan etilen glikol yang jauh lebih polar cenderung bermigrasi ke dalam segmen keras. Sorpsi dioktil ftalat dan etilen glikol pada temperatur 25°C tidak mempengaruhi kinerja poliuretan. Sedangkan pada temperatur 65°C terjadi penurunan kuat tarik dan kekerasan poliuretan. Penurunan kekuatan tarik terbesar terjadi pada sampel poliuretan yang terpapar etilen glikol pada temperatur 65°C. Adanya interaksi molekuler antara dioktil ftalat dan etilen glikol dengan poliuretan juga ditunjukkan oleh penurunan temperatur transisi gelas ( $T_g$ ) dan temperatur leleh ( $T_m$ ).

Kata kunci: Poliuretan, MCDEA, sorpsi, dioktilftalat, etilen glikol

**Migration of dioctyl phtalate and ethylene glycol into polyurethane structure  
with aromatic diamine chain extender and the effects thereof on material  
performance**

**ABSTRACT**

Migration of dioctyl phtalate and ethylene glycol into polyurethane structure with aromatic diamine as the chain extender MCDEA (Benzamine-4,4'-methylene-bis[3-chloro-2,6-diethyl]) is studied. The molecular interaction between dioctyl phtalate and ethylene glycol with polyurethane material is predicted on the basis of sorption and desorption experimental data at 25, 45 and 65°C. Sorption effect of dioctyl phtalate and ethylene glycol to mechanical properties, thermal behaviour and morphology of polyurethane are studied through the results of tensile strenght, hardness, DSC and SEM measurments. These results show the presence of different sorption mechanism from the two substances that are affected by the polarity of molecules thereof. Dioctyl phtalate which is a less polar molecule, tends to migrate into soft segment, while etylene glycol which is an even more polar molecule, tends to migrate into hard segment. Sorptions of dioctyl phtalate and ethylene glycol at 25°C do not affect the performance of polyurethane. However, at 65°C the tensile strenght and hardness of polyurethanes is decreasing. The biggest decreasing of tensile strenght occurs on polyurethane samples that were subjected to ethylene glycol at 65°C. The presence of molecular interaction between dioctyl phtalate and ethylene glycol with polyurethane are also indicated by the decrease of glass transition temperature (Tg) and melting temperature (Tm).

Keywords: Polyurethane, MCDEA, sorption, dioctyl phtalate, ethylene glycol

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur saya haturkan kehadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, karena atas kemudahan dan pertolonganNya penelitian dan penulisan tesis ini bisa saya selesaikan. Atas pertolonganNya jugalah saya mendapat banyak kemudahan dalam menjalani perkuliahan hingga saat ini.

Pertama saya mengucapkan terimakasih kepada bapak Dr. Emil Budianto yang telah bersedia meluangkan waktunya menjadi dosen pembimbing sekaligus memberikan saran dan perbaikan selama penelitian dan penulisan tesis. Kepada Bapak-bapak Dosen di Ilmu Material Salemba (Pak Bambang, Pak Azwar, Pak Hikam, Pak Suharjo, Pak Budhy dan Pak Joko), saya mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya atas ilmu yang telah Bapak-bapak ajarkan kepada kami. Tidak lupa kepada para staf tata usaha di salemba (Bpk.Suroto, Ibu Siti, Ibu Lily) saya ucapkan terimakasih atas bantuan dan informasi-informasinya.

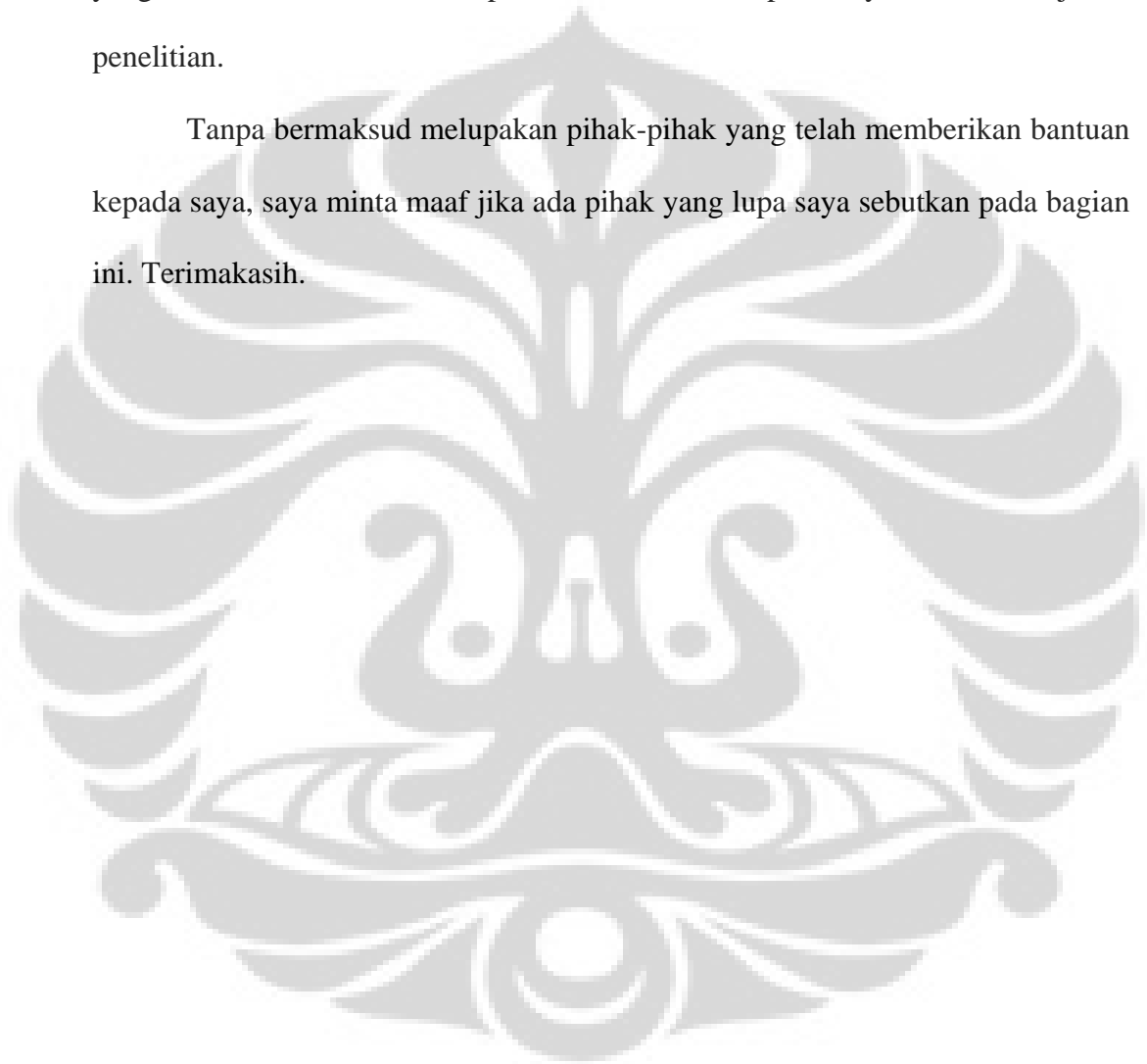
Kepada Bunda Dewi dan Kaka Jania yang telah memberikan dukungan yang sangat besar selama Ayah kuliah hingga menulis tesis ini, *thank you so much for everything! Your love and care have just brought me to this point. I'm just not sure I would be able to work things out without both of you. Thank God I've got you!* Kepada Papa, Papap, Mama, Mamah, Ma Adang dan Om Nad terimakasih banyak untuk doa dan bantuannya.

Kepada Nanda dan Fean, terimakasih atas segala kebaikannya untuk mencarikan dan mengirimkan artikel-artikel tentang poliuretan yang saya gunakan sebagai literatur rujukan dalam penelitian ini. Kepada teman-teman angkatan 2006 Ilmu Material (Amal, Gadang, Johannes, Adi, Mas Julius, Mas Budi, Pak

Burmawi, Pak Pratikto, Andhika, Mba Yunita, Witha, Ibu Tuti dan yang lainnya) terimakasih telah menjadi teman-teman yang baik selama perkuliahan, teman menjalani hari Sabtu yang panjang.

Tak lupa saya ucapkan terimakasih kepada PT Voith Paper Rolls Indonesia yang telah memberikan kesempatan dan bantuan kepada saya selama menjalani penelitian.

Tanpa bermaksud melupakan pihak-pihak yang telah memberikan bantuan kepada saya, saya minta maaf jika ada pihak yang lupa saya sebutkan pada bagian ini. Terimakasih.



## DAFTAR ISI

	Halaman
Lembar Persetujuan	i
Abstrak	ii
Kata Pengantar	iv
Daftar isi	vi
Daftar gambar	viii
Daftar tabel	xi
Daftar lampiran	xii
Bab I. Pendahuluan	1
Bab II. Teori Dasar	6
II.1 Kimia Poliuretan	6
II.1.1 Isosianat	8
II.1.2 Polioli	11
II.1.3 Pemanjang rantai ( <i>chain extender</i> )	13
II.1.4 Keterkaitan struktur dan sifat poliuretan	14
II.2 Migrasi molekul organik ke dalam struktur poliuretan	15
II.3 <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC)	17
II.4 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	18
II.5 Dioktil Ftalat (DOP) dan Etilen Glikol (EG)	20
II.5.1 Diokti Ftalat (DOP)	20
II.5.2 Etilen Glikol	21
Bab III. Metode Penelitian	23

III.1	Preparasi Material Poliuretan	23
III.2	Tempat dan Waktu Penelitian	24
III.3	Sorpsi Dioktil Ftalat dan Etilen Glikol	24
III.4	Desorpsi Dioktil Ftalat dan Etilen Glikol	26
III.5	Karakterisasi	27
III.5.1	DSC	27
III.5.2	SEM	28
III.5.3	Sifat mekanik poliuretan	28
Bab IV.	Hasil dan Pembahasan	31
IV.1	Sorpsi Dioktil ftalat dan Etilen Glikol	31
IV.1.1	Perbandingan Hasil Sorpsi Dioktil ftalat dengan Etilen Glikol	31
IV.1.2	Sorpsi dioktil ftalat, etilen glikol dan Air pada berbagai temperatur	37
IV.2	Desorpsi Dioktil ftalat dan Etilen Glikol	41
IV.3	Hasil dan Analisis Pengukuran <i>Differential Scanning Calorimetry</i>	45
IV.4	Hasil Pengukuran Scanning Electron Microscopy (SEM)	49
IV.5	Perubahan sifat mekanik poliuretan akibat sorpsi dioktil ftalat dan etilen glikol	54
Bab V.	Kesimpulan	60
	Daftar Acuan	61
	Lampiran	63
Lampiran 1	Data percobaan sorpsi dan desorpsi	63
Lampiran 2	Data termogram DSC	66
Lampiran 3	Data Pengukuran uji mekanik dan kekerasan	69



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Distribusi penggunaan produk poliuretan di Amerika Serikat tahun 1995	1
Gambar 2. Reaksi umum pembentukan poliuretan	6
Gambar 3. Jaringan ikat silang antara segmen lunak dan keras	9
Gambar 4. Beberapa jenis pemanjang rantai dalam industri poliuretan	14
Gambar 5. Skema Alat DSC	18
Gambar 6. Prinsip Kerja <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	19
Gambar 7. Struktur Kimia Dioktil Ftalat dan Etilen Glikol	21
Gambar 8-9. Poliuretan hasil pencetakan dan yang telah dipotong 30 mm x 30 mm	23
Gambar 10. Wadah tertutup untuk percobaan sorpsi dan desorpsi	25
Gambar 11. Oven termostatik untuk percobaan 45 dan 65 °C	25
Gambar 12. Timbangan analitis untuk penimbangan sampel	26
Gambar 13-15. Alat pemotong dan sampel untuk Uji tarik	28
Gambar 16-17. Alat <i>tensile tester</i> Zwick Z010N	29
Gambar 18. Tecklock shoreA meter	29
Gambar 19. Perlakuan Sampel uji tarik dengan DOP atau EG	30
Gambar 20. Grafik sorpsi dioktil ftalat dan etilen glikol pada berbagai Temperatur	31
Gambar 21. Struktur DOP dan EG	33
Gambar 22. Struktur material poliuretan dengan komponen prepolimer MDI-PTMEG dan diamina aromatik MCDEA	33

Gambar 23.	Ilustrasi ikatan hidrogen dalam struktur poliuretan	34
Gambar 24.	Grafik sorpsi dioktil ftalat pada berbagai temperatur	38
Gambar 25.	Grafik sorpsi etilen glikol pada berbagai temperatur	40
Gambar 26.	Grafik sorpsi Air pada berbagai temperatur	41
Gambar 27.	Grafik Percobaan Desorpsi Dioktil ftalat dan Etilen Glikol pada 25°C	42
Gambar 28.	Grafik Percobaan Desorpsi Dioktil ftalat dan Etilen Glikol pada 45°C	43
Gambar 29.	Grafik Percobaan Desorpsi Dioktil ftalat dan Etilen Glikol pada 65°C	43
Gambar 30.	Grafik Percobaan Desorpsi Dioktil ftalat pada berbagai temperatur	44
Gambar 31.	Grafik Percobaan Desorpsi Etilen Glikol pada berbagai temperatur	45
Gambar 32.	Termogram sampel poliuretan standar	48
Gambar 33.	Hasil Pengukuran SEM sampel standar dengan 250x perbesaran	50
Gambar 34.	Hasil Pengukuran SEM sampel standar dengan 500x perbesaran	50
Gambar 35.	Hasil Pengukuran SEM sampel EG-25 dengan 250x perbesaran	51
Gambar 36.	Hasil Pengukuran SEM sampel EG-25 dengan 500x perbesaran	52
Gambar 37.	Hasil Pengukuran SEM sampel EG-65 dengan 250x perbesaran	52
Gambar 38.	Hasil Pengukuran SEM sampel EG-65 dengan 500x perbesaran	52
Gambar 39.	Hasil Pengukuran SEM sampel DF-25 dengan 250x perbesaran	53
Gambar 40.	Hasil Pengukuran SEM sampel DF-25 dengan 500x perbesaran	53
Gambar 41.	Hasil Pengukuran SEM sampel DF-65 dengan 500x perbesaran	54
Gambar 42.	Grafik hasil pengukuran kuat tarik, % elongasi sampel poliuretan	57

Gambar 43.	Termogram sampel poliuretan dengan perlakuan sorpsi etilen glikol pada 25°C	66
Gambar 44.	Termogram sampel poliuretan dengan perlakuan sorpsi etilen glikol pada 65°C	66
Gambar 45.	Termogram sampel poliuretan dengan perlakuan sorpsi DOP pada 25°C	67
Gambar 46.	Termogram sampel poliuretan dengan perlakuan sorpsi DOP pada 65 °C	67
Gambar 47.	Termogram sampel poliuretan dengan perlakuan sorpsi air pada 25°C	68

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Penggunaan produk-produk poliuretan di Amerika Serikat pada tahun 2004	2
Tabel 2. Format seperti tabel untuk percobaan sorpsi	26
Tabel 3. Format seperti tabel untuk percobaan desorpsi	27
Tabel 4. Rangkuman hasil pengukuran DSC dari sampel poliuretan	48
Tabel 5. Hasil pengukuran kuat tarik (tensile strength), % elongasi dan kekerasan	57
Tabel 6. Data Percobaan sorpsi pada temperatur 25°C	63
Tabel 7. Data Percobaan sorpsi pada temperatur 45°C	63
Tabel 8. Data Percobaan sorpsi pada temperatur 65°C	64
Tabel 9. Data Percobaan desorpsi pada temperatur 25°C	64
Tabel 10. Data Percobaan desorpsi pada temperatur 45°C	65
Tabel 11. Data Percobaan desorpsi pada temperatur 65°C	65

## DAFTAR LAMPIRAN

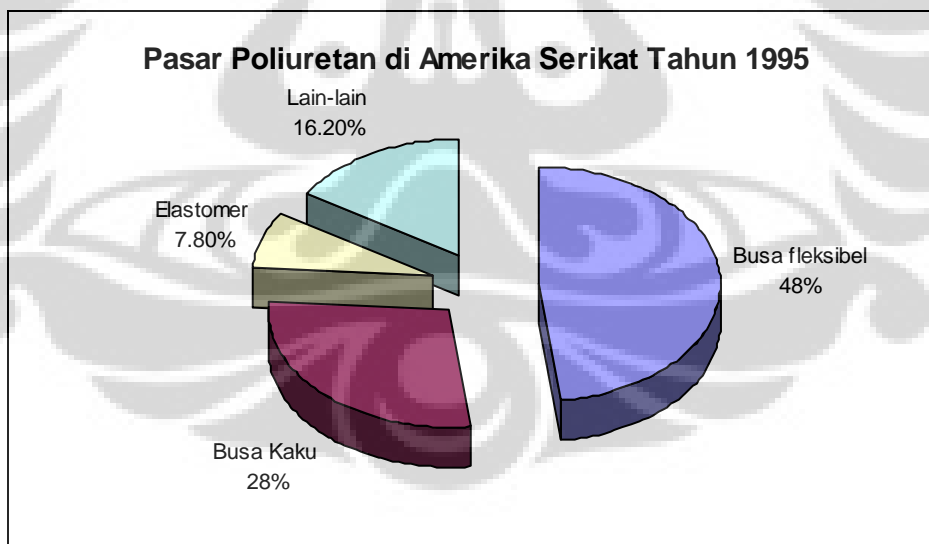
	Halaman
Lampiran 1 Data percobaan sorpsi dan desorpsi	63
Lampiran 2 Data termogram DSC	66
Lampiran 3 Data Pengukuran uji mekanik dan kekerasan	69



## BAB 1

### PENDAHULUAN

Sejak pertama kali ditemukan oleh ilmuwan asal Jerman bernama Otto Bayer pada tahun 1937 di laboratorium I.G. Farben, di Leverkusen, Jerman, saat ini poliuretan telah menjadi salah satu primadona industri polimer. Hal ini dikarenakan polimer ini memiliki nilai komersial yang tinggi karena aplikasinya yang sangat luas.<sup>1,2</sup> Secara umum penggunaan poliuretan di pasar dunia bisa dikelompokkan menjadi 4 jenis bentuk produk yaitu busa fleksibel, busa kaku, elastomer dan produk lain seperti serat spandex. Di Amerika Serikat pada tahun 1995 penggunaan poliuretan telah mencapai 3,6 milyar pound atau sekitar 1,62 milyar kg. Distribusi bentuk material yang digunakan adalah seperti ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 1 di bawah ini<sup>1</sup>.



**Gambar 1. Distribusi penggunaan produk poliuretan di Amerika Serikat tahun 1995**

Secara keseluruhan, kebutuhan dunia terhadap poliuretan pada tahun 1995 mencapai 16 milyar pound atau 7,2 milyar kg. Meskipun secara volume

kebutuhan pasar terhadap produk-produk poliuretan masih lebih kecil jika dibandingkan dengan polimer lain seperti polietilena, PVC, polipropilena dan polistirena, grafik permintaannya terus meningkat dari waktu ke waktu.

Tabel I di bawah ini menggambarkan prosentase jumlah dari penggunaan produk-produk yang dibuat dari poliuretan di Amerika Serikat pada tahun 2004 dimana kebutuhan pasar telah meningkat menjadi 5,4 milyar pound. Berarti dalam satu dasawarsa telah terjadi peningkatan kebutuhan pasar terhadap poliuretan sebanyak 50%.<sup>2</sup>

**Tabel 1. Penggunaan produk-produk poliuretan di Amerika Serikat pada tahun 2004**

<b>Aplikasi</b>	<b>Jumlah poliuretan yang digunakan (juta pon)</b>	<b>Prosentase total</b>
Bangunan & konstruksi	1.298	23,8%
Transportasi	1.298	23,8%
Furnitur & Tempat tidur	1.127	20,7%
Peralatan	278	5,1%
Kemasan	251	4,6%
Tekstile, Serat & Pakaian	181	3,3%
Permesinan & Pengecoran	178	3,3%
Elektronik	75	1,4%
Alas kaki	39	0,7%
Penggunaan lainnya	558	10,2%
<b>Total</b>	<b>5.444</b>	<b>100,0%</b>

Seiring dengan terus meningkatnya kebutuhan dunia terhadap poliuretan, penelitian tentang poliuretan juga terus dikembangkan menurut bidang aplikasinya. Belakangan poliuretan digunakan untuk keperluan medis. Hal yang melatarbelakangi penggunaan poliuretan dalam bidang medis adalah karena sifatnya yang kuat, biokompatibel dan hemokompatibel sehingga dapat dipakai menjadi menjadi alat-alat medis.<sup>3</sup>

Poliuretan yang merupakan polimer tersegmentasi atas segmen keras dan segmen lunak memberikan pilihan yang tak terbatas kepada para pakar alat-alat medis untuk memformulasi produk mereka. Segmen lunak pada poliuretan merupakan molekul yang memiliki rantai panjang sehingga memberikan kelenturan kepada material. Sedangkan segmen kerasnya dihasilkan dari isosianat dan pemanjang rantai (*chain extender*) yang memberikan kekuatan tarik kepada polimer. Berikut ini merupakan beberapa jenis poliuretan cocok dan yang bisa dimanfaatkan dalam aplikasi medis;<sup>3</sup>

- poliuretan cair untuk *hollow-fiber devices*
- poliuretan untuk dipmolding
- poliuretan coating
- biostable poliuretan
- poliuretan termoplastis

Penelitian tentang sintesis poliuretan dari berbagai jenis komponen penyusun poliuretan terus berlangsung hingga saat ini. Seiring dengan itu, salah satu sifat poliuretan yang terus dipelajari adalah interaksi antara material poliuretan dengan molekul-molekul kecil baik itu organik ataupun non organik yang bermigrasi ke dalam strukturnya dan bagaimana perubahan sifat kimia, sifat mekanik maupun



sifat termalnya dengan adanya interaksi tersebut. Hal ini sangat menarik karena pada aplikasinya material poliuretan akan berinteraksi dengan berbagai material pada berbagai kondisi sehingga material poliuretan perlu dirancang sesuai dengan kebutuhan. Cukup banyak penelitian telah dipublikasikan sejauh ini tentang interaksi poliuretan dengan molekul-molekul pelarut.

