



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 184834

# **PENGARUH KATALIS SENGG ASETAT TERHADAP BERAT MOLEKUL, BIODEGRADASI, DAN WATER ABSORPTION PADA BIOPLASTIK POLI(ASAM LAKTAT) HASIL SINTESIS METODE RING - OPENING POLIMERIZATION LAKTIDA DARI ASAM LAKTAT**

MUHAMMAD BAKHTIAR  
NRP. 0251154000080

Dosen Pembimbing:  
Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.  
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





**TUGAS AKHIR - TL 184834**

**PENGARUH KATALIS SENG ASETAT TERHADAP BERAT MOLEKUL, BIODEGRADASI, DAN WATER ABSORPTION PADA BIOPLASTIK POLI(ASAM LAKTAT) HASIL SINTESIS METODE RING - OPENING POLIMERIZATION LAKTIDA DARI ASAM LAKTAT**

**MUHAMMAD BAKHTIAR**  
NRP. 0251154000080

Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.  
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT - TL 184834**

**THE EFFECT OF ZINC ACETATE CATALYST IN MOLECULAR WEIGHT, BIODEGRADATION, AND WATER ABSORPTION OF POLY(LACTIC ACID) BIOPLASTIC SYNTHESIZED FROM LACTIC ACID BY LACTIDE RING - OPENING POLIMERIZATION METHOD**

**MUHAMMAD BAKHTIAR**  
NRP. 0251154000080

Advisor

Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.

Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

**MATERIAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2019

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**PENGARUH KATALIS SENG ASETAT TERHADAP  
BERAT MOLEKUL, BIODEGRADASI, DAN WATER  
ABSORPTION PADA BIOPLASTIK POLI(ASAM  
LAKTAT) HASIL SINTESIS METODE RING – OPENING  
POLIMERIZATION LAKTIDA DARI ASAM LAKTAT**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana  
pada  
Bidang Studi Material Inovatif  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material  
Fakultas Teknologi Industri  
Institute Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**MUHAMMAD BAKHTIAR**  
NRP. 0251154000080

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. Hosta Ardhyana, S.T., M.Sc.....(Pembimbing 1)

2. Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.....(Pembimbing 2)



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**PENGARUH KATALIS SENG ASETAT TERHADAP  
BERAT MOLEKUL, BIODEGRADASI, DAN WATER  
ABSORPTION PADA BIOPLASTIK POLI(ASAM  
LAKTAT) HASIL SINTESIS METODE RING – OPENING  
POLIMERIZATION LAKTIDA DARI ASAM LAKTAT**

**Nama Mahasiswa** : Muhammad Bakhtiar  
**NRP** : 02511540000080  
**Departemen** : Teknik Material  
**Pembimbing 1** : Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T.,  
M.Sc.  
**Pembimbing 2** : Dr. Widyastuti, S. Si., M. Si.

**Abstrak**

*Poli(asam laktat) (PLA) merupakan senyawa keluarga poliester alifatik yang berasal dari sintesis asam  $\alpha$  – hidroksi. PLA memiliki sifat biodegradabel dan biokompatibel yang baik sehingga dapat diaplikasikan sebagai implant, benang operasi, dan drug delivery. PLA diperoleh dengan cara sintesis asam laktat menggunakan metode ring – opening polymerization (ROP) laktida. Proses polimerisasi PLA dari asam laktat menggunakan katalis seng asetat. Salah satu faktor yang berpengaruh pada sintesis PLA adalah konsentrasi katalis. Penambahan katalis meningkatkan laju reaksi sehingga mempercepat pembentukan PLA. Sintesis PLA dari asam laktat dilakukan melalui tiga tahap yaitu prepolimerisasi, depolimerisasi, dan polimerisasi. Prepolimerisasi asam laktat menghasilkan oligomer PLA sedangkan depolimerisasi menghasilkan laktida. ROP laktida dilakukan menggunakan katalis seng asetat dengan variasi konsentrasi yaitu 0; 0,2; 0,4; 0,6; dan 0,8%wt dengan temperatur reaksi 150°C selama lima jam dengan tekanan -2 bar. Berdasarkan hasil FTIR, PLA sintesis memiliki kemiripan dengan PLA standar. Peak pada wavenumber 3486  $\text{cm}^{-1}$  merupakan gugus fungsi –OH stretch, peak pada*

wavenumber  $1741\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus fungsi  $\text{-C=O stretch}$ , dan peak pada wavenumber  $1124$  dan  $1085\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus fungsi  $\text{-C-O- stretch}$ . Penambahan katalis seng asetat pada ROP laktida meningkatkan berat molekul PLA, menurunkan biodegradasi, dan menurunkan persentase water absorption, namun penambahan katalis ketingkat yang lebih tinggi menyebabkan berat molekul berkurang sedangkan biodegradasi dan persentase water absorption meningkat. Berat molekul, persentase weight loss, dan water absorption optimum diperoleh pada penambahan katalis seng asetat (0,4%wt) sebesar 18.434 g/mol, 61,75%, dan 8,25%.

