

## DAFTAR ISI

<b>COVER</b> .....	<b>i</b>
<b>JUDUL</b> .....	<b>ii</b>
<b>PERSETUJUAN TIM PROMOTOR</b> .....	<b>iii</b>
<b>PERSETUJUAN TIM PENGUJI</b> .....	<b>iv</b>
<b>PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI</b> .....	<b>v</b>
<b>PRAKATA</b> .....	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>x</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN</b> .....	<b>xiv</b>
<b>INTISARI</b> .....	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan dan Batasan Masalah</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Keaslian Penelitian</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4 Tujuan Penelitian</b> .....	<b>6</b>
<b>1.5 Manfaat Penelitian</b> .....	<b>6</b>
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1 Poli Etilen Tereftalat</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2 Proses Hidrolisis Alkali Poliester</b> .....	<b>7</b>
<b>2.3 Limbah Cair Proses Hidrolisis Alkali Poliester</b> .....	<b>8</b>
<b>2.4 Pemungutan Kembali TA dari Limbah Cair dan Pemurnian TA</b> .....	<b>9</b>
<b>2.5 Asam Tereftalat (TA)</b> .....	<b>11</b>
<b>2.6 Kristalisasi</b> .....	<b>13</b>
<b>2.7 Sifat dan karakter kristal</b> .....	<b>15</b>
<b>2.8 Reaktivitas TA (Reaksi antara TA dengan DGEBA)</b> .....	<b>16</b>
<b>2.9 Landasan Teori</b> .....	<b>17</b>
<b>2.9.1 Reaksi Kimia</b> .....	<b>18</b>
<b>2.9.2 Kesetimbangan Ion dalam Larutan</b> .....	<b>18</b>
<b>2.9.3 Kristalisasi</b> .....	<b>19</b>
<b>2.9.4 Reaksi TA &amp; DGEBA</b> .....	<b>22</b>

<b>2.9.5</b>	<b>Kelarutan TA.....</b>	<b>25</b>
<b>2.10</b>	<b>Hipotesis .....</b>	<b>26</b>
<b>BAB III</b>	<b>METODE PENELITIAN.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.</b>	<b>Bahan Penelitian.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.</b>	<b>Rangkaian Alat Penelitian.....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.</b>	<b>Cara Kerja .....</b>	<b>29</b>
3.3.1.	Penyiapan Bahan Baku .....	29
3.3.2.	Pemurnian dengan kristalisasi dengan reaksi kimia .....	29
3.3.3.	Pemurnian dengan kristalisasi pendinginan .....	30
3.3.4.	Karakterisasi TA hasil pemurnian .....	30
3.3.5.	Uji reaktivitas TA dengan DGEBA .....	31
<b>3.4.</b>	<b>Pengamatan dan pengukuran .....</b>	<b>31</b>
<b>3.5.</b>	<b>Interpretasi Data .....</b>	<b>32</b>
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Penyiapan TA Kasar .....</b>	<b>33</b>
4.1.1	Karakteristik Limbah Cair .....	33
4.1.2	Pengendapan TA dari limbah cair .....	34
4.1.3	Karakteristik TA Kasar .....	35
<b>4.2</b>	<b>Pemurnian TA dengan Kristalisasi Reaktif.....</b>	<b>36</b>
4.2.1	Keseimbangan ion tereftalat.....	36
4.2.2	Hasil kristal TA yang terbentuk .....	38
4.2.3	Distribusi ukuran kristal TA .....	48
<b>4.3</b>	<b>Pemurnian TA dengan kristalisasi pendinginan .....</b>	<b>56</b>
4.4.1	Hasil kristal TA yang terbentuk .....	59
4.4.2	Distribusi Kristal TA .....	61
<b>4.4</b>	<b>Reaktivitas TA .....</b>	<b>63</b>
4.4.1	Model Reaksi TA dengan DGEBA .....	64
4.4.2	Reaktivitas TA.....	69
<b>4.5</b>	<b>Karakteristik Hasil TA .....</b>	<b>74</b>
4.5.1	Kelarutan .....	76
4.5.2	Titik Lebur.....	82
4.5.3	Morfologi dan komposisi kimia permukaan.....	83
4.5.4	Gugus Fungsional.....	85
4.5.5	Struktur kristal.....	86
4.5.6	Rapat curah .....	87
<b>4.6</b>	<b>Karakteristik Fisik Oligomer TA dan DGEBA.....</b>	<b>88</b>



UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

**Studi Pemungutan Asam Tereftalat (TA) dari Limbah Cair Industri Kain Poliester dengan Metode Kristalisasi**

Bekti Marlana, Prof. Ir. Rochmadi, SU., Ph.D., IPU.; Prof. Ir. Hary Sulisty, SU., Ph.D., IPU.