Gupta *et al.* Mempelajari bagaimana pengaruh paparan beberapa pelarut organik (PTHF, heksana, benzena dan 1,4 dioksan) terhadap poliuretan yang memiliki komponen penyusun polibutadiena dengan ujung hidroksi.<sup>4</sup> Sathiyalekshmi dan Gopalakrishnan melakukan penelitian tentang kinerja poliuretan berbahan baku resin kardanol formaldehid teralkilasi di bawah kondisi *aging*.<sup>5</sup> Schneider *et al.* mempublikasikan hasil penelitian mengenai sorpsi cairan ke dalam elastomer poliuretan. Dalam penelitian tersebut, Schneider *et al.* mempelajari bagaimana pengaruh pemilihan pelarut terhadap sorpsi dan difusi ke dalam struktur poliuretan. Pelarut yang digunakan adalah beberapa jenis hidrokarbon alifatik dan aromatik.<sup>6</sup> Sreenivasan *et al.* mempelajari bagaimana sorpsi beberapa jenis lemak ke dalam poliuretan tersegmentasi. Penelitian ini difokuskan untuk melihat bagaimana pengaruh kandungan segmen keras dalam material poliuretan.<sup>7</sup> Kanapitsas *et al* meneliti bagaimana mobilitas molekuler dan sifat hidrasi dari poliuretan tersegmentasi dengan memvariasikan struktur segmen keras dan segmen lunak dari material poliuretan.<sup>8</sup>

Difusi karakteristik natrium diklofenak pada membran poliuretan dilaporkan oleh Pulat dan Akdogan.<sup>9</sup> Selain itu, McDermott *et al* melakukan penelitian tentang bagaimana pengaruh paparan surfaktan nonoksinol-9 dan polietilen glikol terhadap sifat mekanik lapisan poliuretan.<sup>10</sup> Kemudian, tercatat

pula Swamy *et al* yang melakukan penelitian tentang transpor molekuler beberapa pelarut hidrokarbon dari golongan normal alkana melalui membran poliuretan yang memiliki diol sebagai pemanjang rantainya.<sup>11</sup> Kumar dan Siddaramaiah juga melaporkan hasil penelitian mengenai migrasi pelarut aromatik tersubstitusi ke dalam jaringan polimer poliuretan-polistirena.<sup>12</sup>

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari interaksi poliuretan yang memiliki diamina aromatik sebagai pemanjang rantainya dengan dua jenis pelarut organik yaitu dioktil ftalat dan etilen glikol yang lazimnya digunakan sebagai pelunak atau plastiizer dalam industri plastik. Proses penyerapan kedua molekul organik ini ke dalam struktur poliuretan juga akan dipelajari. Dengan mempelajari perilaku proses sorpsi juga desorpsi maka kemudian dapat diperkirakan bagaimana interaksi molekuler dioktil ftalat dan etilen glikol dengan struktur poliuretan, baik itu segmen keras atau segmen lunaknya. Tujuan lain dalam penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh proses sorpsi dioktil ftalat dan etilen glikol terhadap kinerja mekanik material. Penelitian ini juga akan mempelajari perilaku termal dan morfologi material poliuretan sebelum dan setelah interaksi dengan kedua pelarut.

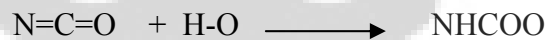
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### II.1 Kimia Poliuretan

Polimer pertama kali ditemukan oleh Otto Bayer pada tahun 1937 sebenarnya mengandung kerancuan dalam namanya. Meskipun memiliki nama poliuretan, tetapi polimer ini tidak dihasilkan dari polimerisasi monomer-monomer uretan, melainkan merupakan jenis polimer yang gugus utamanya adalah ikatan uretan.

Reaksi kimia pembentukan poliuretan pada dasarnya merupakan reaksi organik antara senyawa organik isosianat dengan senyawa lain yang memiliki hidrogen aktif. Secara sederhana, reaksi isosianat dengan hidrogen aktif dituliskan sebagai berikut:<sup>1</sup>



**Gambar 2. Reaksi umum pembentukan poliuretan**

Isosianat juga akan bereaksi dengan amina menghasilkan ikatan urea dan akan bereaksi dengan air menghasilkan asam karbamat yang merupakan intermediat yang tidak stabil dan akan mengalami dekomposisi menjadi karbon dioksida dan amina. Amina yang terbentuk ini kemudian bereaksi kembali dengan isosianat menghasilkan urea tersubstitusi. Sebagai tambahan, sejumlah reaksi ikat silang dapat terjadi, tergantung kepada kondisi reaksi seperti temperatur, keberadaan katalis struktur isosianat, alkohol serta amina yang terlibat. Reaksi ikat silang ini akan menghasilkan ikatan alofonat (reaksi antara uretan dengan

isosianat), biuret (reaksi urea tersubstitusi dengan isosianat) dan isosianurat (trimerisasi isosianat). Isosianat dapat pula terpolimerisasi menghasilkan bentuk dimer (uretin diion), karbodiimida dan nilon. Disini terlihat bahwa poliuretan atau polimer poliuretan urea dan poliurea yang memiliki hubungan sangat dekat merupakan produk hasil reaksi dari isosianat dengan hidrogen aktif (R-OH) atau (R-NH<sub>2</sub>).<sup>1</sup>

Reaksi primer antara isosianat dengan senyawa-senyawa yang memiliki hidrogen aktif terjadi dengan sangat mudah meskipun pada temperatur kamar dengan menghasilkan panas. Jika hasil reaksi yang diharapkan adalah poliuretan dengan rantai linear, maka dibutuhkan penggunaan temperatur rendah. Sedangkan bila yang diharapkan adalah poliuretan dengan derajat ikat silang yang tinggi, melalui adanya reaksi sekunder maka akan dibutuhkan temperatur yang lebih tinggi (100-150 °C).<sup>1</sup>

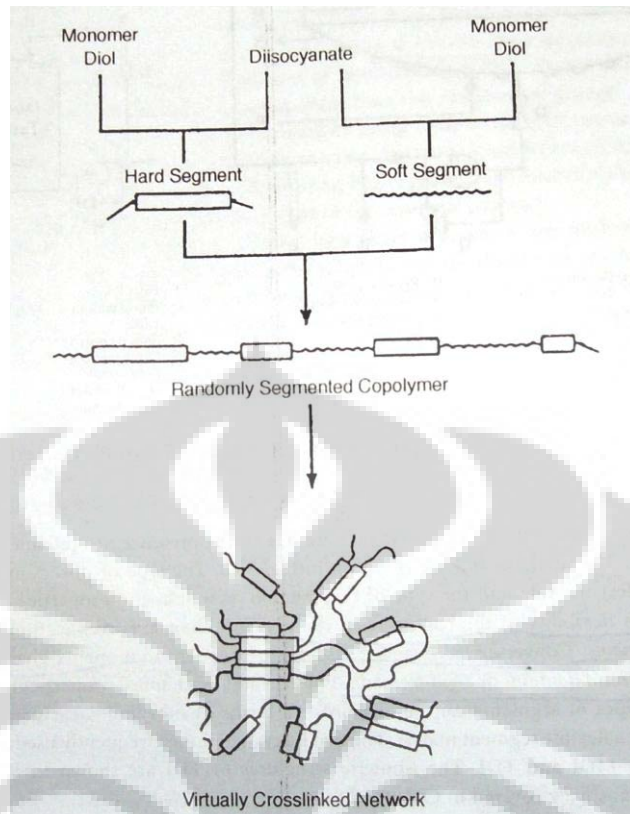
Poliuretan dan poliuretan urea dapat dibuat dengan dua cara. Teknik yang pertama disebut *one shot method* yaitu mencampurkan semua komponen penyusun poliuretan pada saat bersamaan. Teknik kedua disebut metode prapolimer. Teknik ini terdiri dari dua tahap, dimana tahap pertama adalah membuat prapolimer dengan cara mereaksikan polimer yang memiliki terminal hidroksil dengan isosianat yang jumlahnya berlebih, sehingga menghasilkan polimer yang memiliki isosianat sebagai gugus fungsional yang disebut prepolimer. Tahap berikutnya adalah membentuk poliuretan itu sendiri dengan cara mereaksikan prapolimer dengan pemanjangan rantai (*chain extender*) yang terdiri dari senyawa poliol atau amina.<sup>1</sup>

Tipe dari isosianat, polioliol ataupun pemanjangan rantai yang digunakan akan mempengaruhi kecepatan reaksi dan sifat dari produk akhir yang dihasilkan. Polioliol akan memberikan fleksibilitas yang tinggi pada struktur poliuretan atau poliuretan urea. Oleh karena itulah polioliol disebut sebagai segmen lunak dari poliuretan. Di sisi lain, isosianat dan pemanjangan rantai memberikan kekakuan atau rigiditas dalam struktur poliuretan sehingga sering disebut sebagai segmen keras. Jaringan ikat silang antara segmen lunak dan keras dalam poliuretan dijelaskan seperti dalam skema dan Gambar 3.

### **II.1.1 Isosianat**

Isosianat merupakan gugus fungsi utama yang menjadi dasar dari industri poliuretan modern. Secara komersial, isosianat organik tersedia dalam bentuk alifatik, sikloalifatik, aromatik dan heterosiklik poliisosianat. Beberapa contoh isosianat antara lain adalah:

- perhidro 2,4' atau 4,4'-difenilmetana diisosianat (HMDI)
- 1,4-fenilena diisosianat
- 2,3 dan 2,6-toluena diisosianat (TDI)
- difenilmetana 2,4' atau 4,4'-diisosianat (MDI)
- para-fenilena diisosianat (PPDI)



**Gambar 3. Jaringan ikat silang antara segmen lunak dan keras<sup>1</sup>**

Isosianat memiliki gugus fungsi  $[-N=C=O]$  yang memiliki reaktivitas tinggi terhadap nukleofil yang memiliki proton. Reaksi yang terjadi merupakan adisi nukleofilik melalui ikatan ganda karbon nitrogen. Secara umum, isosianat aromatik lebih reaktif dibandingkan isosianat alifatik. Adanya substituen penarik elektron pada cincin aromatik akan meningkatkan reaktivitas gugus isosianat, sedangkan donor elektron akan menurunkan reaktivitas. Substituen berukuran besar akan menurunkan reaktivitas karena pengaruh halogen sterik sebagai tambahan terhadap adanya efek induksi. Sebagaimana telah disebutkan, reaksi isosianat terjadi secara adisi terhadap ikatan rangkap karbon nitrogen.

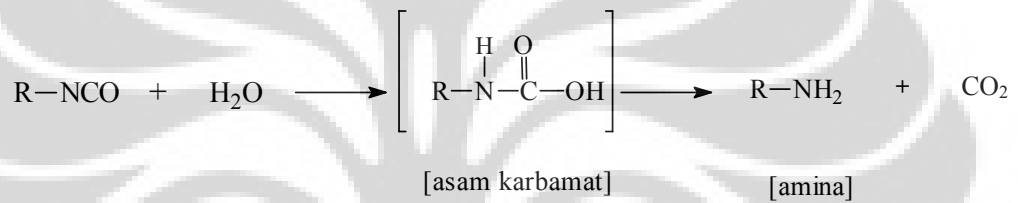
Reaksi kimia antara isosianat dengan senyawa yang memiliki gugus OH, amina dan uretan digambarkan pada skema berikut ini.<sup>1</sup>

1. Senyawa-senyawa yang mengandung gugus OH

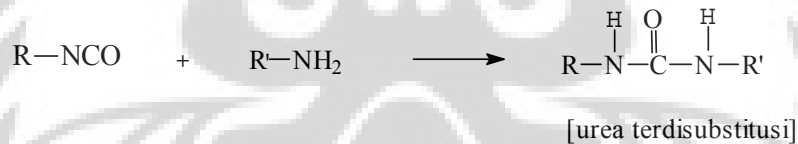
a. Alkohol



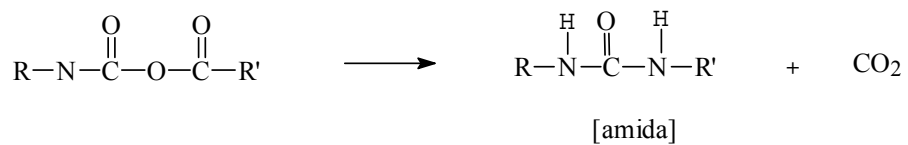
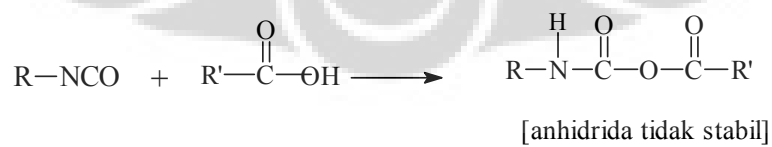
b. Air



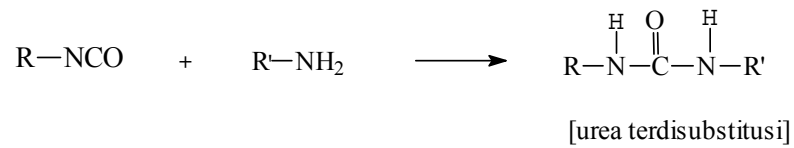
Amina kemudian segera bereaksi dengan isosianat tambahan:



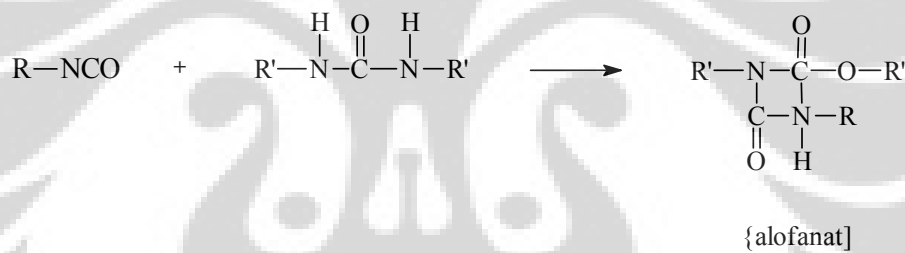
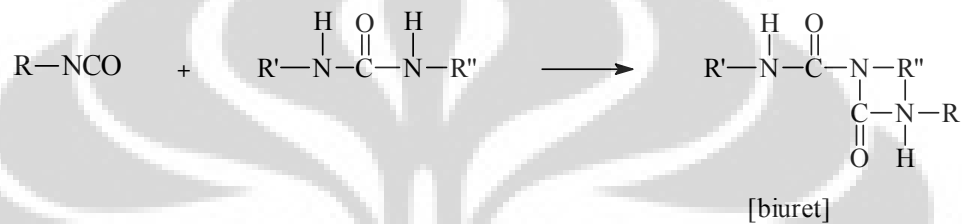
c. Asam karboksilat



## 2. Amina



## 3. Urea dan uretan



Dari sekian banyak isosianat, dapat dikatakan MDI lah yang paling banyak digunakan secara komersial. MDI murni berbentuk padatan dengan titik leleh 38°C. MDI juga memiliki fungsionalitas 2.0, membuat isosianat ini sangat cocok untuk produksi elastomer kinerja tinggi.<sup>1</sup>

### II.1.2 Polioliol

Polioliol merupakan senyawa kimia yang biasanya terdapat dalam bentuk cairan dan memiliki sedikitnya 2 gugus fungsi yang dapat bereaksi dengan gugus isosianat. Terdapat banyak sekali jenis polioliol, tetapi secara keseluruhan dapat



dikelompokkan menjadi 2 kategori yaitu polioliol dengan ujung hidroksil, dan polioliol dengan ujung amina. Terdapat 4 kelas polioliol yaitu:<sup>1</sup>

#### 1. Polieter polioliol

Bahan ini merupakan produk reaksi antara molekul sederhana (biasa disebut inisiator) seperti etilen glikol, gliserin, pentaeritriol, trimetilol, propan, sukrosa atau sorbitol dengan eter siklik seperti etilen oksida, propilen oksida, campuran etilen oksida dan propilen oksida atau tetrahidrofuran.

Polioliol berdasar polieter digunakan untuk menghasilkan busa poliuretan dan elastomer. Beberapa polieter polioliol yang paling penting antara lain PolyBD, politetrametilen eterglidikol (PTMEG), propilena glikol oksida (PPO), dan polibutena glikol oksida (PBO). PTMEG merupakan polieter polioliol yang paling istimewa karena merupakan reaktan dalam produksi elastomer poliuretan yang tahan terhadap hidrolisis.

Di samping ketahanannya yang baik terhadap hidrolisis, PTMEG menawarkan fleksibilitas yang sangat baik, ketahanan benturan (*impact*), ketahanan abrasi, berat molekul dengan rentang 650-3000 serta harga premium.

#### 2. Polieter dengan ujung amina.

Pada senyawa polioliol jenis ini, ujung hidroksilnya digantikan oleh amina primer atau amina sekunder.

#### 3. Poliester polioliol

Salah satu contoh dari polioliol jenis ini adalah minyak jarak yang memiliki stabilitas hidrolisis yang baik.

#### 4. Poli karbonat

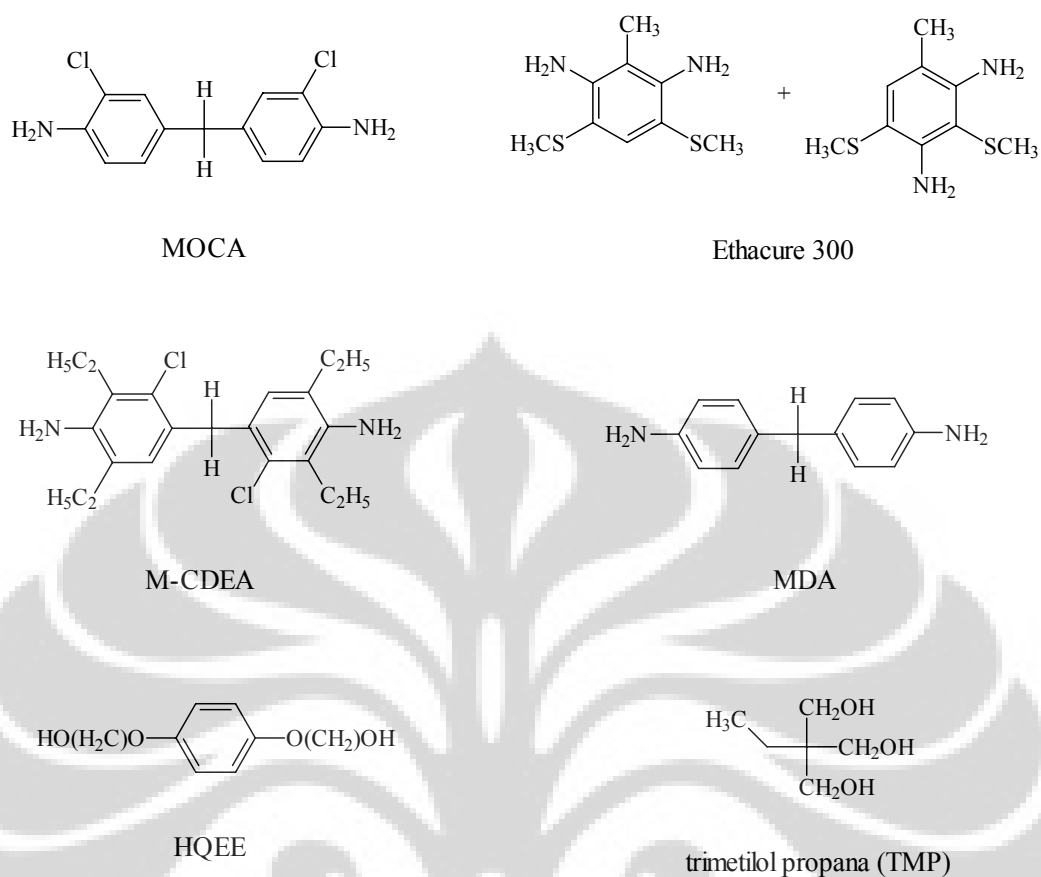
Contoh dari polioliol jenis ini adalah poli(1,6-heksanadiol)karbonat.

Dari sekian banyak polioliol, PTMEG merupakan polioliol yang paling sering digunakan sebagai segmen lunak dalam elastomer poliuretan. Elastomer ini dihasilkan dengan polimerisasi adisi PTMEG dengan diisosianat.

### **II.1.3 Pemanjang rantai (*chain extender*)**

Pemanjang rantai atau *curative* merupakan reaktan dengan massa molekul rendah yang digunakan untuk menghasilkan poliuretan dengan sifat-sifat tertentu. Pemanjang rantai dapat berupa molekul dengan ujung hidroksil atau ujung amina. Pemanjang rantai memberikan segmen keras terhadap poliuretan. Segmen keras dalam poliuretan merupakan komponen yang penting untuk menentukan sifat akhir dan kinerja dari poliuretan. Kandungan segmen keras biasanya mengendalikan sifat mekanik penting seperti modulus, kekuatan, dan stabilitas terhadap panas, serta hidrolisis.<sup>1</sup>

Pemanjang rantai dengan gugus hidroksil seringkali bereaksi secara dengan poliisosianat dan memerlukan katalis untuk mencapai laju reaksi tertentu. Sementara itu, pemanjang rantai yang memiliki gugus amina umumnya bereaksi secara cepat dengan poliisosianat. Di bawah ini merupakan beberapa jenis pemanjang rantai yang sering digunakan dalam industri poliuretan.