**Kata Kunci:** Berat Molekul, Biodegradasi, Poli(Asam Laktat), Ring – Opening Polymerization, Seng Asetat, Water Absorption.

**THE EFFECT OF ZINC ACETATE CATALYST IN  
MOLECULAR WEIGHT, BIODEGRADATION, AND  
WATER ABSORPTION OF POLY(LACTIC ACID)  
BIOPLASTIC SYNTHESIZED FROM LACTIC ACID BY  
LACTIDE RING – OPENING POLIMERIZATION  
METHOD**

**Name** : Muhammad Bakhtiar  
**NRP** : 0251154000080  
**Departmen** : Material Engineering  
**Advisor 1** : Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T.,  
M.Sc.  
**Advisor 2** : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

**Abstract**

*Poly(lactic acid) (PLA) is an aliphatic polyester family compound derived from the synthesis of  $\alpha$ -hydroxy acids. PLA has good biodegradable and biocompatible properties so that it can be applied as an implant, surgical thread, and drug delivery. PLA is obtained by synthesis of lactic acid using the lactide ring-opening polymerization (ROP) method. The PLA polymerization process from lactic acid was used zinc acetate catalyst. The factors that influence the synthesis of PLA is the concentration of the catalyst. The addition of the catalyst increases the rate of reaction thereby accelerating the formation of PLA. The synthesis of PLA from lactic acid was carried out through the pre-polymerization, depolymerization and polymerization stages. Pre-polymerization of lactic acid produces PLA oligomers and depolymerization of PLA oligomers produces lactide. ROP of Lactide was carried out using zinc acetate catalyst with a concentration of 0; 0.2; 0.4; 0.6; and 0.8%wt and a reaction temperature of 150°C for five hours with a pressure of -2 bar. Based on the results of FTIR, synthesized PLA has similarities with standard PLA. Peak on wavenumber 3486  $\text{cm}^{-1}$  shows –OH stretch,*

*peak at wavenumber 1741 cm<sup>-1</sup> shows –C=O stretch, and peak on wavenumber 1124 and 1085 cm<sup>-1</sup> shows –C-O-stretch. The addition of zinc acetate catalyst on ROP lactide increases the molecular weight of PLA, decreases degradation, and decreases the percentage of water absorption, but the addition of a higher level catalyst causes reduced molecular weight while degradation and water absorption percentage are increased. The optimum molecular weight, weight loss, and water absorption percentage obtained by adding zinc acetate catalyst (0.4% wt) was 18,434 g / mol, 61.75%, and 8.25%.*

***Keywords: Degradation, Molecular Weight, Poly(Lactic Acid), Ring – Opening Polymerization, Water Absorption, Zinc Acetate.***

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT karena atas rahmat, hidayah, dan karunia-Nya yang senantiasa dilimpahkan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap Berat Molekul, Biodegradasi, Dan Water Absorption pada Bioplastik Poli(Asam Laktat) Hasil Sintesis Metode Ring – Opening Polimerization Laktida dari Asam Laktat”**. Laporan skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk kelulusan pada program Strata-1 di Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari dalam penyusunan skripsi tidak dapat selesai tanpa bantuan dari berbagai pihak, sehingga pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua yang telah memberikan semangat dan dorongan kepada penulis.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng., selaku Kepala Departemen Teknik Material, FTI – ITS.
3. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T, M.Sc., selaku dosen wali dan dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan arahan serta ilmu yang sangat bermanfaat.
4. Ibu Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan banyak masukan dan arahan.
5. MT17 yang banyak memberikan pengalaman berharga selama di Departemen Teknik Material, FTI – ITS.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan segala bentuk saran serta masukan dari berbagai pihak. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Polimer.....	5
2.2 Asam Laktat.....	7
2.3 Poli(Asam Laktat).....	13
2.4 <i>Ring-Opening Polymerization</i> Laktida.....	19
2.5 Katalis.....	24
2.6 Aplikasi PLA.....	25
2.7 Penelitian Sebelumnya.....	28
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>29</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	29
3.2 Diagram Fishbone.....	31
3.3 Bahan Penelitian.....	32
3.4 Peralatan Penelitian.....	34
3.5 Variabel Penelitian.....	38
3.6 Pelaksanaan Penelitian.....	38
3.7 Rancangan Penelitian.....	44

<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>45</b>
4.1 Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap Karakteristik Struktur PLA .....	45
4.2 Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap Berat Molekul PLA .....	53
4.3 Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap Biodegradasi PLA .....	56
4.4 Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap <i>Water Absorption</i> PLA .....	58
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	<b>63</b>
5.1 Kesimpulan .....	63
5.2 Saran.....	63
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>65</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>71</b>
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	<b>85</b>