Universitas Gadjah Mada, 2023 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>91</b>
<b>5.1 KESIMPULAN.....</b>	<b>91</b>
<b>5.2 SARAN .....</b>	<b>91</b>
<b>REFERENSI.....</b>	<b>92</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>100</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.1.</b> Penelitian Pemungutan Kembali TA.....	4
<b>Tabel 2.1</b> Pemungutan dan Pemurnian TA .....	10
<b>Tabel 2.2.</b> Struktur kristal TA. ....	11
<b>Tabel 2.3</b> Syarat mutu asam tereftalat murni (SNI 06-2153-1991).....	12
<b>Tabel 2.4.</b> Distribusi ukuran.....	16
<b>Tabel 4.1.</b> Karakteristik limbah cair.....	33
<b>Tabel 4.2.</b> Pengaruh adsorpsi karbon terhadap TA. ....	34
<b>Tabel 4.3.</b> Karakteristik TA Kasar. ....	35
<b>Tabel 4.4.</b> Massa TA pada pH konstan dengan variasi pH 5, 4 dan 3. ....	39
<b>Tabel 4.5.</b> Massa TA pada variasi konsentrasi larutan sekunder. ....	41
<b>Tabel 4.6.</b> Konsentrasi TA terlarut pada variasi konsentrasi larutan sekunder.....	42
<b>Tabel 4.7.</b> Massa TA pada variasi kecepatan volumetrik larutan sekunder.....	43
<b>Tabel 4.8.</b> Konsentrasi TA terlarut pada variasi kecepatan volumetrik larutan sekunder. ..	44
<b>Tabel 4.9.</b> Massa TA pada variasi suhu. ....	45
<b>Tabel 4.10.</b> Konsentrasi TA terlarut dalam larutan pada variasi suhu. ....	46
<b>Tabel 4.11.</b> Massa TA pada variasi kecepatan putaran pengaduk. ....	47
<b>Tabel 4.12.</b> Konsentrasi TA terlarut variasi kecepatan putaran pengaduk.....	48
<b>Tabel 4.13.</b> Kelarutan TA sebagai fungsi suhu. ....	59
<b>Tabel 4.14.</b> Massa kristal TA pada variasi suhu pendinginan.....	59
<b>Tabel 4.15</b> Rendemen TA. ....	60
<b>Tabel 4.16</b> Nilai konstanta kecepatan reaksi model.....	71
<b>Tabel 4.17.</b> Analisis Multivariat.....	73
<b>Tabel 4.18.</b> Karakteristik TA hasil pemurnian dengan kristalisasi reaktif dan pendinginan. .....	75
<b>Tabel 4.19.</b> Nilai entalpi pelarutan TA dalam air.....	76
<b>Tabel 4.20.</b> Nilai kelarutan (fraksi mol) TA dalam pelarut DMAc.....	78
<b>Tabel 4.21.</b> Nilai parameter untuk model Apleblat dan $\lambda h$ . ....	79
<b>Tabel 4.22.</b> Nilai parameter model $\lambda h$ kelarutan TA dalam DMAc.....	79
<b>Tabel 4.23.</b> Entalpi, entropi dan energi bebas Gibbs pelarutan TA fungsi suhu.....	80
<b>Tabel 4.24.</b> Entalpi TA perhitungan plot van't Hoff.....	81
<b>Tabel 4.25.</b> Titik lebur TA. ....	82
<b>Tabel 4.26.</b> Komposisi kimia TA hasil analisis EDX. ....	84
<b>Tabel 4.27.</b> Rapat curah TA. ....	87
<b>Tabel 4.28.</b> Hasil analisis kuat tarik. ....	89