Gambar 4. Beberapa jenis pemanjang rantai dalam industri poliuretan

#### II.1.4 Keterkaitan struktur dan sifat poliuretan

Karakteristik poliuretan dikendalikan oleh struktur molekul, dan termasuk di dalamnya fleksibilitas, densitas, struktur selular, hidrofilisitas, dan karakteristik proses. Secara umum, keterkaitan antara struktur dan sifat dipengaruhi oleh:<sup>1</sup>

1. Berat molekul; Dengan bertambahnya berat molekul, sifat-sifat seperti kuat tarik, titik leleh, elongasi, elastisitas, temperatur transisi gelas akan meningkat hingga titik tertentu.

2. Gaya antar molekul; Termasuk dalam hal ini adalah ikatan hidrogen, momen dipol, dan ikatan van der Waals.

3. Kekakuan rantai; Adanya struktur aromatik dalam struktur poliuretan akan meningkatkan titik leleh, kekerasan serta menurunkan elastisitas.

4. Kristalinitas; Linearitas dalam rantai polimer akan meningkatkan kristalinitas, yang selanjutnya akan menurunkan solubilitas, elastisitas, elongasi dan fleksibilitas, serta meningkatkan kuat tarik, titik leleh dan kekerasan.

5. Ikat silang; Semakin tinggi tingkat ikat silang, maka polimer akan semakin *rigid*, yang selanjutnya akan meningkatkan modulus elastisitasnya serta mengurangi elongasi dan *swelling* terhadap pelarut.

Struktur isosianat memberikan pengaruh terhadap kuat tarik, modulus dan kekerasan elastomer. Sebagai gambaran, urutan diisosianat berikut menunjukkan urutan semakin berkurangnya kuat tarik untuk penggunaannya dalam poliuretan: MDI > p-fenilena diisosianat > 3,3'-dimetil-4,4'-difenil diisosianat (TODI) > 4,4'-difenilisopropilidena diisosianat (DPDI). Penggunaan pemanjangan rantai juga sangat mempengaruhi kuat tarik. Diamina aromatik akan menghasilkan poliuretan dengan kuat tarik yang superior terhadap diamina alifatik dan diol.<sup>1</sup>

## **II.2 Migrasi molekul organik ke dalam struktur poliuretan**

Di dalam bagian lunak poliuretan, diasumsikan bahwa zat organik berdifusi secara interstisi. Dalam hal ini difusi yang terjadi adalah akibat adanya ruang interstisi antara rantai polieter/poliester sehingga zat organik dapat bergerak melalui ruang interstisi ini. Tidak ada posisi atom yang digantikan sehingga tidak terjadi difusi substitusi. Diasumsikan juga bahwa molekul organik sangat kecil sehingga terjadi mekanisme lompatan acak (*random jumping*) sehingga terbentuk gradien konsentrasi. Zat terdifusi akan mengalir menuju daerah yang

konsentrasinya lebih rendah. Fick pada tahun 1855 mendefinisikan difusi sebagai berbanding lurus dengan perubahan konsentrasi terhadap jarak, yakni:

$$J_B = -D_B (dC_B/dx)$$

Dimana  $D_B$  adalah difusivitas intrinsik atau koefisien difusi dari spesi B,  $J_B$  adalah kecepatan difusi, dan  $(dC_B/dx)$  adalah perubahan konsentrasi pada jarak tertentu. Pada beberapa penelitian terdahulu juga telah ditunjukkan bahwa difusi molekul pelarut organik ke dalam poliuretan mengikuti model Fick.<sup>5,8,10-11</sup> Persamaan di atas berlaku pada zat organik yang berdifusi ke dalam poliuretan dan menentukan jumlah zat organik yang dapat terabsorpsi pada permukaan poliuretan. Aminabhavi *et. al* menggunakan persamaan berikut ini untuk menghitung koefisien difusi:<sup>13</sup>

$$D = \pi [Gh/4\Delta V_s]^2$$

Dimana D adalah koefisien difusi, h adalah tebal sampel poliuretan, G adalah kemiringan (*slope*) dari bagian linear pada kurva sorpsi, dan  $\Delta V_s$  adalah kesetimbangan sorpsi dalam persen mol.

Energi termal memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kecepatan difusi (7). Difusi interstisi selalu didahului oleh lompatan acak dimana suatu atom melompat dan berpindah tempat. Jika bahan menerima energi termal, maka setiap atomnya akan bervibrasi sehingga probabilitas terjadinya lompatan akan menjadi lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh, yang pertama, molekul interstisi dapat

melompat dengan lebih mudah karena memiliki energi vibrasi. Yang kedua, adalah ruang interstisi menjadi lebih lebar karena gerakan vibrasi dari matriks. Pengaruh suhu terhadap difusi didefinisikan melalui persamaan logaritmik sebagai berikut:

$$\text{Log } D = \log D_0 - (Q/2.3R)(1/T)$$

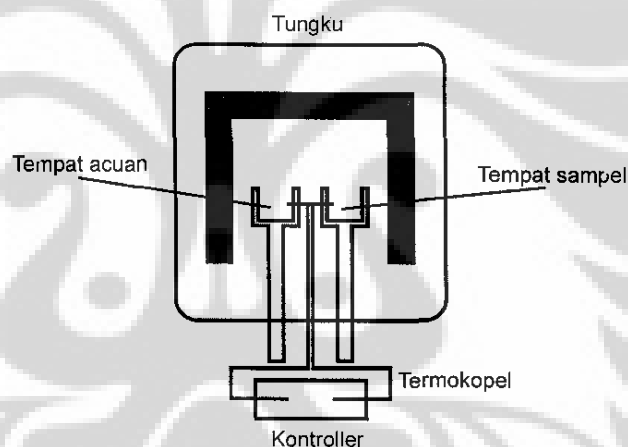
Dimana  $D$  adalah kecepatan difusi,  $D_0$  adalah koefisien difusi yang tidak tergantung pada temperatur,  $Q$  adalah energi aktivasi difusi,  $R$  adalah tetapan gas, dan  $T$  adalah temperatur. Persamaan ini adalah suatu persamaan linear, sehingga dimungkinkan untuk memperoleh nilai energi aktivasi difusi  $Q$  dengan memplot  $\log D$  terhadap resiprokal temperatur ( $1/T$ ).

### **II.3 Differential Scanning Calorimetry (DSC)**

*Differential Scanning Calorimetry* (DSC) merupakan salah satu teknik analisis termal yang paling lazim digunakan untuk menganalisis polimer. Teknik ini biasanya digunakan untuk menentukan titik leleh polimer, temperatur transisi gelas ( $T_g$ ), derajat kristalinitas, panas fusi atau derajat kematangan. Teknik ini sangat baik untuk menginvestigasi kegagalan dalam suatu polimer karena dapat menunjukkan latar belakang termal dan  $T_g$  yang sensitif terhadap annealing dan penuaan.<sup>14</sup>

Prinsip dasar DSC adalah mengukur perbedaan suhu antara sampel dan standar. Sampel dan standar diletakkan pada dua cawan yang berbeda, kemudian keduanya dipanaskan secara bersamaan. Jika terjadi perubahan fasa, misalnya dengan tercapainya  $T_g$  untuk poliuretan, maka suhu sampel akan konstan karena

energi yang masuk digunakan untuk perubahan fasa. Alat kemudian berusaha menyamakan suhu dengan memberikan energi panas lebih banyak sehingga terbentuk sebuah puncak pada grafik energi terhadap kenaikan suhu. Skema alat DSC dapat dilihat pada Gambar 5, di mana pada prinsipnya terdiri dari dua cawan yang masing-masing memiliki *thermocouple* untuk mengukur suhu sampel dan standar. Kedua cawan ini berada di dalam tungku yang dipanaskan pada suatu jangkauan suhu tertentu. Syarat standar yang digunakan adalah tidak mengalami perubahan pada jangkauan suhu yang diamati, biasanya digunakan alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).



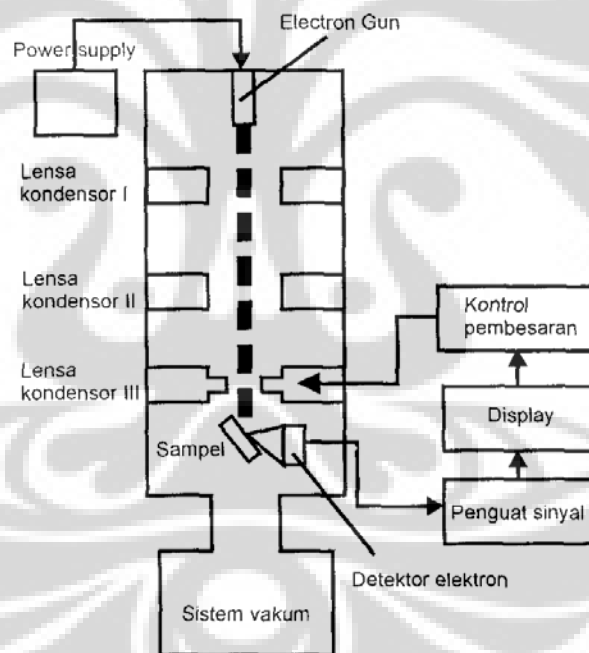
Gambar 5. Skema Alat DSC

#### II.4 Scanning Electron Microscopy (SEM)

*Scanning Electron Microscopy* (SEM) merupakan suatu teknik yang sangat baik untuk menganalisis kondisi permukaan dari suatu material secara mikroskopis. Prinsip kerja SEM ditunjukkan oleh gambar 6 dimana suatu berkas elektron yang dipancarkan dari *electron gun* diarahkan melalui lensa kondensor kepada suatu titik pada permukaan sampel. *Scanning coil* yang terletak pada lensa kondensor III kemudian mengarahkan pancaran elektron sehingga dapat

memindai permukaan sampel. Elektron *backscattered* sudut rendah akan berinteraksi dengan permukaan sampel dan mengakibatkan munculnya *secondary backscattered electrons*, yaitu elektron yang terpental keluar dari permukaan setelah tertumbuk oleh pancaran elektron pertama. Elektron inilah yang kemudian masuk ke detektor dan menghasilkan mikro permukaan sampel.<sup>15</sup>

SEM memiliki kemampuan pembesaran objek mulai dari 15 hingga 100.000 kali dengan resolusi sekitar 5 nm. Artinya, SEM memiliki kemampuan menganalisis topografi material dengan ketelitian hingga 300 kali mikroskop optik, yakni sekitar 10 mikrometer pada pembesaran 100.000 kali.



**Gambar 6 Prinsip Kerja Scanning Electron Microscopy (SEM)**

Pada SEM dapat ditambahkan pula detektor EDAX, atau *Energy Dispersive X-Ray Analysis*. EDAX memiliki kemampuan untuk mendeteksi unsur yang ada di dalam sampel berdasarkan dispersi sinar-X yang dikeluarkan akibat tumbukan dengan pancaran elektron. Dalam detektor EDAX, dispersi energi diukur melalui



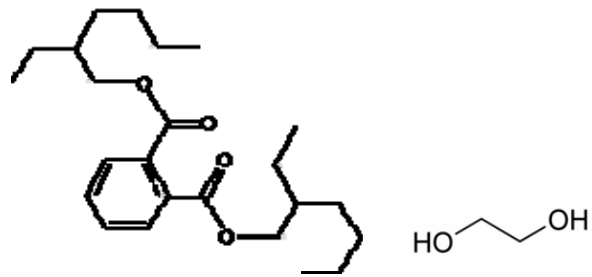
cara proporsional yakni dengan *scintillation counters* untuk menghasilkan spektrum dari suatu unsur. Spektrum ini kemudian dideteksi untuk mengidentifikasi unsur yang ada dalam sampel.

Kelemahan metode analisis elektron seperti SEM dan EDAX adalah tidak dapat digunakan untuk bahan isolator. Hal ini dikarenakan bahan isolator memiliki elektron yang relatif terikat kuat sehingga sulit untuk menghasilkan *secondary backscattered electrons*. Tetapi ada satu cara untuk melihat struktur mikro benda isolator melalui SEM, yakni dengan memberikan lapisan tipis karbon atau emas pada permukaannya, sehingga topografinya dapat terlihat. Namun analisis EDAX tetap tidak dapat dilakukan meskipun menggunakan teknik ini.<sup>15</sup>

## **II.5 Dioktil Ftalat (DOP) dan Etilen Glikol (EG)**

### **II.5.1 Dioktil Ftalat (DOP)**

DOP dan etilen glikol lazim digunakan sebagai bahan plasticizer dalam industri plastik. Khususnya industri PVC, dimana DOP digunakan sebagai bahan plasticizernya untuk memberikan fleksibilitas lebih dalam polimer. DOP merupakan senyawa organik yang memiliki rumus kimia  $C_6H_4(COOCH_2CH(C_2H_5)C_4H_9)_2$  dan struktur molekul seperti gambar 7. Molekul DOP memiliki satu cincin aromatik dan dua ikatan ester dengan dua gugus hidrokarbon dengan delapan buah atom karbon (oktil). DOP tidak larut dalam air dan memiliki stabilitas yang baik terhadap ultraviolet, panas serta resistensi yang baik terhadap hidrolisis.



Gambar 7 . Struktur Kimia Dioktil Ftalat dan Etilen Glikol

Pada industri PVC penggunaan DOP cukup dominan dan mneghemat biaya produksi. Selain digunakan sebagai *plasticizer* dalam industri PVC, dalam jumlah terbatas dioktilftalat juga digunakan dalam *adesive*, *sealant* dan industri cat untuk meningkatkan kinerja. Dioktil ftalat juga digunakan sebagai pelarut pada parfum dan kuteks dan pestisida

### II.5.2 Etilen Glikol

Etilen glikol yang memiliki nama lain 1, 2-Ethandiol memiliki rumus kimia  $\text{CH}_2\text{CH}_2(\text{OH})_2$ .

Etilen glikol ditemukan dalam wujud cair yang tidak berwarna, pada dasarnya tidak berbau, memiliki volatilitas rendah, higroskopik. Etilena glikol dapat terlarut sempurna dalam air dan beberpa cairan organik. Gugus hidroksil pada glikol menjalani kimia alkohol umum, sehingga menghasilkan keragaman turunan-turunan yang memungkinkan. Hidroksil dapat diubah menjadi aldehid, alkil halida, amina, azida, asam karboksilat, eter, merkaptan, ester nitrat, nitril, ester nitril, ester organik, peroksida, estre fosfat dan ester sulfat. Kimia semacam ini memungkinkan etilena glikol bertindak sebagai zat antara dalam berbagai reaksi kimia. Secara signifikan, etilena glikol terutama dapat berperan sebagai zat antara dalam pembentukan resin, mencakup kondensasi dengan

dimetil terftalat atau asam tereftalat yang dihasilkan dalam resin poliuretan. Reaktivitas dan kelarutan dari etilena glikol menghasilkan dasar bagi berbagai aplikasi. Penggunaan etilen glikol sebagai suatu antibeku (*antifreeze*) secara luas adalah berdasar pada kemampuannya untuk menurunkan titik beku jika dicampurkan dengan air. Karenanya, sifat-sifat fisik dari campuran etilena glikol merupakan suatu hal yang penting. Penggunaan akhir dari etilena glikol adalah beragam, antara lain:<sup>16</sup>

a. Bahan kimia zat antara untuk resin

- resin poliester (serat, wadah dan film)
- resin ester sebagai pemlastis (adhesif, lak dan email)
- resin tipe-alkid (karet sintetik, adhesif, pelapis permukaan)

b. Pasangan pelarut - penstabil terhadap pembentukan gel

c. Penekan titik poin – fluida penghilang es (pesawat terbang, landasan)

d. Fluida pemindah panas (kompresor gas, pemanas, ventilasi, penyejuk udara, pendingin proses, arena ski es, antibeku dan pendingin otomotif untuk semua musim, - formulasi berdasar-air (adhesif, cat lateks, emulsi aspal) pelarut –media untuk menyuspensi garam konduktif dalam kapasitr elektrolit.

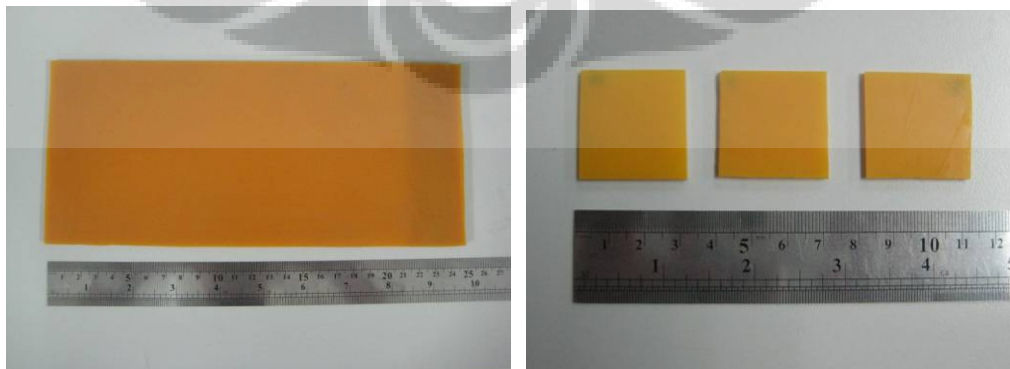
## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### III.1 Preparasi Material Poliuretan

Sample poliuretan yang digunakan dalam penelitian ini dipersiapkan dari bahan prepolimer berbasis MDI-PTMEG yang memiliki kandungan NCO 11,6 % yang diproduksi oleh Notedome Chemicals dengan pemanjangan rantai berbasis MCDEA (*Benzamine, 4,4' methylene bis [3, chloro-2,6-diethyl-]*) yang merupakan senyawa diamina aromatik yang diperoleh dari Lonza Chemicals. Material poliuretan disintesis menggunakan teknik *reaction injection molding* dan dicetak dengan cetakan khusus sehingga didapatkan lembaran poliuretan dengan ketebalan 2 mm. Setelah proses pencetakan dilakukan *post curing* pada suhu 120 derajat celcius terhadap sampel poliuretan selama 24 jam, kemudian sample poliuretan didinginkan pada suhu ruangan. Sample poliuretan yang telah didinginkan kemudian dipotong dengan ukuran 30x30 mm seperti pada Gambar 8.

Sebelum dilakukan percobaan sorpsi dan desorpsi dengan menggunakan dioktilftalat dan etilen glikol, sampel poliuretan yang telah di potong dimasukkan ke dalam desikator selama 24 jam.



**Gambar 8-9.** Poliuretan hasil pencetakan dan yang telah dipotong 30 mm x 30 mm

### III.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Sebagian besar aktivitas penelitian yang berlangsung selama enam bulan ini dilakukan di Laboratorium milik PT. Voith Paper Rolls Indonesia yang berlokasi di Karawang, Jawa Barat yang memiliki aktivitas produksi di bidang pelapisan rol mesin pembuat kertas dengan poliuretan, karet, komposit dan keramik.

Uji sifat mekanik material dilakukan dilaboratorium PT Voith Paper Rolls Indonesia. Untuk pengujian dengan *Differential Scanning Calorimetry*, sampel di bawa ke Sentra Teknologi Polimer (STP) Serpong. Sementara itu pengukuran SEM dilakukan di program Studi Ilmu Material salemba dan Sentra Teknologi Polimer (STP).

### III.3 Sorpsi Dioktil Ftalat dan Etilen Glikol

Sorpsi terhadap sampel poliuretan dilakukan dengan dioktil ftalat dan etilen glikol yang lazim digunakan sebagai bahan *plasticizer* dalam industri plastik. Dioktil fatalat yang digunakan dalam percobaan ini diperoleh dari PT Sari Sarana Kimia Indonesia, sedangkan etilen glikol yang digunakan diproduksi oleh Merk.

Untuk percobaan sorpsi, sampel poliuretan yang telah dipotong dengan ukuran 30 x 30 mm dan ditempatkan dalam desikator selama 24 jam ditimbang dulu berat awalnya untuk kemudian direndam dalam wadah tertutup rapat yang berisi cairan 100 cm<sup>3</sup> DOP ata EG pada temperatur yang diinginkan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 9.



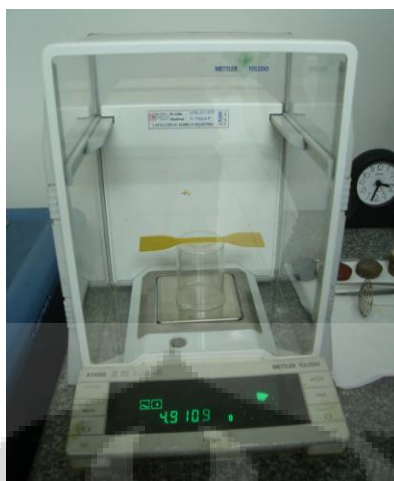
**Gambar 10. Wadah tertutup untuk percobaan sorpsi dan desorpsi**

Temperatur eksperimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah 25, 45 dan 65°C. Untuk mendapatkan temperatur 45 dan 65°C digunakan oven yang dikontrol secara termostatik seperti pada gambar di bawah.



**Gambar 11. Oven termostatik untuk percobaan 45 dan 65 °C**

Secara periodik sampel yang direndam dikeluarkan dari media, DOP atau EG pada permukaan sample dikeringkan dan kemudian sampel ditimbang dengan timbangan analitis (Metler Toledo Switzerland) dengan ketelitian 0,01 mg.



**Gambar 12. Timbangan analitis untuk penimbangan sampel**

Lama waktu percobaan sorpsi untuk masing masing temperatur yaitu 30-35 hari untuk melihat perilaku sorpsi kedua jenis media pada temperatur yang berbeda.

Data yang diperoleh pada percobaan sorpsi di tabulasi dengan format seperti tabel berikut:

**Tabel 2. Format seperti tabel untuk percobaan sorpsi**

Sorpsi

Temperatur:

Media: Dioktil Ftalat

Kode sampel	Ukuran sampel (mm x mm)	Tebal sampel	Berat sampel setelah waktu (jam)								

Media: Etilen glikol

Kode sampel	Ukuran sampel (mm x mm)	Tebal sampel	Berat sampel setelah waktu (jam)								

### III.4 Desorpsi Dioktil Ftalat dan Etilen Glikol

Setelah selama 30-35 hari dilakukan percobaan sorpsi dalam media DOP dan EG, sampel poliuretan dipindahkan kedalam media yang berisi 100 cm<sup>3</sup> aquades kemudian diberikan perlakuan temperatur sesuai dengan percobaan sorpsi. Secara periodik sampel yang direndam dikeluarkan dari media,

dikeringkan dan kemudian ditimbang dengan timbangan analitis digital. Percobaan desorpsi dilakukan hingga tidak terjadi lagi perubahan berat sampel. Hasil percobaan ditabulasi kedalam tabel dengan format seperti berikut:

**Tabel 3. Format seperti tabel untuk percobaan desorpsi**

Desorpsi		Temperatur:									
Media: Dioktil Ftalat											
Kode sampel	Ukuran sampel (mm x mm)	Tebal sampel	Berat sampel setelah waktu (jam)								
Media: Etilen glikol											
Kode sampel	Ukuran sampel (mm x mm)	Tebal sampel	Berat sampel setelah waktu (jam)								

### III.5 Karakterisasi

#### III.5.1 DSC

Pengujian DSC dilakukan di Sentra Teknologi Polimer, BPPT Serpong. Sampel yang dianalisis dengan menggunakan DSC adalah sampel poliuretan yang belum diberi perlakuan sorpsi dan sampel yang diberikan perlakuan sorpsi dengan dioktilftalat, etilen glikol dan air. Pengukuran DSC dilakukan dengan metoda ASTM D 3418-03 dengan alat Metler Toledo Star Calorimeter. Temperatur diprogram mulai dari -80 hingga 420 °C dengan kecepatan pemanasan 15°C/menit. *Purging* gas yang digunakan adalah nitrogen dengan kecepatan aliran 50 ml/menit. Temperatur transisi gelas (T<sub>g</sub>) dan titik leleh (T<sub>m</sub>) masing masing sampel diamati dalam percobaan ini untuk kemudian dianalisis lebih lanjut untuk melihat bagaimana pengaruh perakuan sorpsi DOP dan EG terhadap sampel poliuretan.



### III.5.2 SEM

Pengukuran *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan di Program Studi Ilmu Material Salemba dan Sentra Teknologi Polimer, BPPT Serpong. Perbesaran yang dilakukan adalah 250, 500 dan 1000 x.

### III.5.3 Sifat mekanik poliuretan

Sifat mekanik yang diuji meliputi uji tarik (*tensile test*) dan pengukuran kekerasan terhadap sampel poliuretan yang tidak diberikan perlakuan (sampel standar) dan sampel yang diberikan perlakuan dalam sorpsi dalam media DOP dan EG. Uji tarik dilakukan dengan menggunakan alat *tensile tester* Zwick Z010N yang memiliki grip pneumatik dan *extensometer* (Gambar 13 dan 14). Standar uji tarik yang digunakan adalah DIN 53504 dimana sampel poliuretan dipotong menjadi seperti *dumble shape*. Menggunakan alat seperti pada gambar di bawah.



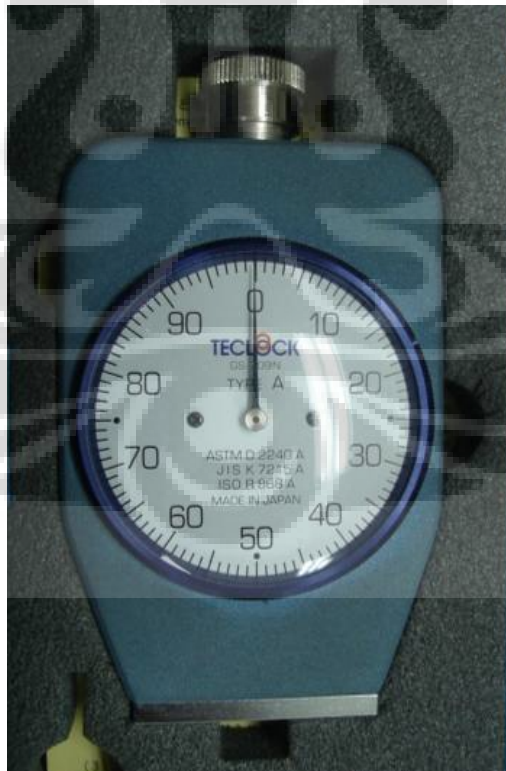
Gambar 13-15. Alat pemotong dan sampel untuk uji tarik



**Gambar 16-17. Alat tensile tester Zwick Z010N**

Untuk pengukuran kekerasan/hardness digunakan Tecklock shoreA meter.

Pengukuran dilakukan berdasarkan standar ASTM D 2240A



**Gambar 18. Tecklock shore A meter**

Untuk uji tarik, sampel yang telah dipotong membentuk *dumble* direndam dalam wadah tertutup yang berisi DOP atau EG. Perendaman dilakukan selama 30 hari sebelum dilakukan uji tarik.



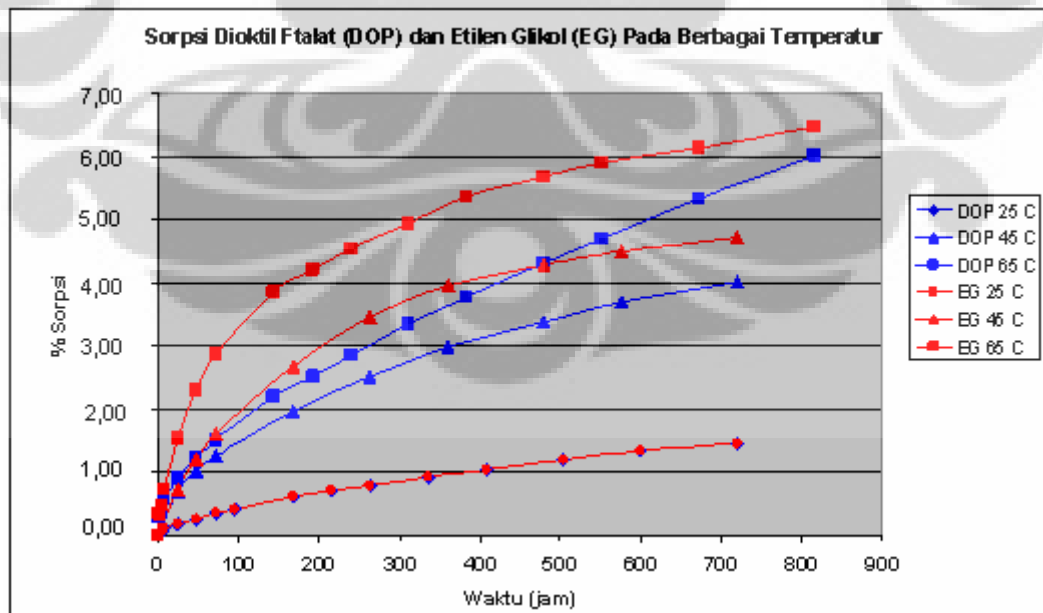
**Gambar 19. Perlakuan Sampel uji tarik dengan DOP atau EG**

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### IV.1 Sorpsi Dioktil ftalat dan Etilen Glikol

#### IV.1.1 Perbandingan Hasil Sorpsi Dioktil ftalat dengan Etilen Glikol

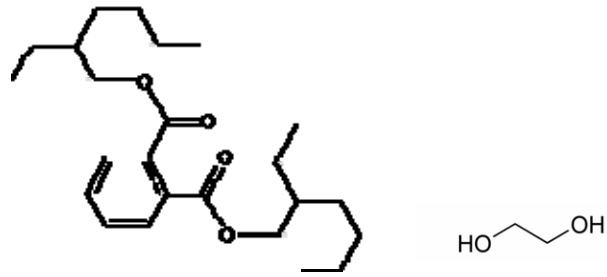
Gambar 20 merupakan grafik hasil eksperimen sorpsi DOP dan EG pada temperatur 25, 45 dan 65°C. Data eksperimen menunjukkan terjadinya sorpsi kedua jenis pelarut ke dalam material poliuretan pada ketiga temperatur. Pada temperatur 25°C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20, jumlah DOP yang bermigrasi ke dalam poliuretan lebih banyak dibanding EG. Meskipun tidak berbeda secara signifikan, dapat dilihat pada grafik perbedaan sorpsi kedua pelarut ini cukup konstan dari awal hingga akhir eksperimen. Pada akhir eksperimen (hari ke 30) diperoleh jumlah DOP yang diserap oleh poliuretan atau tingkat *swelling* poliuretan adalah 1,63% dan 1,47% untuk EG.



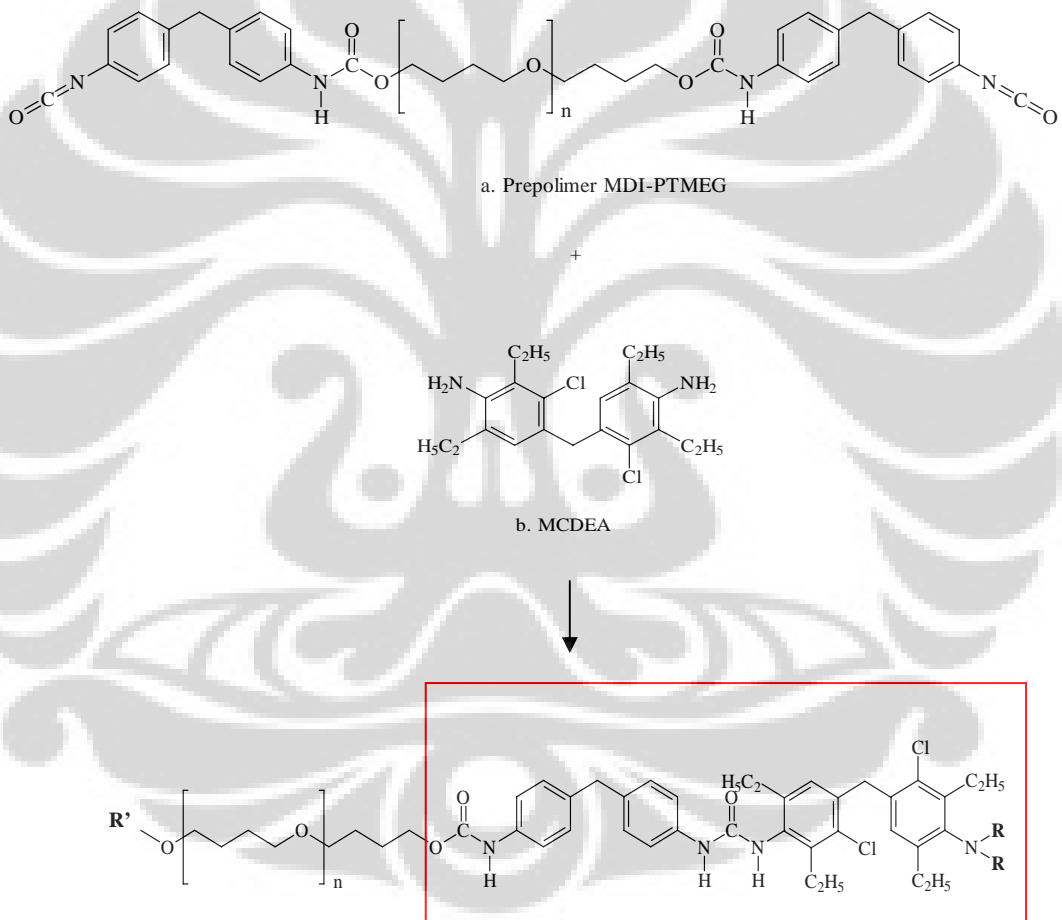
Gambar 20. Grafik sorpsi dioktil ftalat dan etilen glikol pada berbagai temperatur

Eksperimen pada temperatur 45 dan 65°C memberikan hasil yang cukup berbeda dengan temperatur 25°C. Pada kedua temperatur ini tingkat sorpsi EG yang diperoleh lebih besar dari sorpsi DOP. Pada temperatur 45°C, di akhir eksperimen diperoleh jumlah DOP dan EG yang diserap oleh poliuretan masing-masing adalah 4,00% dan 4,71%. Sedangkan pada temperatur 65°C, jumlah DOP dan EG yang diserap oleh poliuretan masing-masing adalah 6,02% dan 6,48% pada akhir eksperimen. Meskipun tidak berbeda secara signifikan pada akhir eksperimen, data percobaan menunjukkan pada kedua temperatur ini (terutama pada temperatur 65°C) awalnya terjadi perbedaan jumlah sorpsi EG dengan DOP yang cukup besar. Tetapi menjelang akhir waktu eksperimen, laju sorpsi EG dapat diamati berkurang lebih cepat dibanding laju sorpsi DOP. Proses sorpsi pada akhir waktu eksperimen juga diamati masih berlangsung pada kedua temperatur sehingga titik kesetimbangan dimana sorpsi sudah tidak lagi terjadi, belum diperoleh.

Hasil yang diperoleh pada temperatur 25°C merupakan fenomena yang menarik karena ukuran molekul DOP jauh lebih besar dari EG (Gambar 21). Selain itu, berdasarkan struktur kimia molekul kedua jenis pelarut, EG memiliki tingkat kepolaran yang lebih besar dibanding DOP. Dari sudut pandang ukuran molekul dapat diperkirakan EG akan lebih mudah bermigrasi ke dalam struktur poliuretan akan tetapi pada kenyataannya pada temperatur 25°C DOP bermigrasi ke dalam material lebih banyak.



Gambar 21 Struktur DOP dan EG



**Catatan:** R merupakan perulangan struktur (a)

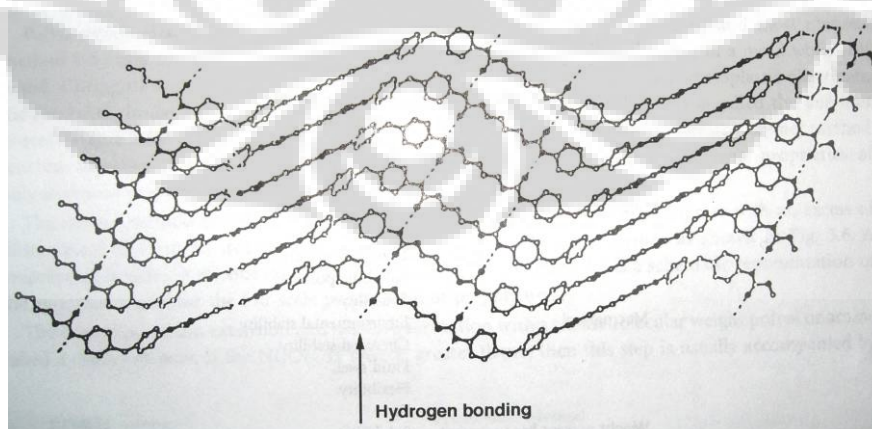
R' merupakan perulangan struktur

Gambar 22. Struktur material poliuretan dengan komponen prepolymer

MDI-PTMEG dan diamina aromatik MCDEA

Hal ini dapat dijelaskan dengan melihat bagaimana struktur umum yang terdapat dalam material poliuretan. Berdasarkan komponen-komponen penyusunnya, dapat diperkirakan struktur umum material poliuretan tersebut adalah seperti pada Gambar 22.

Material poliuretan yang digunakan sebagai material uji memiliki dua komponen penyusun yang menjadi segmen keras yaitu MDI (*4,4'-Methylene diphenyl diisocyanate*) dan MCDEA (*Benzamine, 4,4' methylene bis [3, chloro-2,6-diethyl-]*) yang juga menjadi pemanjang rantai pada poliuretan tersebut. Sementara yang menjadi segmen lunaknya adalah PTMEG (poli tetrametil etil glikol). Bagian segmen keras dalam struktur poliuretan memiliki tingkat kepolaran yang lebih tinggi dan memiliki kerapatan struktur yang lebih tinggi, karena di samping ikatan antar atom juga akan terjadi ikatan hidrogen antar molekul penyusun segmen kerasnya. Sedangkan segmen lunaknya yang memiliki gugus eter memiliki tingkat kepolaran yang lebih rendah. Sebagai penyederhanaan ikatan hidrogen dalam struktur poliuretan diilustrasikan oleh Gambar 23 berikut ini.



**Gambar 23. Ilustrasi ikatan hidrogen dalam struktur poliuretan<sup>1</sup>**

Karena merupakan suatu hidrokarbon yang memiliki rantai panjang (MW > 900) bagian PTMEG atau segmen lunak akan memiliki ikatan antar molekul yang lebih lemah dari bagian segmen keras, ini memberikan pengaruh pada mudah atau tidaknya molekul-molekul asing memasuki struktur poliuretan termasuk DOP dan EG. Pada temperatur 25°C, DOP akan tersorpsi lebih mudah ke dalam segmen lunak poliurean karena tingkat kepolaran segmen lunak dengan DOP yang tidak jauh berbeda. Sedangkan untuk EG, meskipun memiliki ukuran molekul yang jauh lebih kecil tetapi memiliki kepolaran yang lebih tinggi dibanding segmen lunak poliuretan, sehingga proses sorpsinya ke dalam segmen lunak lebih disebabkan karena ukuran molekul dibanding interaksi antar molekul. Tingkat kepolaran molekul sangat memungkinkan EG untuk memasuki segmen keras, akan tetapi dalam jumlah yang sangat terbatas dikarenakan dalam segmen keras telah terdapat ikatan hidrogen antar molekul yang kuat sehingga hanya mungkin dimasuki oleh EG dalam jumlah yang kecil.

Pada temperatur 45 dan 65°C percobaan menunjukkan hasil yang berbeda dengan temperatur 25°C karena sorpsi EG ke dalam struktur poliuretan yang diperoleh lebih besar. Pada ke dua temperatur tersebut, material poliuretan dan kedua jenis pelarut diberikan energi luar yang akan memberikan pengaruh terhadap ikatan-ikatan dalam polimer tersebut terutama ikatan antar molekul seperti ikatan hidrogen dan van der Waals yang sensitif terhadap perubahan temperatur. Karena kedua jenis ikatan antar molekul ini sangat dipengaruhi oleh jarak antar molekul maka akan terjadi pelemahan ikatan dengan bertambahnya temperatur. Pelemahan ikatan antar molekul ini akan memberikan ruang yang lebih besar bagi molekul-molekul asing untuk dapat bermigrasi ke dalam struktur



poliuretan. Di samping itu, temperatur yang tinggi juga akan memberikan energi kinetik kepada molekul-molekul DOP dan EG untuk mampu berdifusi lebih cepat. Hal ini dapat menjelaskan hasil eksperimen yang menunjukkan jumlah sorpsi terjadi lebih besar pada temperatur yang lebih tinggi. Sorpsi EG yang lebih besar dibanding DOP menunjukkan bahwa pelemahan ikatan antar molekul memberikan ruang yang cukup besar pada molekul poliuretan. Pada bagian segmen keras molekul-molekul EG dapat masuk ke dalam struktur yang telah mengalami pelemahan ikatan antar molekul (ikatan hidrogen) dan membentuk ikatan hidrogen dengan komponen-komponen segmen keras sehingga seolah-olah molekul-molekul EG menjadi jembatan yang menghubungkan segmen-segmen keras dengan membentuk ikatan hidrogen baru dengan komponen segmen keras. Penjelasan serupa juga telah dikemukakan oleh Gupta *et al.* yang telah melakukan penelitian tentang bagaimana pengaruh paparan beberapa pelarut (THF, Heksana dan Benzena) terhadap poliuretan berbasis dasar polibutadiena berujung hidroksi.<sup>4</sup> Jumlah EG yang berdifusi melalui mekanisme ini akan semakin kecil dengan bertambahnya waktu karena bagian segmen keras akan makin jenuh dengan EG sehingga pada suatu titik akan mencapai nilai konstan. Pada eksperimen yang dilakukan kecenderungan ini sudah mulai terlihat pada akhir eksperimen meskipun belum mencapai titik konstan.