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b> Produsen serat poliester terbesar dunia tahun 2015 .....	1
<b>Gambar 2.1.</b> Struktur kimia Poli Etilen Tereftalat. ....	7
<b>Gambar 2.2.</b> Model polimorph kristal TA.....	11
<b>Gambar 2.3.</b> Kurva kelarutan jenuh dan lewat jenuh. ....	13
<b>Gambar 2.4.</b> Pertumbuhan pada antar muka kristal-larutan.....	15
<b>Gambar 2.5.</b> Skema reaksi antara di epoksi dengan asam di karboksilat.....	17
<b>Gambar 2.6</b> Hubungan antara kondisi lewat jenuh dengan kecepatan nukleasi, kecepatan pertumbuhan dan ukuran kristal rata-rata. ....	20
<b>Gambar 3.1.</b> Tahapan Penelitian. ....	27
<b>Gambar 3.2.</b> Rangkaian alat kristalisasi <i>batch</i> . ....	28
<b>Gambar 3.3.</b> Rangkaian alat polimerisasi.....	29
<b>Gambar 4.1.</b> Konsentrasi ionik spesies dalam larutan 1 M Na <sub>2</sub> TP fungsi pH. ....	36
<b>Gambar 4.2.</b> Konsentrasi kesetimbangan TA berdasarkan model termodinamika. ....	37
<b>Gambar 4.3.</b> a) Massa kristal TA dan b) peningkatan massa TA pada variasi pH.....	40
<b>Gambar 4.4</b> a) Massa endapan TA dan b) peningkatan massa TA variasi konsentrasi. ....	42
<b>Gambar 4.5.</b> a) Massa endapan TA dan b) peningkatan massa TA pada variasi kecepatan volumetrik larutan sekunder. ....	43
<b>Gambar 4.6.</b> (a) Massa endapan TA dan (b) peningkatan massa TA pada variasi suhu reaksi. ....	46
<b>Gambar 4.7.</b> a) Massa endapan TA dan b) peningkatan massa TA pada variasi kecepatan putaran pengaduk. ....	47
<b>Gambar 4.8.</b> Distribusi kristal pada pH 5, suhu 30°C dan konsentrasi larutan sekunder 0,5 M variasi waktu. ....	49
<b>Gambar 4.9.</b> Pengamatan fluktuasi pH pada a) pH 5, b) pH 4, c) pH 3.....	50
<b>Gambar 4.10</b> Pengaruh pH terhadap a) distribusi ukuran, b) ukuran rerata kristal dan c) ukuran rerata terpankaskan kristal .....	51
<b>Gambar 4.11.</b> a) Distribusi ukuran kristal dan b) ukuran rerata kristal variasi konsentrasi larutan sekunder.....	53
<b>Gambar 4.12.</b> a) Distribusi ukuran kristal dan b) ukuran rerata kristal variasi kecepatan umpan larutan sekunder.....	54
<b>Gambar 4.13.</b> a) Distribusi ukuran kristal dan b) ukuran rerata kristal variasi suhu reaksi. ....	54
<b>Gambar 4.14</b> a) Distribusi ukuran kristal dan b) ukuran rerata kristal variasi kecepatan pengadukan.....	55
<b>Gambar 4.15.</b> a) Distribusi ukuran kristal dan b) ukuran rerata kristal variasi waktu. ....	57
<b>Gambar 4.16</b> Massa endapan TPA pada pendinginan dari 70 ke 35°C dengan variasi kecepatan pengadukan dan waktu.....	57
<b>Gambar 4.17.</b> Massa TA variasi waktu pengamatan.....	58
<b>Gambar 4.18</b> Kristalisasi pendinginan bertahap. ....	58
<b>Gambar 4.19.</b> Distribusi ukuran kristal TA kasar pada kristalisasi pendinginan fungsi suhu. ....	61
<b>Gambar 4.20.</b> Distribusi ukuran kristal TA-Re pada kristalisasi pendinginan fungsi suhu. ....	61
<b>Gambar 4.21.</b> Distribusi ukuran kristal PTA pada kristalisasi pendinginan fungsi suhu....	62



<b>Gambar 4.22.</b> Ukuran kristal rerata TA fungsi suhu kristalisasi. ....	62
<b>Gambar 4.23.</b> Pengaruh proses penurunan suhu dan suhu tetap terhadap super saturasi. ..	63
<b>Gambar 4.24.</b> Konsentrasi asam (mgek/g) pada reaksi TA kasar dengan DGEBA pada berbagai suhu dan model. ....	66
<b>Gambar 4.25.</b> Konsentrasi asam (mgek/gr) pada reaksi TA reaktif dengan DGEBA pada berbagai suhu dan model .....	67
<b>Gambar 4.26.</b> Konsentrasi asam (mgek/g) reaksi TA pendinginan dengan DGEBA pada berbagai suhu. ....	68
<b>Gambar 4.27.</b> Konsentrasi asam (mgek/g) pada reaksi PTA dengan DGEBA pada berbagai suhu dan model. ....	69
<b>Gambar 4.28.</b> a. log kelarutan TA pada berbagai suhu dan b. van't Hoff plot. ....	76
<b>Gambar 4.29.</b> Kelarutan TA dalam DMAc fungsi suhu. ....	77
<b>Gambar 4.30.</b> Kelarutan TA dalam DMAc dengan model Apelblat dan $\lambda h$ . ....	80
<b>Gambar 4.31.</b> Plot vant Hoff kelarutan TA dalam DMAc. ....	81
<b>Gambar 4.32.</b> Termogram DSC TA. ....	82
<b>Gambar 4.33.</b> Morfologi TA kristalisasi reaktif (a) TA kasar perbesaran 3000, (b) TA kasar perbesaran 10.000, (c) TA-R perbesaran 3000, (d) TA-R perbesaran 10.000. ....	83
<b>Gambar 4.34.</b> Morfologi TA hasil kristalisasi pendinginan dari umpan (a) TA kasar, (b) TA-Re 1, (c) TA-Re 2, (d) PTA. ....	83
<b>Gambar 4.35.</b> Morfologi PTA (a) perbesaran 1.500, (b) perbesaran 3.000, (c) perbesaran 5.000, (d) perbesaran 10.000. ....	84
<b>Gambar 4.36.</b> Kurva FTIR TA. ....	85
<b>Gambar 4.37.</b> Kurva XRD TA. ....	86
<b>Gambar 4.38.</b> Perbandingan volume TA Kasar, TA-R, TA-C dan PTA. ....	87
<b>Gambar 4.39.</b> Sampel uji kuat tarik dan uji kekerasan.....	88
<b>Gambar 4.40.</b> Hasil analisis kekerasan.....	89
<b>Gambar 4.41.</b> Perbandingan nilai skala kekerasan pada plastik.....	90