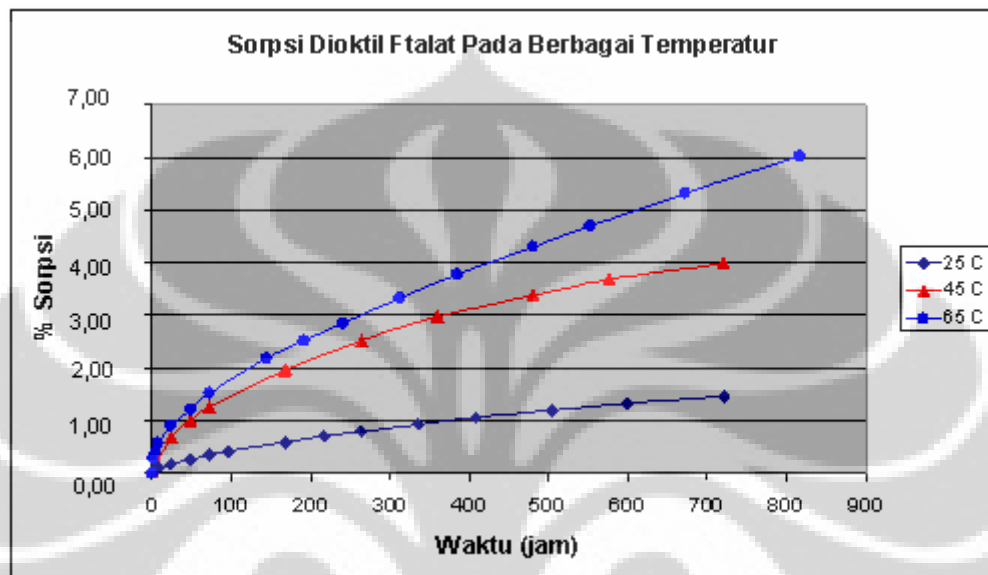
Jumlah DOP yang mampu berdifusi ke dalam struktur poliuretan lebih banyak meskipun kecepatan difusinya lebih rendah. Hal ini dimungkinkan karena jumlah segmen lunak yang lebih besar dalam struktur poliuretan dan tingkat polaritas molekul DOP yang rendah. Ditambah lagi dengan ikatan antar molekul segmen lunak yang lebih lemah dari ikatan antar molekul segmen keras sehingga

lebih mudah mengalami pelemahan dengan adanya perubahan temperatur, yang akan memberikan ruang yang lebih besar untuk DOP berdifusi. Ini dapat menjelaskan mengapa pada akhir eksperimen temperatur 45 dan 65°C laju difusi DOP ke dalam struktur poliuretan (terutama untuk temperatur 65°C) belum menunjukkan penurunan menuju nilai konstan. Penjelasan ini sejalan dengan temuan Sreenivasan *et al.* dan Mc Dermott *et al.* dalam penelitiannya.<sup>7,10</sup> Sreenivasan *et al.* mempelajari bagaimana sorpsi beberapa jenis lemak ke dalam poliuretan tersegmentasi yang memiliki PTMEG sebagai segmen lunak serta MDI dan butandiol sebagai segmen keras. Pada penelitian tersebut disimpulkan bahwa difusi dan absorpsi beberapa jenis lemak yang merupakan senyawa non polar terjadi pada bagian segmen lunak dan akan menurun dengan meningkatnya kandungan segmen keras. Peningkatan kandungan segmen keras akan menurunkan absorpsi secara eksponensial.<sup>7</sup> Sementara itu, Mc Dermott *et al.* yang mempelajari perubahan sifat mekanik film poliuretan yang dipaparkan kepada surfaktan Nonoxinol 9 dan poli etilen glikol menjelaskan dalam publikasi penelitian mereka bahwa kedua jenis senyawa tersebut akan masuk ke dalam bagian lunak poliuretan dan akan menyebabkan plastisasi.<sup>10</sup>

#### **IV.1.2 Perbandingan Sorpsi DOP, EG dan Air pada berbagai temperatur**

Gambar 24 merupakan hasil percobaan sorpsi pada berbagai temperatur untuk DOP. Dapat dilihat pada grafik tersebut bagaimana pengaruh bertambahnya temperatur eksperimen terhadap bertambahnya laju sorpsi DOP ke dalam poliuretan. Seperti telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, hal ini sangat dipengaruhi oleh pelemahan ikatan antar molekul pada segmen lunak poliuretan

pada temperatur tinggi sehingga ini memberikan ruang yang lebih besar kepada molekul DOP untuk lebih leluasa berdifusi karena pada saat yang sama molekul DOP memiliki energi kinetik yang lebih besar dengan adanya peningkatan temperatur.



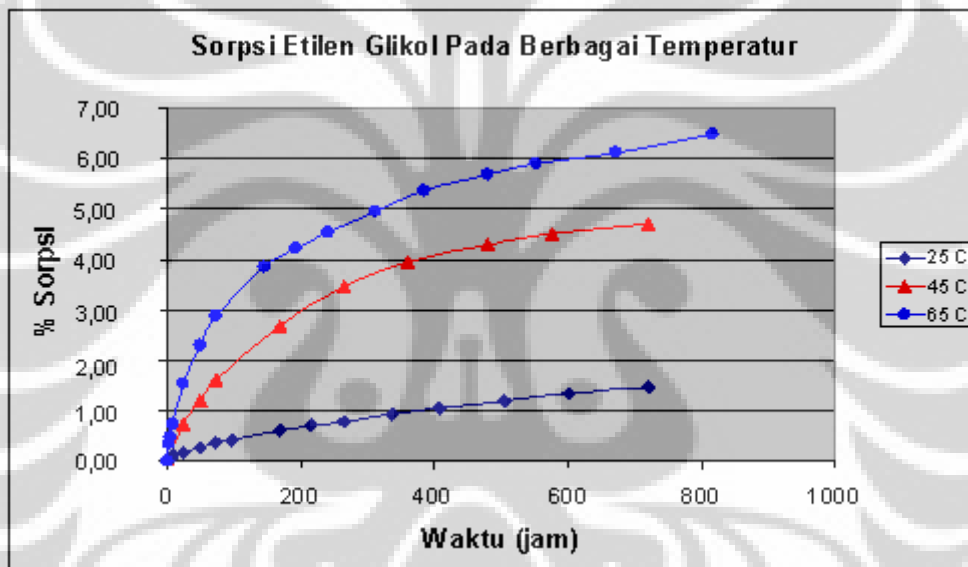
Gambar 24. Grafik sorpsi dioktil ftalat pada berbagai temperatur

Hal serupa juga dapat diamati pada Gambar 25. Perbedaan sorpsi EG ke dalam poliuretan cukup signifikan antara temperatur 25 dengan 45 dan 65°C. EG berdifusi ke dalam segmen keras sebagai efek dari polaritas struktur. Pada temperatur 25°C EG hanya mampu berdifusi dalam jumlah kecil karena dalam struktur segmen keras telah terdapat ikatan hidrogen yang tidak dapat diputus oleh molekul EG. Sedangkan pada temperatur yang lebih tinggi ikatan hidrogen akan mengalami pelemahan ikatan, pada saat yang bersamaan, peningkatan temperatur menyebabkan EG mengalami peningkatan energi kinetik molekul sehingga lebih mudah berdifusi.

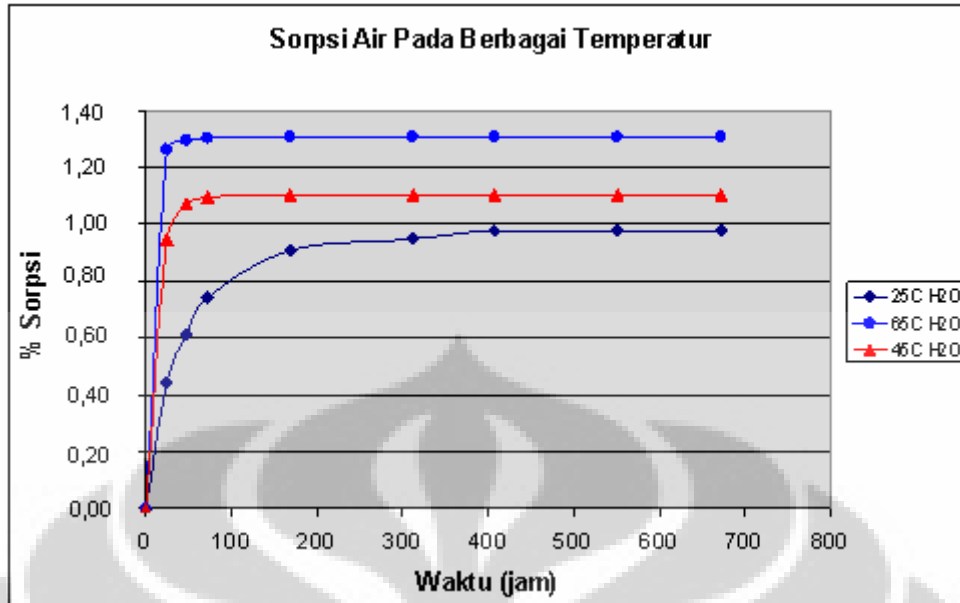
Pada eksperimen ini dapat dilihat bahwa ukuran molekul bukan merupakan faktor utama yang menyebabkan DOP dan EG dapat berdifusi ke dalam struktur poliuretan karena DOP dengan berat molekul 390,56 g/mol memiliki ukuran molekul yang jauh lebih besar jika dibandingkan dengan EG yang hanya memiliki berat molekul 62,07 g/mol dapat berdifusi ke dalam poliuretan dengan jumlah yang tidak berbeda secara signifikan dengan EG bahkan pada akhir waktu sorpsi, DOP semakin mendekati sorpsi EG yang telah menunjukkan kecenderungan menuju konstan. Pada eksperimen ini, kepolaran molekul merupakan faktor utama yang menyebabkan terjadinya proses sorpsi DOP dan EG.

Penjelasan ini kemudian dikonfirmasi dengan melakukan percobaan sorpsi dengan menggunakan media air pada ketiga temperatur, yang hasilnya ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 28. Air hanya memiliki berat molekul 18 g/mol dan berukuran lebih kecil dari DOP dan EG, tetapi merupakan pelarut yang sangat polar, bahkan lebih polar dari EG. Data eksperimen menunjukkan temperatur 25, 45 dan 65°C jumlah air yang dapat tersorpsi ke dalam struktur poliuretan adalah 0,98 %, 1,10 % dan 1.31 % berat dari sampel poliuretan, jauh lebih kecil dari sorpsi DOP dan EG yang mencapai 6,02% dan 6,48% pada akhir eksperimen dengan kondisi belum terjadi kesetimbangan sorpsi. Kembali lagi hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan polaritas yang besar antara poliuretan dengan air sehingga air hanya dapat masuk ke dalam poliuretan melalui pori-pori mikro pada permukaan poliuretan tanpa adanya ikatan antar molekul yang kuat seperti yang akan ditunjukkan oleh hasil pengukuran SEM.

Dari hasil percobaan sorpsi ini diperoleh informasi penting bahwa poliuretan yang menjadi meterial uji yang menggunakan pemanjang rantai diamina aromatik (MCDEA) dan segmen lunak PTMEG memiliki permeabilitas yang baik terhadap molekul molekul organik dengan tingkat kepolaran rendah sedangkan untuk molekul organik berkepolaran tinggi poliuretan ini memiliki permeabilitas terbatas. Poliuretan ini juga memiliki ketahanan yang baik terhadap penetrasi air.



Gambar 25. Grafik sorpsi etilen glikol pada berbagai temperatur



Gambar 26. Grafik sorpsi Air pada berbagai temperatur

#### IV.2 Desorpsi Dioktil ftalat dan Etilen Glikol

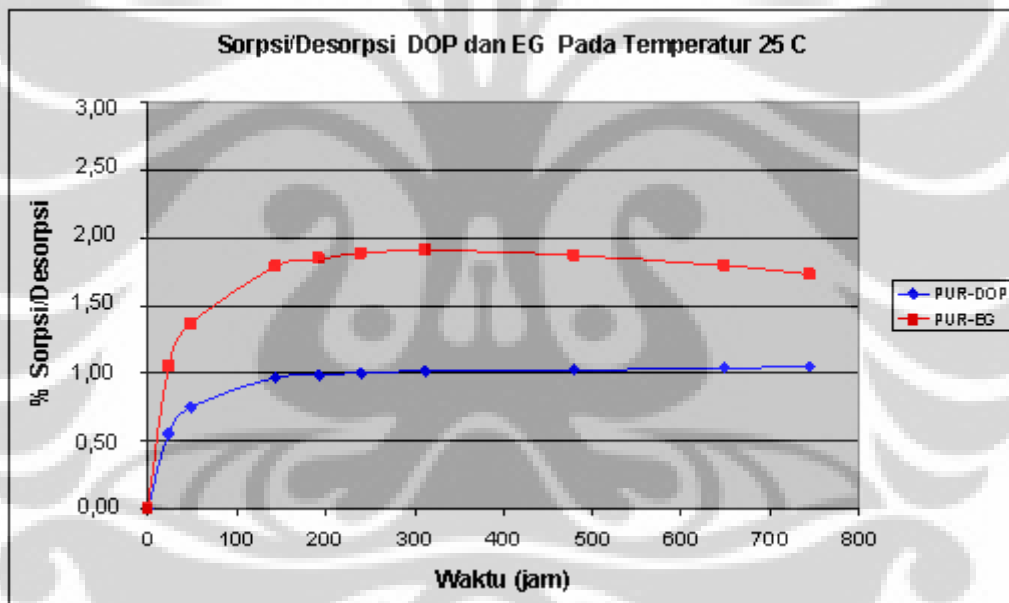
Eksperimen desorpsi dilakukan setelah percobaan sorpsi dengan cara menempatkan sampel dalam media aquades. Eksperimen ini dilakukan untuk melihat bagaimana retensi poliuretan terhadap DOP dan EG yang sebelumnya telah berdifusi ke dalam struktur poliuretan.

Gambar 27-29 merupakan grafik hasil percobaan desorpsi pada temperatur 25, 45 dan 65°C. Pada setiap grafik, sumbu y menunjukkan jumlah % berat DOP dan EG yang terdesorpsi dari poliuretan atau jumlah aquades yang tersorpsi ke dalam poliuretan. PUR-DOP merupakan kode sampel poliuretan yang telah diberikan perlakuan sorpsi dioktil ftalat dan PUR-EG merupakan kode sampel untuk poliuretan yang telah diberi perlakuan sorpsi dengan etilen glikol.

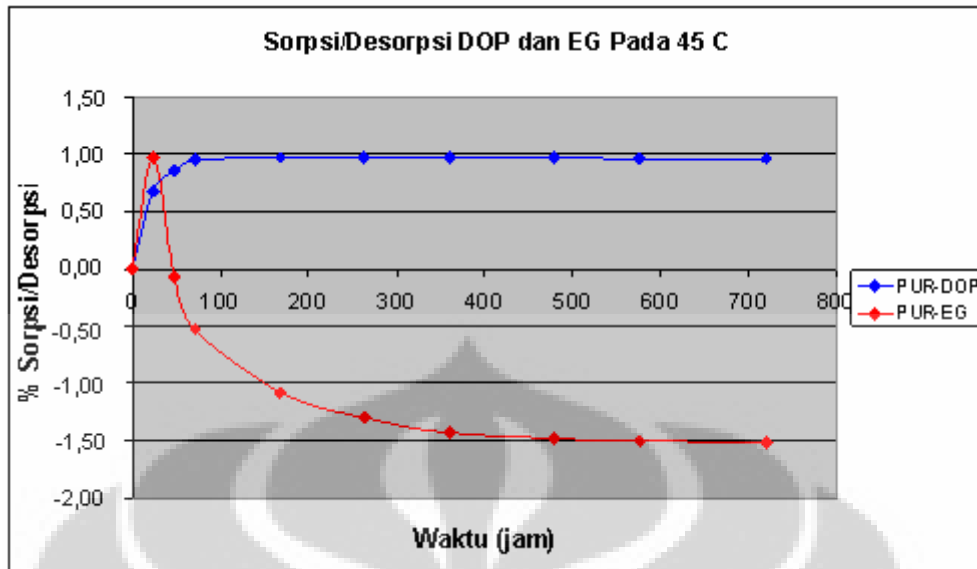
Pada temperatur 25°C (Gambar 29), data menunjukkan pada awal eksperimen tidak terjadi desorpsi DOP maupun EG, yang terjadi adalah sorpsi air ke dalam poliuretan. Sorpsi air yang terjadi pada PUR-DOP terjadi sebanyak

1,05% atau mendekati dengan sorpsi air kedalam poliuretan pada temperatur 25°C yaitu 0,98%. Untuk sampel PUR-EG, sorpsi air terjadi hingga mencapai 1,9 %, kemudian secara perlahan terjadi penurunan hingga mencapai 1,73 % pada akhir eksperimen.

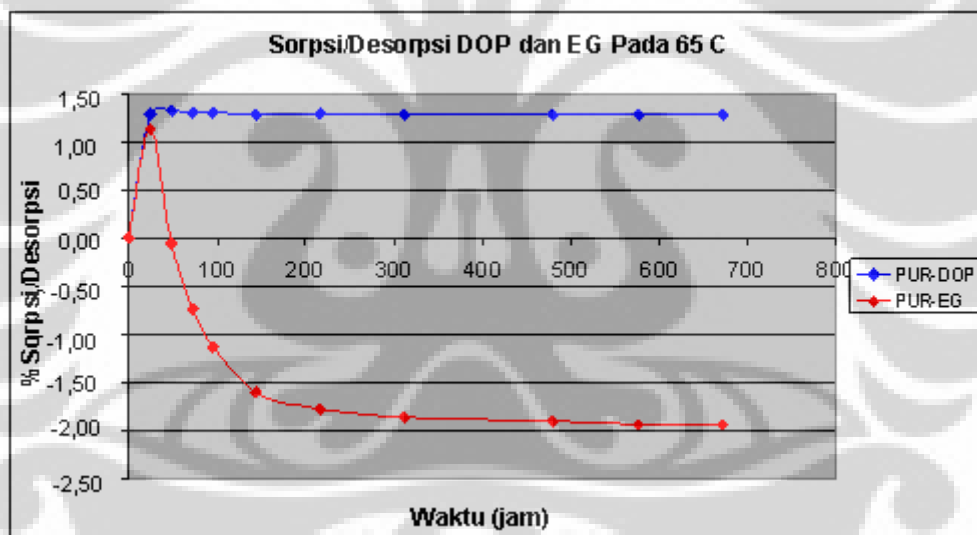
Data percobaan pada temperatur 45 dan 65°C menunjukkan kecenderungan yang sama, dimana pada awal percobaan terjadi sorpsi air ke dalam kedua jenis sampel tetapi kemudian pada sampel PUR-EG terjadi desorpsi secara signifikan sedangkan pada sampel PUR-DOP tidak terjadi desorpsi.



Gambar 27. Grafik Percobaan Desorpsi Dioktil ftalat dan Etilen Glikol pada 25°C



Gambar 28 Grafik Percobaan Desorpsi Dioktil ftalat dan Etilen Glikol pada 45°C

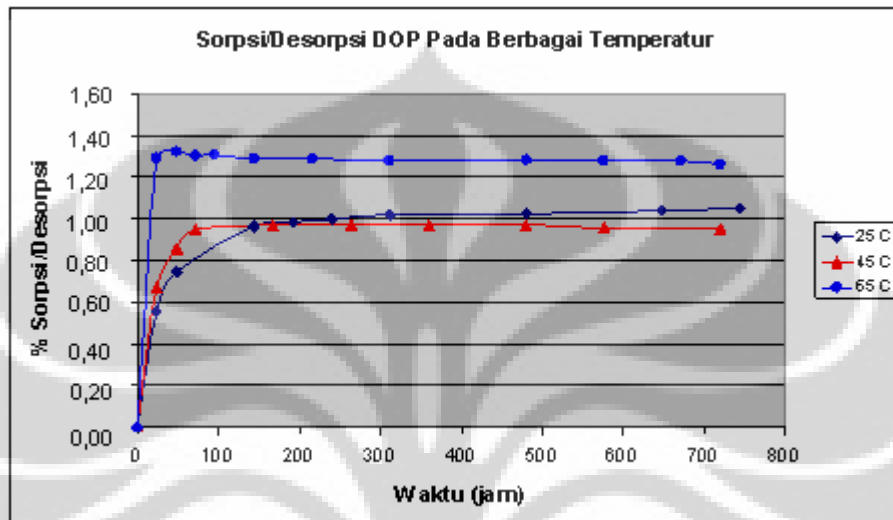


Gambar 29. Grafik Percobaan Desorpsi Dioktil ftalat dan Etilen Glikol pada 65°C

Hasil percobaan desorpsi untuk sampel PUR-DOP pada ketiga temperatur ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 30. Kecenderungan yang dapat diamati pada ketiga temperatur sama, dimana terjadi sorpsi air pada awal percobaan kemudian konstan. Hal ini menunjukkan poliuretan memiliki retensi yang baik terhadap DOP. Ini dimungkinkan karena DOP yang telah berdifusi ke dalam struktur



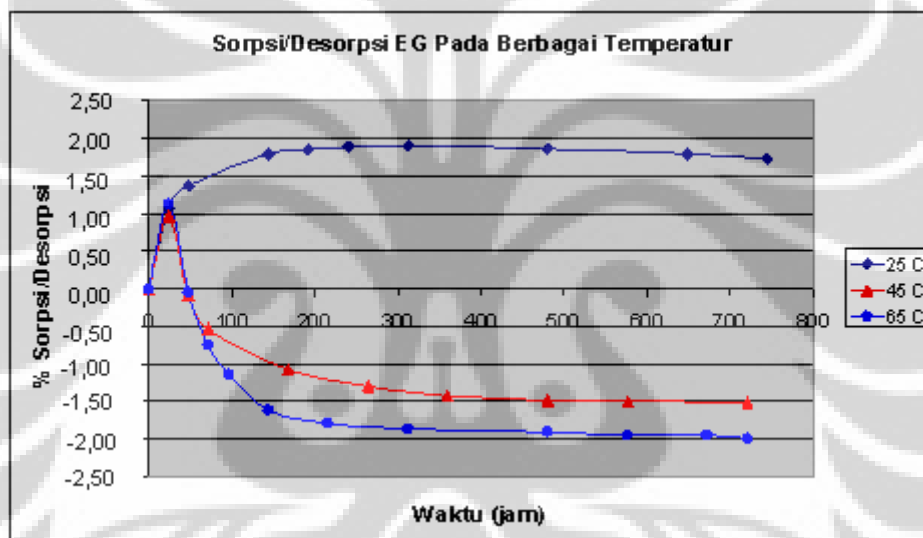
poliuretan tidak dilepaskan ke dalam air. Disamping retensi poliuretan yang baik terhadap DOP sebagai hasil ikatan dari ikatan DOP dengan molekul poliuretan, perbedaan kepolaran yang besar antara DOP dengan air juga memberikan kontribusi untuk tidak terjadinya desorpsi DOP.



**Gambar 30. Grafik Percobaan Desorpsi Dioktil ftalat pada berbagai temperatur**

Desorpsi terjadi secara signifikan pada sampel PUR-EG pada temperatur 45 dan 65°C seperti ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 31. Besarnya desorpsi yang terjadi menunjukkan rendahnya kemampuan retensi poliuretan terhadap EG sehingga dapat dengan mudah diepaskan ke dalam air. Faktor kepolaran molekul juga sangat berpengaruh karena EG memiliki tingkat kepolaran yang tinggi, molekul ini dapat larut dengan baik dalam air. Adanya perbedaan atau gradien konsentrasi EG dalam poliuretan dan air mendorong terjadinya proses desorpsi dan dengan adanya pengaruh dari temperatur proses ini terjadi dengan lebih cepat. Pada temperatur 25°C tren ini juga mulai terlihat pada akhir percobaan tetapi karena pengaruh dari temperatur, proses ini berlangsung dengan lambat.

Sebelumnya, proses terjadinya sorpsi dan desorpsi pelarut organik pada telah dipelajari oleh Kumar dan Siddaramaiah yang mengamati bagaimana perilaku sorpsi dan desorpsi beberapa pelarut aromatik yaitu benzena, toluena, klorobenzena dan nitrobenzena terhadap poliuretan, tetapi proses desorpsi tidak dilakukan dengan menggunakan media dengan cara menempatkan sampel poliuretan yang telah melalui proses sorpsi pada temperatur yang digunakan pada eksperimen sorpsi.<sup>12</sup> Penulis sejauh ini belum menemukan adanya publikasi tentang proses desorpsi yang diamati dengan menggunakan media air .



Gambar 31. Grafik Percobaan Desorpsi Etilen Glikol pada berbagai temperatur

#### IV.3 Hasil dan Analisis Pengukuran *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Pengukuran atau analisis termal dilakukan terhadap sampel PU yang belum dan telah diberi perlakuan sorpsi. Gambar 32 merupakan termogram hasil pengukuran DSC sampel poliuretan standar. Termogram hasil pengukuran sampel yang telah melalui proses sorpsi DOP, EG dan air dapat dilihat pada bagian lampiran.

Teknik DSC biasanya digunakan untuk mengukur atau menentukan titik leleh, temperatur transisi gelas, tingkat dan laju kristalisasi serta tingkat *curing*. Analisis menggunakan DSC dan juga DTA menghasilkan termogram dengan puncak-puncak yang menggambarkan transisi endotermik dan eksotermik serta menunjukkan perubahan kapasitas panas. Tetapi pada metode DSC juga diperoleh informasi kuantitatif mengenai perubahan entalpi dalam polimer. Metode DSC menggunakan suatu sistem servo untuk memasok energi dengan tingkat/ laju acuan (standar) sehingga temperatur keduanya tetap sama.

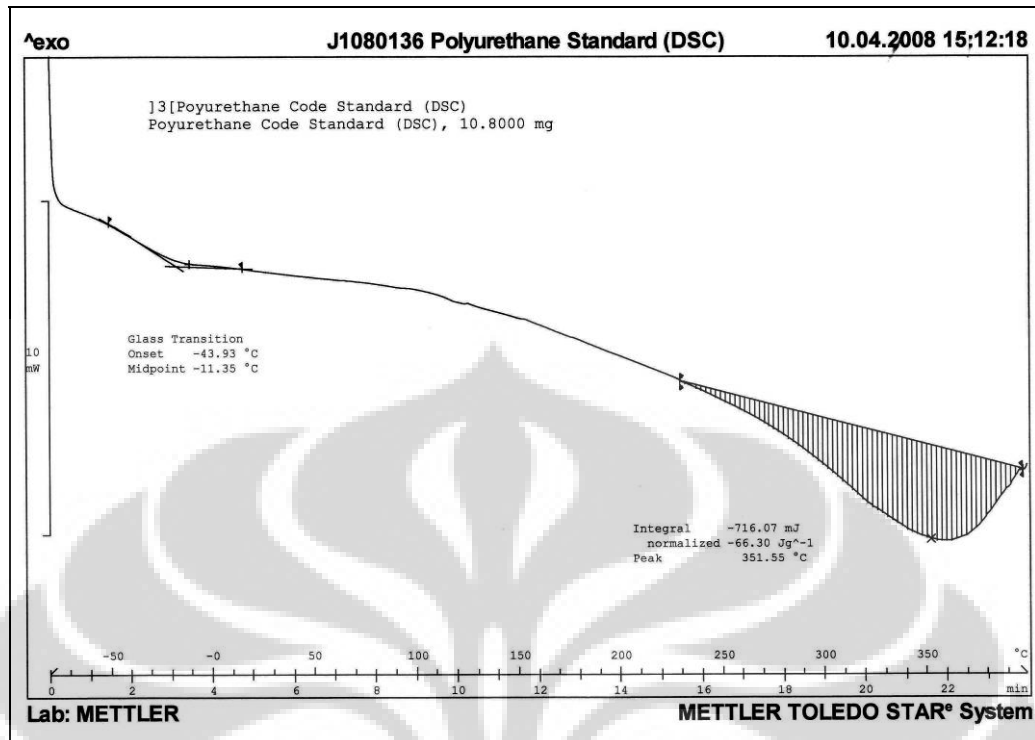
Termogram sebagai *output* dari DSC merupakan suatu plot dari energi yang dipasok terhadap temperatur rata-rata. Dengan metode ini, area di bawah puncak dapat secara langsung dihubungkan dengan perubahan entalpi secara kuantitatif.<sup>17,18</sup>

Dalam teknik DSC terdapat dua variabel eksperimental yang akan mempengaruhi *output* DSC polimer, yaitu berat sampel dan laju pemanasan. Kedua variabel ini tidak akan memiliki pengaruh yang besar terhadap bentuk kurva DSC, tetapi jika jumlah sampel yang digunakan terlalu banyak akan mengakibatkan gradien temperatur dalam sampel. Sementara itu, laju pemindaian (*scanning*) yang tinggi akan mengakibatkan efek *thermal-lag*.<sup>14</sup>

Karena poliuretan merupakan suatu polimer yang dibentuk dari tiga jenis komponen (isosianat, senyawa polihidroksi dan pemanjang rantai), maka generalisasi sifat termalnya menjadi suatu pekerjaan yang tidak mudah. Tetapi secara umum akan ditemui tiga puncak endotermik pada kurva DSC yaitu temperatur transisi gelas untuk segmen lunak dan dua puncak untuk disosiasi segmen keras (*short range dan long range*). Namun, rendahnya endoterm

temperatur yang terkait dengan susunan segmen keras seringkali dilaporkan untuk poliuretan dengan bahan dasar MDI, terutama jika pemanjang rantainya diol asimetrik. Struktur dan ikatan kimia dalam poliuretan sangat mempengaruhi sifat termalnya. Jika digunakan suatu diamina sebagai pemanjang rantai, akan dihasilkan ikatan urea dalam struktur poliuretan yang akan menghasilkan tingkat ikatan hidrogen yang lebih tinggi. Sehingga poliuretan akan lebih tahan terhadap temperatur tinggi karena ikatan hidrogen meningkatkan keseragaman (*cohesiveness*) pada bagian segmen keras.<sup>1</sup> Sebagaimana telah disebutkan pada bagian awal, poliuretan yang menjadi sampel uji dalam penelitian ini memiliki diamina aromatik sebagai pemanjang rantainya sehingga poliuretan tersebut merupakan poliuretan yang memiliki ketahanan panas yang baik.

Gambar 32 merupakan termogram sampel standar, dari termogram ini diperoleh informasi temperatur transisi gelas ( $T_g$ ) dan titik lelehnya ( $T_m$ ), masing-masing  $-11,35^\circ\text{C}$  dan  $351,55^\circ\text{C}$ .  $T_g$  merupakan indikator amorfisitas dari suatu struktur polimer. Pengukuran  $T_g$  dapat menjadi tolok ukur untuk mengevaluasi tingkat ikat silang, komposisi campuran, degradasi dan penuaan komponen-komponen polimer. Sementara itu,  $T_m$  merupakan indikator tingkat kristalinitas dari suatu polimer. Pada termogram tersebut juga dapat dilihat rentang titik leleh yang cukup lebar, menandakan tingkat kristalinitas yang rendah pada poliuretan tersegmentasi.



Gambar 32. Termogram sampel poliuretan standar

Tabel berikut ini merupakan rangkuman hasil pengukuran DSC dari sampel poliuretan.

Tabel 4. Rangkuman hasil pengukuran DSC dari sampel poliuretan

Kode Sampel	Perlakuan Sampel	Temperatur transisi Gelas-Tg (°C)	Temperatur leleh Tm (°C)
Standar	Tidak ada perlakuan	-11.35	351.55
EG-25	Sorpsi etilen glikol pada 25 °C	-11.80	336.17
DF-25	Sorpsi DOP pada 25 °C	-38.70	333.87
EG-65	Sorpsi etilen glikol pada 65 °C	-36.83	333.80
DF-65 <sup>*)</sup>	Sorpsi DOP pada 65 °C	-	337.15
HO-25	Sorpsi aquades pada 25 °C	-30.57	334.52

<sup>\*)</sup> Pengukuran dilakukan sebanyak 2 kali tetapi tetap tidak ditemukan nilai Tg

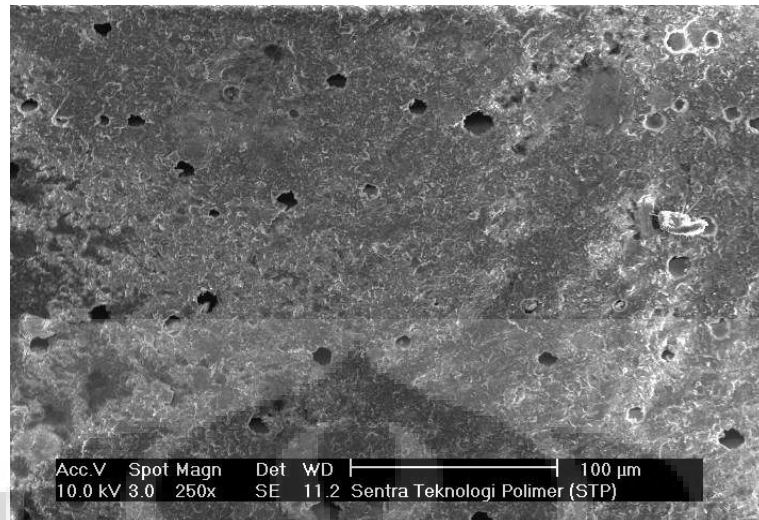
Secara umum dapat diamati adanya penurunan Tg dan Tm pada sampel yang telah diberi perlakuan sorpsi. Sebagaimana telah dijelaskan pada bagian

sebelumnya, perlakuan sorpsi dan temperatur akan memberikan pengaruh terhadap ikatan-ikatan antar molekul dalam struktur poliuretan terutama ikatan hidrogen dan van der Waals. Sorpsi EG pada temperatur 25°C (Sampel EG-25) tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap Tg tetapi menyebabkan penurunan titik leleh. Ini merupakan indikasi bahwa sorpsi EG terjadi pada bagian segmen keras dari poliuretan sehingga menyebabkan penurunan kekuatan ikatan hidrogen dalam segmen keras yang akan menurunkan ketahanan poliuretan terhadap suhu tinggi, sehingga titik leleh poliuretan mengalami penurunan.

Serupa dengan sorpsi EG pada temperatur 25°C, sorpsi EG pada temperatur 65°C dan sorpsi DOP pada 25 dan 65 °C (Sampel EG-65, DF-25 dan DF-65) juga menyebabkan penurunan pada Tg. Ini menunjukkan pada ketiga sampel tersebut juga terjadi penurunan kristalinitas segmen keras karena adanya interaksi yang melemahkan ikatan hidrogen dengan adanya sorpsi EG dan DOP di dalam segmen keras poliuretan. Penurunan Tg pada sampel DF-25, EG-65, HO-25 menunjukkan telah terjadi interaksi antara molekul DOP dan EG dengan komponen-komponen dalam poliuretan yang melemahkan ikatan antar molekul dalam poliuretan sehingga meningkatkan ketidakteraturan (amorfisitas) dalam struktur poliuretan. Secara umum hal ini ditemukan pada polimer yang mendapatkan pengaruh dari bahan *plasticizer*.<sup>17</sup>

#### **IV.4 Hasil Pengukuran *Scanning Electron Microscopy* (SEM)**

Pengukuran SEM dilakukan untuk melihat bagaimana pengaruh proses sorpsi terhadap struktur permukaan poliuretan serta untuk melihat apakah terjadi *etching* pada permukaan material.



**Gambar 33. Hasil Pengukuran SEM sampel standar dengan 250x perbesaran**

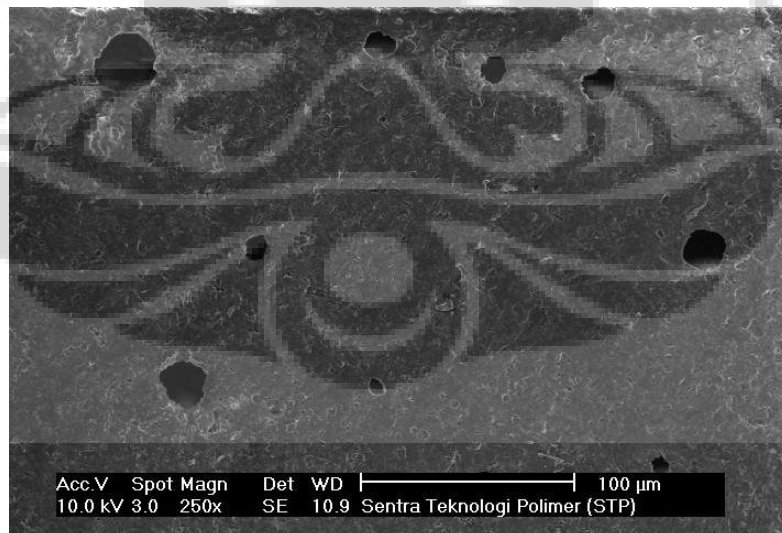


**Gambar 34. Hasil Pengukuran SEM sampel standar dengan 500x perbesaran**

Gambar 33 dan 34 merupakan hasil SEM dari sampel poliuretan standar tanpa perlakuan sorpsi dengan perbesaran 250 dan 500x. Dapat dilihat pada kedua foto tersebut poliuretan yang menjadi sampel uji memiliki pori-pori mikro pada permukaannya. pori-pori mikro tersebut menjadi jalan bagi molekul-molekul asing untuk masuk ke struktur poliuretan, jadi bisa diperkirakan selama ukurannya lebih kecil dari pori-pori poliuretan, molekul-molekul tersebut dapat memasuki pori-pori material. Tetapi untuk berdifusi ke dalam struktur poliuretan dibutuhkan

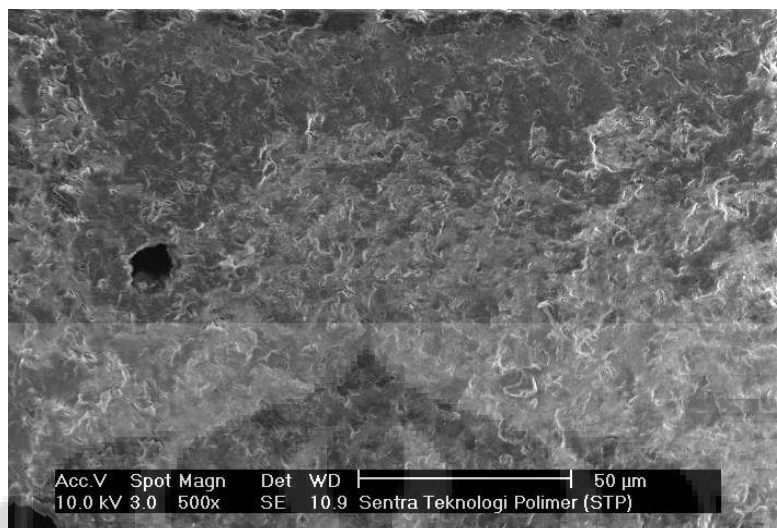
adanya interaksi molekuler yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Hal ini telah dibuktikan dengan membandingkan hasil sorpsi DOP dengan EG dan air. DOP yang memiliki ukuran jauh lebih besar dapat berdifusi jauh lebih banyak ke dalam poliuretan.

Gambar 35, 36, 39 dan 40 masing masing merupakan hasil SEM untuk sampel EG-25 dan DF-25 dengan perbesaran 250 dan 500x. Morfologi permukaan polimer pada kedua sampel tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan sampel standar. Hasil ini mengkonfirmasi hasil yang diperoleh pada pengukuran sifat mekanik (bagian IV.4) karena pada temperatur 25°C tidak terjadi perubahan yang signifikan terhadap sifat mekanik kedua sampel. Pada Gambar 37,38 dan 41 yang merupakan hasil SEM sampel EG-65 dan DF-65 dapat diamati adanya perubahan morfologi permukaan sampel poliuretan sebagai akibat adanya proses *plasticizing* dan *softening* yang juga menyebabkan penutupan pori-pori mikro dipermukaan poliuretan.

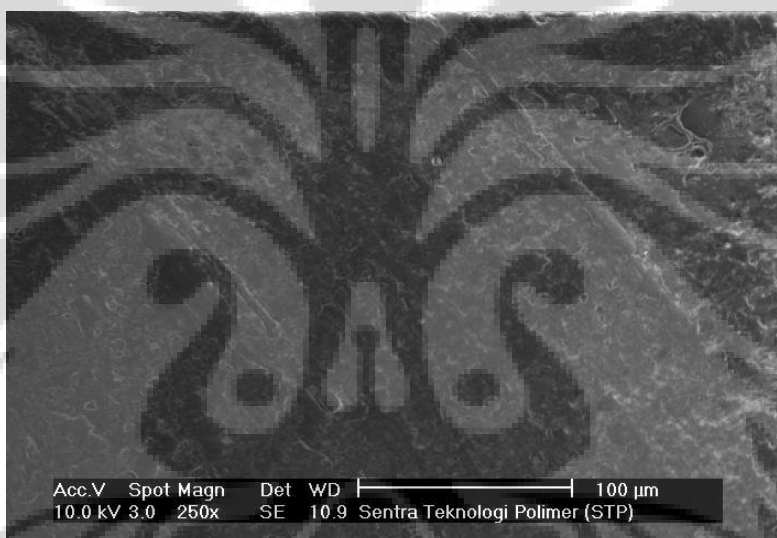


**Gambar 35. Hasil Pengukuran SEM sampel EG-25 dengan 250x perbesaran**

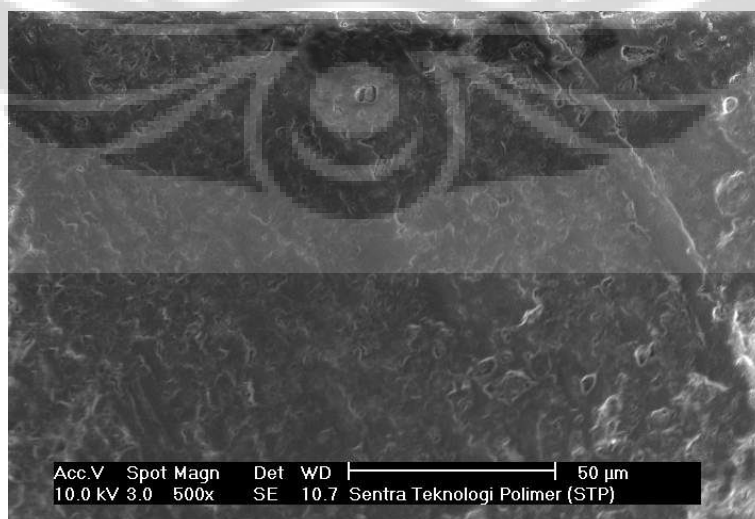




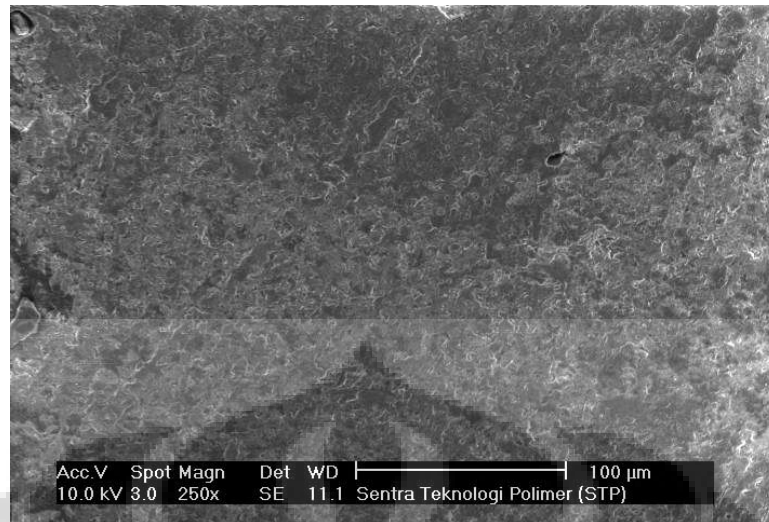
**Gambar 36. Hasil Pengukuran SEM sampel EG-25 dengan 500x perbesaran**



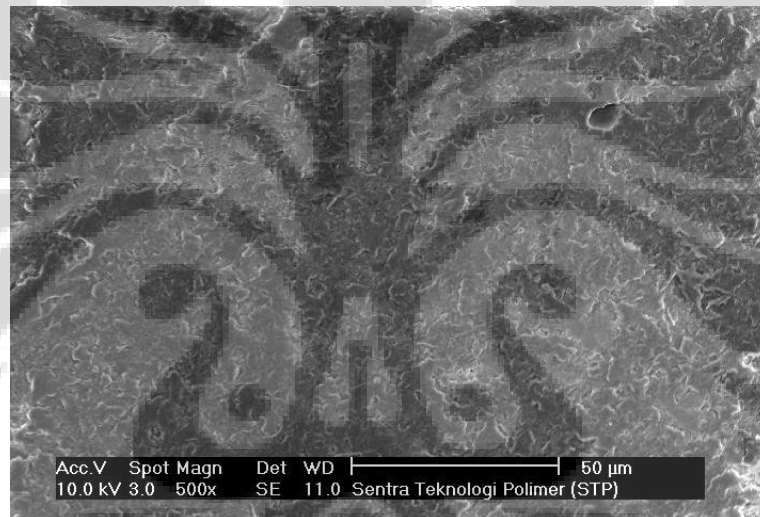
**Gambar 37. Hasil Pengukuran SEM sampel EG-65 dengan 250x perbesaran**