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1. Analisis TA .....</b>	<b>100</b>
<b>Lampiran 2. Perhitungan Termodinamika Kristalisasi Reaktif .....</b>	<b>112</b>
<b>Lampiran 3. Perhitungan Model Reaksi TA dengan DGEBA .....</b>	<b>114</b>

## DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

$A$	: luas permukaan ( $\text{cm}^2$ )
$A_{hom}$	: faktor frekuensi nukleasi homogen (jumlah nuclei $\text{cm}^{-3} \text{det}^{-1}$ )
$A_{het}$	: faktor frekuensi nukleasi heterogen (jumlah nuclei $\text{cm}^{-3} \text{det}^{-1}$ )
$b$	: order kinetik nukleasi
$B$	: kecepatan nukleasi (jumlah $\text{cm}^{-3} \text{det}^{-1}$ )
$B_{hom}^o$	: kecepatan nukleasi homogen
$B_{het}^o$	: kecepatan nukleasi heterogen
$B_0$	: kecepatan nukleasi berdasarkan volume operasional total kristaliser
$C_A$	: konsentrasi monomer A ( $\text{mol dm}^{-3}$ )
$C_B$	: konsentrasi monomer B ( $\text{mol dm}^{-3}$ )
$C_{A0}$	: konsentrasi A awal ( $\text{mol dm}^{-3}$ )
$c$	: konsentrasi saat tertentu ( $\text{g cm}^{-3}$ )
$c^*$	: konsentrasi jenuh kesetimbangan ( $\text{g cm}^{-3}$ )
$c_i$	: konsentrasi solute di larutan pada interface kristal-larutan
$g$	: order kinetik pertumbuhan
$G$	: kecepatan pertumbuhan kristal linear ( $\text{cm det}^{-1}$ )
$k$	: konstanta kecepatan reaksi polimerisasi ( $\text{det}^{-1}$ )
$kd$	: koefisien transfer massa difusi
$kr$	: konstanta laju reaksi permukaan (integrasi)
$k_G$	: koefisien pertumbuhan kristal
$k_g$	: konstanta kinetika pertumbuhan
$k_N$	: koefisien kecepatan nukleasi
$k_n$	: konstanta kinetika nukleasi
$L$	: ukuran kristal (cm)
$m_T$	: densitas suspensi kristal ( $\text{g cm}^{-3}$ )
$n$	: populasi partikel pada ukuran tertentu per unit volume (jumlah $\text{cm}^{-4}$ )
$n$	: populasi partikel ukuran tertentu berdasarkan volume total (jumlah $\text{cm}^{-1}$ )
$n_0$	: populasi inti berdasarkan volume operasional total kristaliser (jumlah $\text{cm}^{-1}$ )
$N$	: jumlah total partikel (jumlah)
$p$	: konversi fraksional monomer
$R_0$	: kecepatan/laju perubahan konsentrasi monomer per satuan waktu per volum
$R$	: konstanta gas ( $8,315 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
$t$	: waktu (det)
$T$	: suhu (K)
$V$	: volume suspensi ( $\text{cm}^3$ )
$W$	: massa kristal terbentuk (g)





UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

**Studi Pemungutan Asam Tereftalat (TA) dari Limbah Cair Industri Kain Poliester dengan Metode Kristalisasi**

Bekti Marlana, Prof. Ir. Rochmadi, SU., Ph.D., IPU.; Prof. Ir. Hary Sulisty, SU., Ph.D., IPU.

Universitas Gadjah Mada, 2023 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

- $\alpha$  : faktor bentuk volume kristal
- $f(\varphi)$  : penurunan hambatan energi nukleasi karena adanya fase padatan asing
- $\gamma$  : tegangan permukaan
- $\eta$  : viskositas ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$ )
- $\sigma$  : lewat jenuh relatif
- $\Delta\mu$  : perubahan potensi kimia
- $\rho_1$  : densitas cairan ( $\text{g cm}^{-3}$ )
- $\rho_c$  : densitas kristal ( $\text{g cm}^{-3}$ )