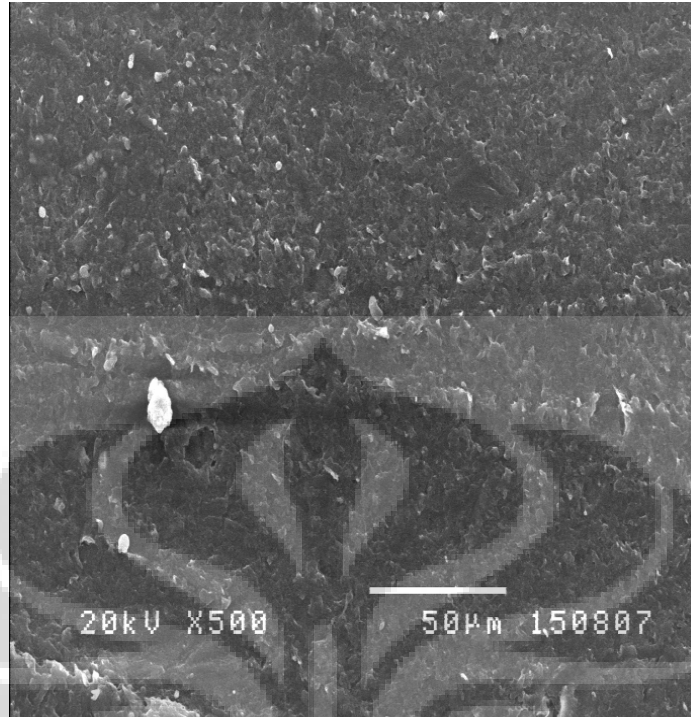
**Gambar 38. Hasil Pengukuran SEM sampel EG-65 dengan 500x perbesaran**



**Gambar 39. Hasil Pengukuran SEM sampel DF-25 dengan 250x perbesaran**



**Gambar 40. Hasil Pengukuran SEM sampel DF-25 dengan 500x perbesaran**



**Gambar 41. Hasil Pengukuran SEM sampel DF-65 dengan 500x perbesaran**

#### **IV.5 Perubahan sifat mekanik poliuretan akibat sorpsi dioktil ftalat dan etilen glikol**

Sifat mekanik dan termal poliuretan sangat dipengaruhi oleh komponen-komponen pembentuknya, tetapi secara umum poliuretan merupakan polimer yang memiliki sifat mekanik yang sangat baik. Sifat mekanik yang sangat baik tersebut merupakan hasil dari kecenderungan poliuretan untuk membentuk susunan komponen-komponennya secara teratur menjadi rantai molekul yang streoregular, fenomena ini lazim disebut dengan kristalinitas. Poliuretan merupakan polimer yang memiliki campuran bagian kristalin dan amorf dalam strukturnya yang disebut dengan segmentasi.<sup>1</sup>

Segmen keras dalam poliuretan mengandung atom-atom dengan keelektronegatifan yang tinggi seperti Nitrogen dan Oksigen yang dapat menghasilkan ikatan hidrogen antara dua molekul atau rantai polimer. Ikatan

hidrogen antara dua rantai polimer akan meningkatkan sifat fisik dan mekanik poliuretan secara signifikan. Karena adanya ikatan hidrogen inilah gaya antar molekul pada segmen keras jauh lebih besar dari yang terdapat pada segmen lunak sehingga sangat mempengaruhi sifat mekanik poliuretan seperti modulus, kekerasan dan kekuatan sobek (*tear strength*). Kinerja poliuretan pada temperatur yang berubah sangat tergantung dari struktur segmen keras atau bagian rigid dari poliuretan yang merupakan hasil kontribusi dari diisosiyanat dan pemanjangan rantai.

Berikut merupakan kaidah penting yang menghubungkan antara struktur dan sifat dari poliuretan.

1. Berat molekul : Dengan meningkatnya berat molekul maka sifat sifat seperti kuat tarik, titik leleh, elongasi, elastisitas dan temperatur transisi gelas akan meningkat hingga titik tertentu dan kemudian menjadi konstan.
2. Gaya antar molekul: Ikatan hidrogen (seperti yang telah disebutkan di atas), polarisabilitas, momen dipol dan ikatan van der Waals merupakan ikatan-ikatan yang terbentuk dari interaksi molekul-molekul polimer sebagai tambahan terhadap ikatan kimia antar atom. Semua ikatan ini dapat dipengaruhi oleh temperatur dan *stress*. Ikatan yang paling kuat adalah ikatan hidrogen.
3. Kekakuan rantai: kehadiran cincin aromatik dalam poliuretan akan meningkatkan titik leleh, kekerasan dan menurunkan elastisitas. Sedangkan kehadiran ikatan yang fleksibel seperti ikatan eter akan menurunkan kekerasan, titik leleh dan temperatur transisi gelas.

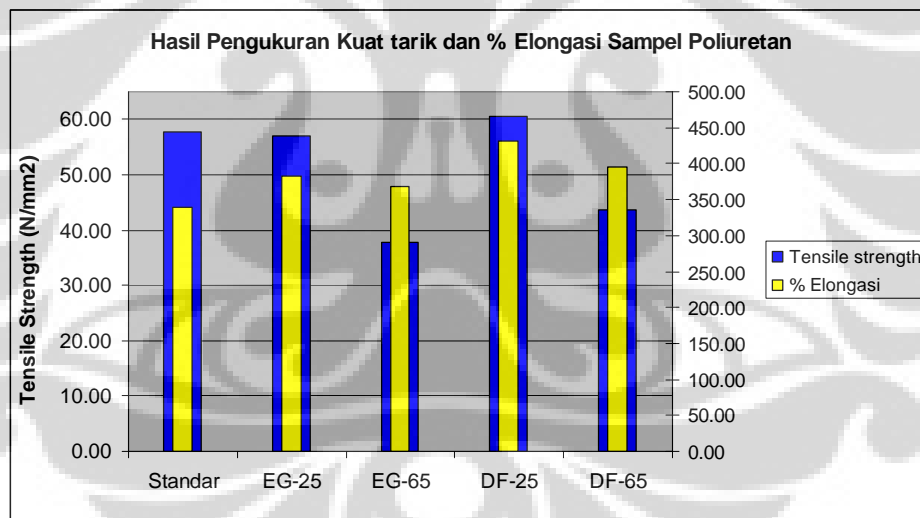
4. Ikatan silang : Peningkatan derajat ikatan silang dalam poliuretan akan meningkatkan rigiditas dan menurunkan elongasi serta kemampuan untuk mengembang (*swelling*) terhadap pelarut.

Seperti telah diilustrasikan pada Gambar 22, dalam material poliuretan yang menjadi sampel uji terdapat 2 komponen yang menjadi segmen keras dalam poliuretan dan keduanya memiliki gugus aromatik dalam strukturnya yaitu MDI (*4,4'-Methylene diphenyl diisocyanate*) dan MCDEA (Benzamine, *4,4'* methylene bis [*3, chloro-2,6-diethyl-*]). Di atas telah dijelaskan, kehadiran cincin aromatik dalam poliuretan akan meningkatkan rigiditas dan titik leleh poliuretan. Di samping itu, kehadiran MCDEA yang memiliki dua gugus fungsi amina sebagai pemanjang rantai akan menghasilkan ikatan hidrogen dan ikatan silang dengan jumlah besar dalam poliuretan. Dengan melihat komponen pembentuknya saja dapat diperkirakan poliuretan ini akan memiliki kuat tarik yang besar, kekerasan yang tinggi dan ketahanan yang baik terhadap pelarut dan temperatur tinggi.

Tabel 5 dan grafik pada Gambar 42 merupakan rangkuman hasil pengukuran kuat tarik (*tensile strength*) dan kekerasan sampel poliuretan standar dan yang telah diberi perlakuan sorpsi. Sampel yang diambil untuk uji tarik diambil dari percobaan pada temperatur 25 dan 65°C untuk melihat bagaimana pengaruh sorpsi pada titik ekstrim percobaan terhadap kinerja material, dalam hal ini kuat tarik dan kekerasan yang menjadi 2 parameter yang sangat penting dalam aplikasi produk elastomer poliuretan. Data lengkap hasil pengukuran sifat mekanik dapat dilihat pada bagian lampiran.

Tabel 5. Hasil pengukuran kuat tarik (tensile strength), % elongasi dan kekerasan

Kode Sampel	Tebal sampel (mm)	Lebar sampel (mm)	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	% Elongasi	Kekerasan (Shore A)
Standar	2.46	6.02	57.83	339.56	99.00
EG-25	2.33	6.08	57.01	383.51	98.00
EG-65	2.42	6.04	37.75	368.19	97.00
DF-25	2.35	6.04	60.58	430.55	98.00
DF-65	2.33	6.20	43.67	395.35	97.00



Gambar 42. Grafik hasil pengukuran kuat tarik, % elongasi sampel poliuretan

Secara umum hasil pengukuran menunjukkan sorpsi pada temperatur 25 °C tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik dan kekerasan dari poliuretan. Pada temperatur ini tidak terjadi penurunan kuat tarik pada sampel EG-25 sedangkan pada sampel DF-25 terjadi sedikit peningkatan kuat

tarik, yaitu sebesar  $3 \text{ N/mm}^2$ . Ini merupakan fenomena yang sangat menarik karena di saat yang sama hasil pengukuran juga menunjukkan elongasi pada kedua jenis sampel juga meningkat yaitu sebesar 44% pada sampel EG-25 dan sebesar 91% untuk sampel DF 25. Meningkatnya kuat tarik pada sampel DF-25 dan tidak terjadi perubahan kuat tarik pada EG-25 merupakan indikasi tidak terjadi perubahan secara struktur (dalam hal ini tidak terjadi perubahan ataupun gangguan terhadap ikatan hidrogen antar molekul dalam segmen keras) sehingga kekuatan poliuretan secara umum tidak berkurang. Bertambahnya kuat tarik pada sampel DF-25 meskipun tidak signifikan merupakan hasil dari interaksi molekuler DOP dengan bagian segmen lunak.

Bertambahnya elongasi yang cukup signifikan pada DF-25 juga merupakan hasil interaksi DOP dengan segmen lunak karena DOP akan berdifusi ke dalam bagian segmen lunak yang akan menghasilkan efek *plasticizing* atau pelenturan sehingga poliuretan dapat mulur lebih panjang. Pelenturan atau *plasticizing* ini juga terjadi pada sampel EG-25 yang meningkatkan elongasinya. Penurunan kekerasan material meskipun tidak signifikan dari 99 Shore A menjadi 98 Shore A juga merupakan indikasi dari efek *plasticizing* ini.

Pada temperatur  $65^\circ\text{C}$ , pengaruh proses sorpsi lebih terlihat pada kekuatan poliuretan. Kekuatan tarik pada kedua sampel mengalami penurunan secara cukup signifikan, sampel EG-65 mengalami penurunan kekuatan tarik sebesar  $20 \text{ N/mm}^2$  sedangkan pada sampel DF-65 terjadi penurunan kekuatan tarik sebesar  $14 \text{ N/mm}^2$ . Disaat yang bersamaan, terjadi peningkatan elongasi, masing-masing sebesar 28.7 % dan 55.8% untuk sampel EG-65 dan DF-65. Penurunan kekuatan tarik pada kedua sampel merupakan hasil sorpsi kedua jenis pelarut ke dalam

struktur poliuretan yang menghasilkan pelemahan ikatan antar molekul polimer. Pada sampel EG-65 terjadi pelemahan yang signifikan karena molekul-molekul EG yang memiliki tingkat kepolaran tinggi sehingga lebih banyak berinteraksi dengan segmen keras poliuretan yang memberikan kontribusi paling besar dalam poliuretan. Pelemahan terjadi melalui mekanisme pelemahan ikatan antar molekul segmen keras (dalam hal ini ikatan hidrogen). Pada sampel DF-65, penurunan kuat tarik tidak sebesar sampel EG-65 karena mekanisme pelemahan ikatan yang terjadi berbeda dengan EG-65. DOP lebih banyak berdifusi ke dalam bagian segmen lunak yang melemahkan ikatan antar molekul dalam segmen lunak. Terhadap segmen keras, DOP tidak secara langsung tidak melemahkan ikatan-ikatan hidrogen dalam segmen keras tetapi molekul-molekul DOP berinteraksi dengan gugus-gugus aromatik dalam segmen keras sehingga akan mengakibatkan penurunan keteraturan dalam segmen keras yang akhirnya menurunkan kekuatan poliuretan. Peningkatan dalam elongasi dan penurunan kekerasan poliuretan menjadi 97 Shore A menunjukkan adanya efek *plasticizing* dan *softening* dalam struktur poliuretan.



## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

Dari penelitian yang telah dilakukan terhadap sampel poliuretan yang memiliki diamina aromatik sebagai komponen pemanjang rantainya diperoleh informasi penting tentang mekanisme terjadinya sorpsi dioktilftalat dan etilen glikol ke dalam poliuretan. Data eksperimen menunjukkan mekanisme sorpsi yang berbeda antara ke dua jenis zat. Hal ini sangat dipengaruhi oleh polaritas molekul, dimana DOP merupakan senyawa non polar sedangkan EG merupakan senyawa polar. Hasil ini dikonfirmasi oleh hasil percobaan sorpsi air terhadap poliuretan. Percobaan desorpsi menunjukkan retensi poliuretan yang baik terhadap DOP sehingga tidak terjadi desorpsi, sedangkan untuk EG terjadi desorpsi dalam media aquades.

Sorpsi DOP dan EG pada temperatur 25°C tidak mempengaruhi kinerja poliuretan. Sedangkan pada temperatur 65°C kuat tarik dan kekerasan poliuretan menurun setelah adanya sorpsi DOP dan EG yang terjadi akibat adanya pelemahan ikatan antar molekul dalam struktur poliuretan. Mekanisme pelemahan ikatan antar molekul pada sorpsi DOP dan EG juga berbeda dan dipengaruhi oleh polaritas struktur. Adanya interaksi molekuler antara DOP dan EG dengan poliuretan juga ditunjukkan oleh penurunan temperatur transisi gelas ( $T_g$ ) dan temperatur leleh ( $T_m$ ).

## DAFTAR ACUAN

1. Szycher, Michael, *Handbook of Polyurethane*; CRC Press, Boca Raton, Florida, 1999.
2. Wikipedia-encyclopedia, *Polyurethane*. [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com).
3. Wright, James I., *Using Polyurethane in Medical Application*, MDDI, 2006.
4. Gupta T., Debasish De, Adhikari B., *Polymer Internasional*. 2003, 52, 938.
5. Sathiyalekshmi K., Gopalakrishnan S., *Advances in Polymer Technology*. 2004, 23, 91.
6. Schneider N. S., Illinger J. L., Cleaves M. A., *Polymer Engineering And Science*, 1986, 26, 22.
7. Sreenivasan K., Jayabalan M., Rao K. V. C., *Journal Of Applied Polymer Science*, 1992, 45, 2105.
8. Kanapitsas A., Pissis P., Gomez Ribelles J. L., Monleon Pradas M., Privalko E. G., Privalko V. P., *Journal Of Applied Polymer Science*, 1999, 71, 1209.
9. Pulat, Mehli Ka, Akdogan, Ayten, *Journal Of Applied Polymer Science*, 2002, 85, 193.
10. Martin K. McDermott, LeRoy W. Schroeder, Shay L. Balsis, Nicole A. Paradiso, Michelle L. Byrne, Robert M. Briber, *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 91, 1086.
11. B. K. Kendaganna Swamy, Siddaramaiah, B. Vijaya Kumar Naidu, N. N. Mallikarjuna, T. M. Aminabahvi, *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, 96, 874.
12. H. Kumar, Siddaramaiah, *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 104, 378.

13. T. M. Aminabahvi, S.B. Harogopad, U.S. Aithal, *Journal of Applied Polymer Science*, 1991,42,3267.
14. Scheirs, John, *Compositional and Failure Analysis of Polymers A Practical Approach*, John Wiley & Sons, Chichester, England, 2000.
15. Ewing, G. W., *Instrumental Methods of Chemical Analysis*, McGraw Hill Book Company, New York, 1985.
16. MEG Global, *Ethylene Glycol, Product guide*, MEG Global Group Companies, 2008.
17. Sperling, L.H., *Introduction to Physical Polymer Science*, John Wiley and Sons, New Jersey, 2006.
18. Cheremisinoff, Nicholas P., *Polymer Characterization: Laboratory Technique and Analysis*, Noyes Publication, New Jersey, 2006.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1 Data percobaan sorpsi dan desorpsi

**Tabel 6. Data Percobaan sorpsi pada temperatur 25°C**

Sorpsi			Temperatur: 25°C														
Media: Dioktil Ftalat																	
Nama sampel	Ukuran sampel (mm x mm)	Tebal sampel (mm)	Berat Sampel (g) Setelah Rentang Waktu (jam)														
			0	8	24	48	72	96	168	216	264	336	408	504	600	720	
DF-So-25a	29,5x30,71	2,45	2,4630	2,4683	2,4712	2,4734	2,4763	2,4781	2,4828	2,4851	2,4875	2,4897	2,4936	2,4976	2,5007	2,5036	
		% sorpsi	0,00	0,22	0,33	0,42	0,54	0,61	0,80	0,90	0,99	1,08	1,24	1,40	1,53	1,65	
DF-So-25c	30,90x30,95	2,39	2,5744	2,5806	2,5822	2,5855	2,5876	2,5888	2,5937	2,5972	2,5985	2,6019	2,6052	2,6088	2,6125	2,6158	
		% sorpsi	0,00	0,24	0,30	0,43	0,51	0,56	0,75	0,89	0,94	1,07	1,20	1,34	1,48	1,61	
		Rata-rata sorpsi	%	0,00	0,23	0,32	0,43	0,53	0,59	0,78	0,89	0,97	1,08	1,22	1,37	1,51	1,63
		Deviasi standar		0,00	0,02	0,02	0,01	0,02	0,04	0,04	0,01	0,04	0,01	0,03	0,05	0,04	0,03

Media: Etilen glikol																	
Nama sampel	Ukuran sampel (mm x mm)	Tebal sampel (mm)	Berat Sampel (g) Setelah Rentang Waktu (jam)														
			0	8	24	48	72	96	168	216	264	336	408	504	600	720	
EG-So-25a	30,81x30,28	2,59	2,7084	2,7123	2,7139	2,7168	2,7192	2,7206	2,7258	2,7288	2,7312	2,7344	2,7378	2,7420	2,7456	2,7493	
		% sorpsi	0,00	0,14	0,20	0,31	0,40	0,45	0,64	0,75	0,84	0,96	1,09	1,24	1,37	1,51	
EG-So-25b	29,62x30,30	2,08	2,2040	2,2061	2,2073	2,2086	2,2110	2,2121	2,2166	2,2183	2,2203	2,2239	2,2264	2,2294	2,2324	2,2349	
		% sorpsi	0,00	0,10	0,15	0,21	0,32	0,37	0,57	0,65	0,74	0,90	1,02	1,15	1,29	1,40	
		Rata-rata sorpsi	%	0,00	0,12	0,18	0,26	0,36	0,41	0,61	0,70	0,79	0,93	1,05	1,20	1,33	1,46
		Deviasi standar		0,00	0,03	0,04	0,07	0,06	0,06	0,05	0,07	0,07	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08

**Tabel 7. Data Percobaan sorpsi pada temperatur 45°C**

Sorpsi			Temperatur: 45°C										
Media: Dioktil Ftalat													
Nama Sampel	Ukuran sampel (mm x mm)	Tebal sampel (mm)	Berat Sampel (g) Setelah Rentang Waktu (jam)										
			0	24	48	72	168	264	360	480	576	720	
DF-So-45a	29,86x29,80	2,23	2,2291	2,2447	2,2524	2,2579	2,2737	2,2848	2,2942	2,3064	2,3136	2,3206	
		% sorpsi	0,00	0,70	1,05	1,29	2,00	2,50	2,92	3,47	3,79	4,10	
DF-So-45b	28,94x28,11	2,24	1,9301	1,9433	1,9495	1,9535	1,9675	1,9792	1,9888	1,9940	1,9994	2,0054	
		% sorpsi	0,00	0,68	1,01	1,21	1,94	2,54	3,04	3,31	3,59	3,90	
		Rata-rata sorpsi	%	0,00	0,69	1,03	1,25	1,97	2,52	2,98	3,39	3,69	4,00
		Deviasi standar		0,00	0,01	0,03	0,06	0,04	0,03	0,09	0,11	0,14	0,14

Media: Etilen glikol													
Nama Sampel	Ukuran sampel (mm x mm)	Tebal sampel (mm)	Berat Sampel (g) Setelah Rentang Waktu (jam)										
			0	24	48	72	168	264	360	480	576	720	
EG-So-45a	29,61x28,88	2,25	2,1523	2,1665	2,1765	2,1852	2,2083	2,2277	2,2394	2,2463	2,2512	2,2576	
		% sorpsi	0,00	0,66	1,12	1,53	2,60	3,50	4,05	4,37	4,60	4,89	
EG-So-45b	29,76x29,16	2,12	2,0768	2,0933	2,1035	2,1117	2,1338	2,1479	2,1566	2,1645	2,1684	2,1710	
		% sorpsi	0,00	0,79	1,29	1,68	2,74	3,42	3,84	4,22	4,41	4,54	
		Rata-rata sorpsi	%	0,00	0,73	1,21	1,60	2,67	3,46	3,94	4,30	4,50	4,71
		Deviasi standar		0,00	0,10	0,11	0,11	0,10	0,06	0,14	0,10	0,13	0,25



Tabel 10. Data Percobaan desorpsi pada temperatur 45°C

Desorpsi

Temperatur: 45°C

Sampel hasil sorpsi Dioktil Ftalat

Nama Sampel	Ukuran sampel (mm x mm)	Tebal sampel (mm)	Berat Sampel (g) Setelah Rentang Waktu (jam)									
			0	24	48	72	168	264	360	480	576	720
DF-De-45a	29.86x29.80	2.23	2.3206	2.3325	2.3369	2.3391	2.3395	2.3396	2.3396	2.3395	2.3394	2.3393
		% sorpsi/desorpsi	0.00	0.51	0.70	0.80	0.81	0.82	0.82	0.81	0.81	0.81
DF-De-45b	28.94x28.11	2.24	2.0054	2.0221	2.0258	2.0274	2.0279	2.0280	2.0279	2.0279	2.0277	2.0276
		% sorpsi/desorpsi	0.00	0.83	1.02	1.10	1.12	1.13	1.12	1.12	1.11	1.11
		Rata-rata % sorpsi/desorpsi	0.00	0.67	0.86	0.95	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96
		Deviasi standar	0.00	0.23	0.22	0.21	0.22	0.22	0.21	0.22	0.21	0.21

Sampel hasil sorpsi Etilen Glikol

Nama Sampel	Ukuran sampel (mm x mm)	Tebal sampel (mm)	Berat Sampel (g) Setelah Rentang Waktu (jam)									
			0	24	48	72	168	264	360	480	576	720
EG-De-45a	29.61x28.88	2.25	2.2576	2.2768	2.2531	2.2428	2.2298	2.2246	2.2215	2.2205	2.2201	2.2200
		% sorpsi/desorpsi	0.00	0.85	-0.20	-0.66	-1.23	-1.46	-1.60	-1.64	-1.66	-1.67
EG-De-45b	29.76x29.16	2.12	2.1710	2.1946	2.1719	2.1624	2.1510	2.1462	2.1435	2.1423	2.1419	2.1417
		% sorpsi/desorpsi	0.00	1.09	0.04	-0.40	-0.92	-1.14	-1.27	-1.32	-1.34	-1.35
		Rata-rata % sorpsi/desorpsi	0.00	0.97	-0.08	-0.53	-1.08	-1.30	-1.43	-1.48	-1.50	-1.51
		Deviasi standar	0.00	0.17	0.17	0.18	0.22	0.23	0.24	0.23	0.23	0.22

Tabel 11. Data Percobaan desorpsi pada temperatur 65°C

Desorpsi

Temperatur: 65°C

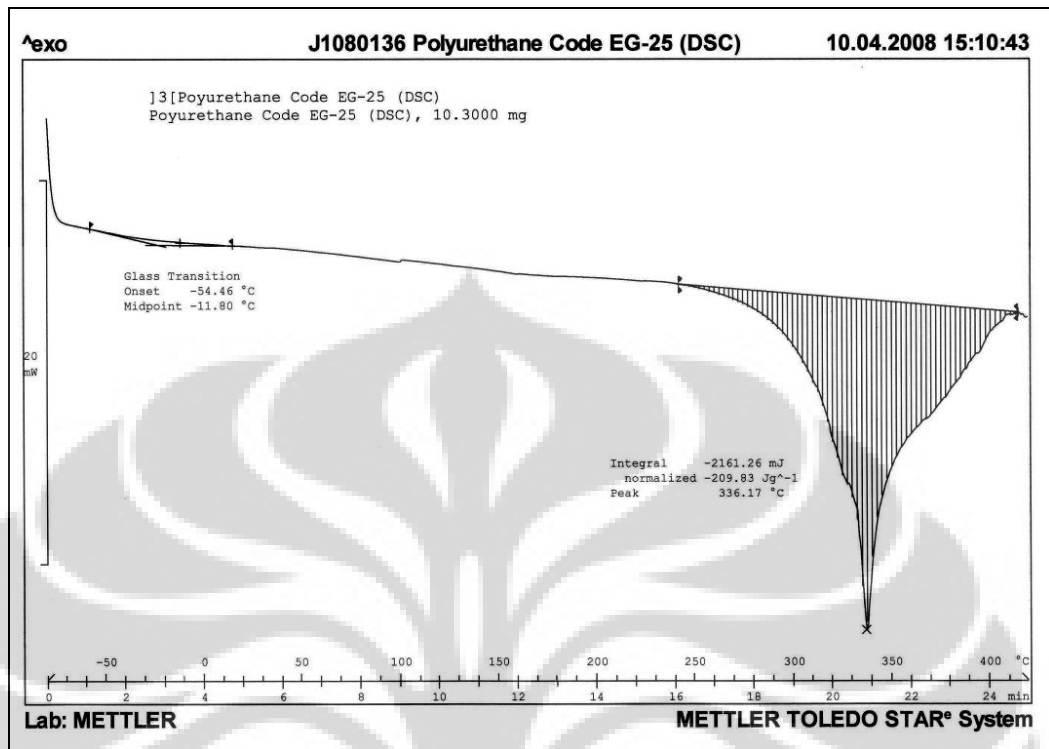
Sampel hasil sorpsi Dioktil Ftalat

Nama Sampel	Ukuran sampel (mm x mm)	Tebal sampel (mm)	Berat Sampel (g) Setelah Rentang Waktu (jam)											
			0	24	48	72	96	144	216	312	480	576	672	720
DF-De-65a	25.9 x 29.22	2.2	2.3375	2.3675	2.3681	2.3677	2.3677	2.3670	2.3672	2.3669	2.3668	2.3668	2.3667	
		% sorpsi/desorpsi	0.00	1.28	1.31	1.29	1.29	1.26	1.27	1.26	1.26	1.25	1.25	
DF-De-65b	30.05 x 29.81	2.28	2.4750	2.5071	2.5080	2.5075	2.5077	2.5074	2.5073	2.5072	2.5072	2.5071	2.5065	
		% sorpsi/desorpsi	0.00	1.30	1.33	1.31	1.32	1.31	1.31	1.30	1.31	1.30	1.27	
		Rata-rata % sorpsi/desorpsi	0.00	1.29	1.32	1.30	1.31	1.29	1.29	1.28	1.28	1.28	1.26	
		Deviasi standar	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	

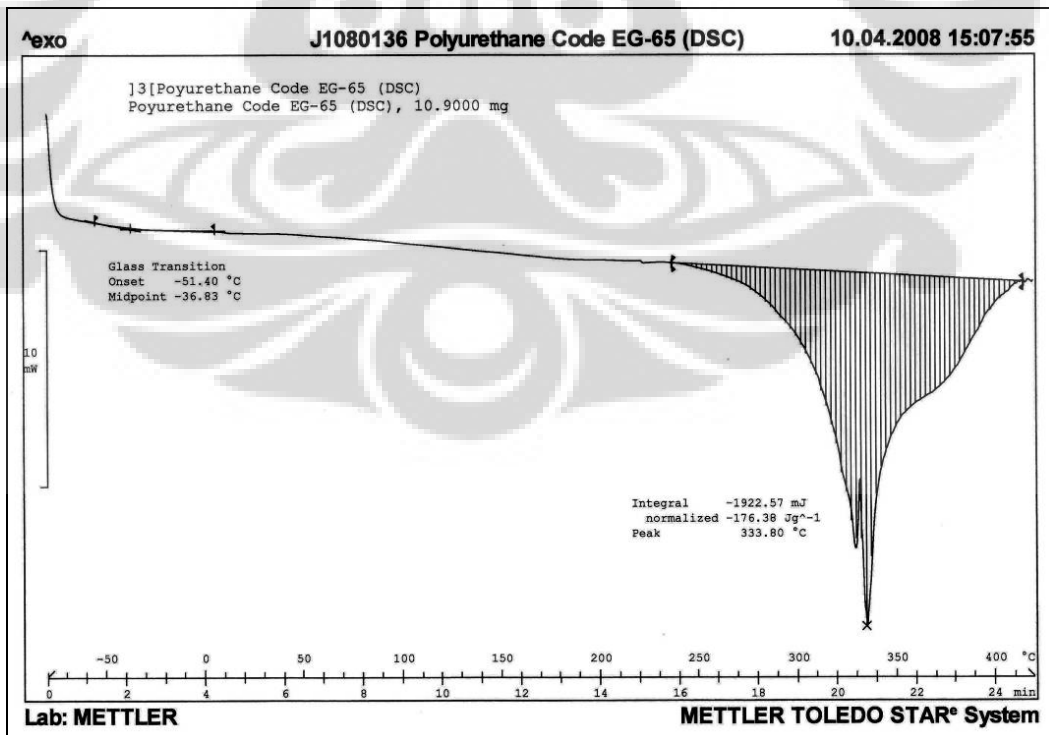
Sampel hasil sorpsi Etilen Glikol

Nama Sampel	Ukuran sampel (mm x mm)	Tebal sampel (mm)	Berat Sampel (g) Setelah Rentang Waktu (jam)											
			0	24	48	72	96	144	216	312	480	576	672	720
EG-De-65a	29.96 x 29.42	2.36	2.5648	2.5908	2.5602	2.5442	2.5341	2.5226	2.5183	2.5170	2.5158	2.5147	2.5138	
		% sorpsi/desorpsi	0.00	1.01	-0.18	-0.80	-1.20	-1.65	-1.81	-1.86	-1.91	-1.95	-1.99	
EG-De-65c	30.44 x 29.94	2.29	2.5790	2.6110	2.5807	2.5613	2.5514	2.5383	2.5336	2.5312	2.5299	2.5290	2.5278	
		% sorpsi/desorpsi	0.00	1.24	0.07	-0.69	-1.07	-1.58	-1.76	-1.85	-1.90	-1.94	-1.99	
		Rata-rata % sorpsi/desorpsi	0.00	1.13	-0.06	-0.74	-1.13	-1.61	-1.79	-1.86	-1.91	-1.95	-1.99	
		Deviasi standar	0.00	0.16	0.17	0.08	0.09	0.05	0.04	0.01	0.00	0.01	0.00	

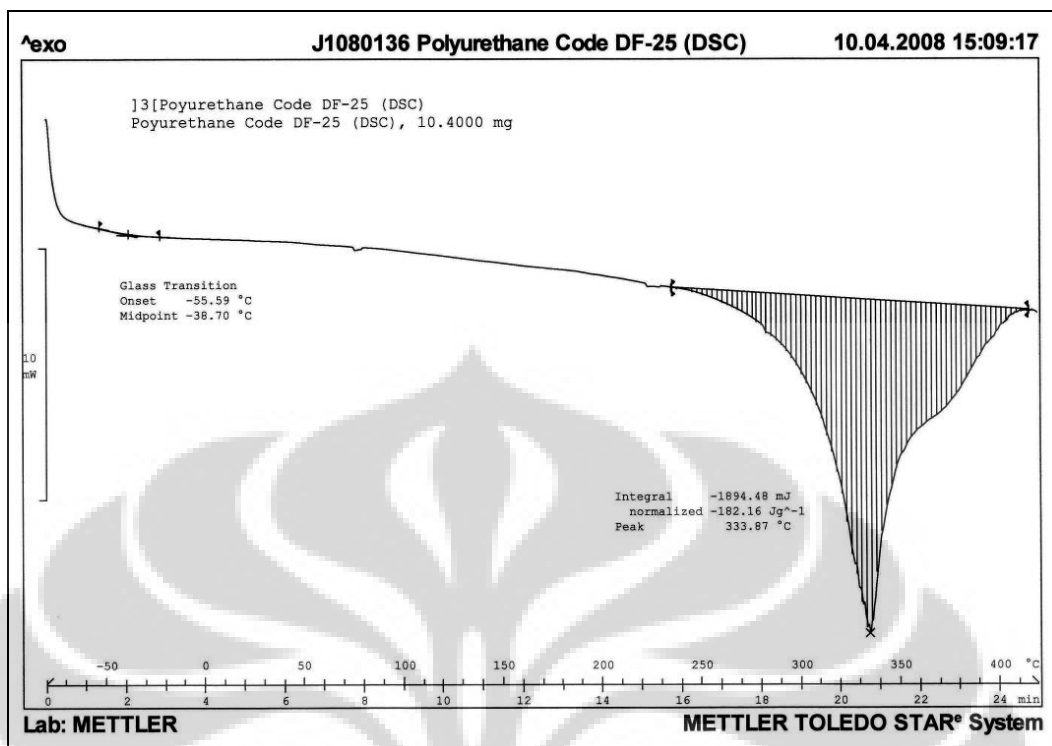
## Lampiran 2 Data termogram DSC



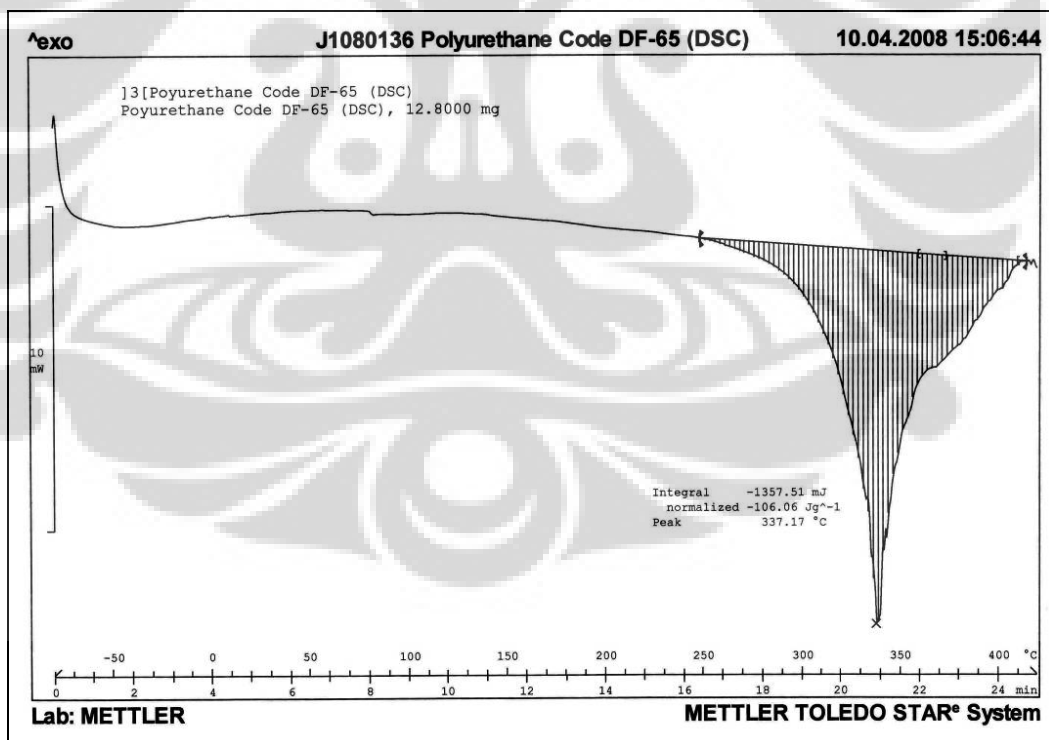
Gambar 43. Termogram sampel poliuretan dengan perlakuan sorpsi etilen glikol pada 25°C



Gambar 44. Termogram sampel poliuretan dengan perlakuan sorpsi etilen glikol pada 65°C

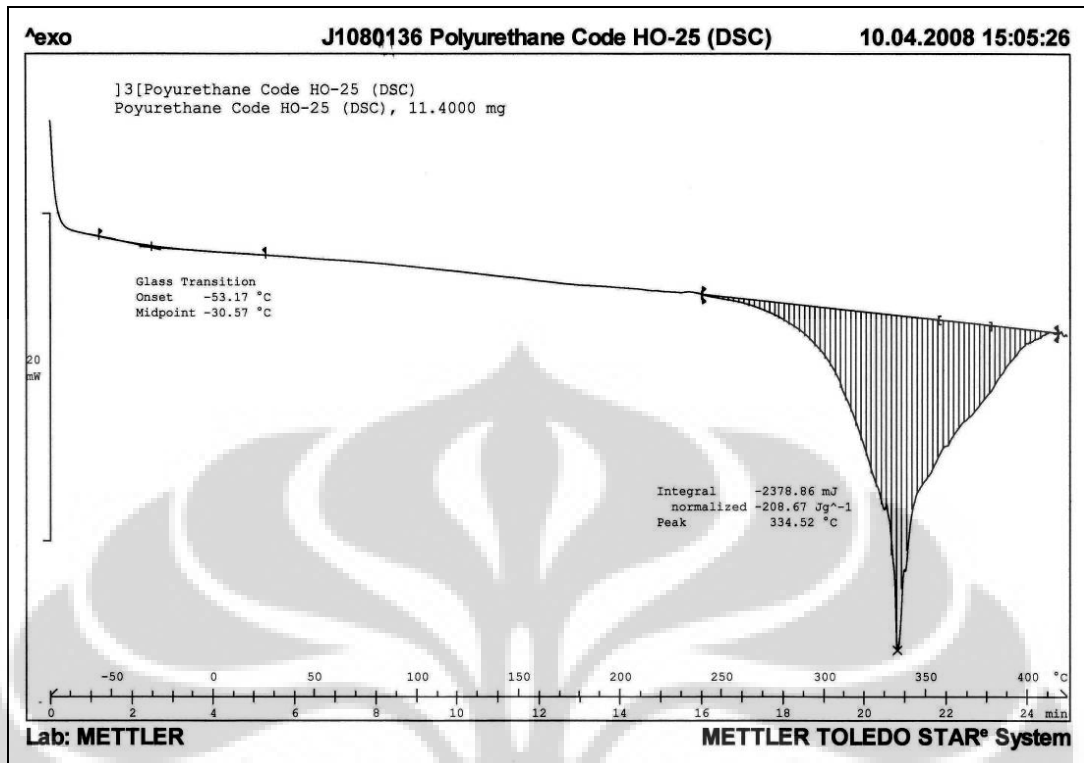


Gambar 45. Termogram sampel poliuretan dengan perlakuan sorpsi DOP pada 25°C



Gambar 46. Termogram sampel poliuretan dengan perlakuan sorpsi DOP pada 65°C





Gambar 47. Termogram sampel poliuretan dengan perlakuan sorpsi air pada 25°C

### Lampiran 3 Data pengukuran uji tarik dan kekerasan

#### Sampel Standar

No	Tebal sampel (mm)	Lebar sampel (mm)	Lo (mm)	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	% Elongasi	Kekerasan (Shore A)
1	2.43	5.97	25	55.57	326.64	99
2	2.47	6.05	25	61.75	361.18	99
3	2.47	6.04	25	56.18	330.86	99
<b>Rata-rata</b>	<b>2.46</b>	<b>6.02</b>	<b>25</b>	<b>57.83</b>	<b>339.56</b>	<b>99</b>
<b>Deviasi standar</b>	<b>0.02</b>	<b>0.04</b>	<b>0</b>	<b>2.78</b>	<b>15.38</b>	<b>0</b>

#### Sampel: DF-25

No	Tebal sampel (mm)	Lebar sampel (mm)	Lo (mm)	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	% Elongasi	Kekerasan (Shore A)
1	2.34	6.02	25	57.59	467.36	98
2	2.35	6.05	25	62.08	412.00	98
3	2.35	6.05	25	62.08	412.30	98
<b>Rata-rata</b>	<b>2.35</b>	<b>6.04</b>	<b>25</b>	<b>60.58</b>	<b>430.55</b>	<b>98</b>
<b>Deviasi standar</b>	<b>0.00</b>	<b>0.01</b>	<b>0</b>	<b>2.12</b>	<b>26.03</b>	<b>0</b>

#### Sampel: DF-65

No	Tebal sampel (mm)	Lebar sampel (mm)	Lo (mm)	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	% Elongasi	Kekerasan (Shore A)
1	2.3	6.10	25	61.87	384.26	98
2	2.34	6.10	25	53.61	408.50	98
3	2.36	6.04	25	55.56	357.78	98
<b>Rata-rata</b>	<b>2.33</b>	<b>6.08</b>	<b>25</b>	<b>57.01</b>	<b>383.51</b>	<b>98</b>
<b>Deviasi standar</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>	<b>0</b>	<b>3.53</b>	<b>20.71</b>	<b>0</b>

#### Sampel: EG-25

No	Tebal sampel (mm)	Lebar sampel (mm)	Lo (mm)	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	% Elongasi	Kekerasan (Shore A)
1	2.48	6.30	25	41.83	370.70	97
2	2.32	6.15	25	45.57	398.82	97
3	2.20	6.16	25	43.60	416.52	97
<b>Rata-rata</b>	<b>2.33</b>	<b>6.20</b>	<b>25</b>	<b>43.67</b>	<b>395.35</b>	<b>97</b>
<b>Deviasi standar</b>	<b>0.11</b>	<b>0.07</b>	<b>0</b>	<b>1.53</b>	<b>18.87</b>	<b>0</b>

#### Sampel: EG-65

No	Tebal sampel (mm)	Lebar sampel (mm)	Lo (mm)	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	% Elongasi	Kekerasan (Shore A)
1	2.42	6.06	25	34.80	343.14	97
2	2.45	6.02	25	38.06	365.28	97
3	2.40	6.04	25	40.39	396.16	97
<b>Rata-rata</b>	<b>2.42</b>	<b>6.04</b>	<b>25</b>	<b>37.75</b>	<b>368.19</b>	<b>97</b>
<b>Deviasi standar</b>	<b>0.02</b>	<b>0.02</b>	<b>0</b>	<b>2.29</b>	<b>21.74</b>	<b>0</b>