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Rantai Linier pada <i>Poly(Vinyl Chloride)</i> .....	5
<b>Gambar 2.2</b>	Klasifikasi Kopolimer Berdasarkan Rantai dan Monomer Penyusunnya yaitu (a) Kopolimer Alternating, (b) Kopolimer Blok, (c) Kopolimer Acak, dan (d) Kopolimer Cabang .....	6
<b>Gambar 2.3</b>	Rantai Molekul Polimer .....	7
<b>Gambar 2.4</b>	Isomer Optik Asam Laktat .....	8
<b>Gambar 2.5</b>	Sintesis Kimia Asam Laktat.....	10
<b>Gambar 2.6</b>	Proses Fermentasi Menggunakan Bakteri Asam Laktat.....	12
<b>Gambar 2.7</b>	Rumus Struktur Poli(Asam Laktat).....	14
<b>Gambar 2.8</b>	Sintesis dan Struktur Molekul (a) PLLA, (b) PDLA, dan (c) PDLA .....	15
<b>Gambar 2.9</b>	Proses Sintesis Poli(Asam Laktat) .....	16
<b>Gambar 2.10</b>	Tiga Struktur Distereomerik Laktida. ....	19
<b>Gambar 2.11</b>	Mekanisme Polimerisasi Pembukaan Cincin Anionik .....	21
<b>Gambar 2.12</b>	Mekanisme Polimerisasi Pembukaan Cincin Kationik .....	22
<b>Gambar 2.13</b>	Mekanisme Polimerisasi Pembukaan Cincin Koordinasi - Penyisipan. ....	23
<b>Gambar 2.14</b>	Seng Asetat Dihidrat .....	25
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir Penelitian .....	30
<b>Gambar 3.2</b>	Diagram <i>Fishbone</i> .....	31
<b>Gambar 3.3</b>	Asam Laktat .....	32
<b>Gambar 3.4</b>	Seng Asetat.....	33
<b>Gambar 3.5</b>	Etil Asetat.....	33
<b>Gambar 3.6</b>	Seng Oksida .....	34
<b>Gambar 3.7</b>	Metanol .....	34
<b>Gambar 3.8</b>	<i>Hot Plate Magnetic Stirrer</i> .....	35
<b>Gambar 3.9</b>	Oven .....	35

<b>Gambar 3.10</b>	Gelas Beker .....	36
<b>Gambar 3.11</b>	Timbangan Digital .....	36
<b>Gambar 3.12</b>	Viskometer Oswald.....	37
<b>Gambar 3.13</b>	Spatula.....	37
<b>Gambar 3.14</b>	Reaktor Polimerisasi Pembukaan Cincin Laktida.....	38
<b>Gambar 3.15</b>	Alat Uji FTIR .....	40
<b>Gambar 3.16</b>	Kurva Viskositas Reduksi Vs Konsentrasi.....	42
<b>Gambar 4.1</b>	Spektra FTIR Spesimen (a) Asam Laktat, (b) PLA – Seng Asetat (0%) (c) PLA – Seng Asetat (0,2%), (d) PLA – Seng Asetat (0,4%), (e) PLA – Seng Asetat (0,6%), dan (f) PLA – Seng Asetat (0,8%).....	46
<b>Gambar 4.2</b>	Skema Reaksi Kimia Pembentukan PLA dengan Metode <i>Ring - Opening Polymerization</i> (ROP). .....	48
<b>Gambar 4.3</b>	Sintesis Asam Laktat Menjadi PLA pada Tahap Prepolimerisasi dengan Temperatur 130°C Selama 2 Jam (a) Oligomer PLA (b) Skema Reaksi Prepolimerisasi.....	50
<b>Gambar 4.4</b>	Sintesis Asam Laktat Menjadi PLA pada Tahap Depolimerisasi dengan Temperatur 140°C Selama 3 Jam (a) Laktida (b) Mekanisme Reaksi <i>Backbitting</i> pada PLA.....	51
<b>Gambar 4.5</b>	Tahapan ROP Asam Laktat Menjadi PLA (a) Poli(Asam Laktat) (PLA) (b) Mekanisme Reaksi ROP Laktida Menggunakan Katalis Seng Asetat dan Inisiator Metanol. ....	52
<b>Gambar 4.6</b>	Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap Berat Molekul PLA.....	54
<b>Gambar 4.7</b>	Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap <i>Weight</i> <i>Loss</i> PLA. ....	57

<b>Gambar 4.8</b> Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap <i>Water Absorption</i> PLA. ....	60
---	----

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Sifat Fisik Asam Laktat.....	9
<b>Tabel 2.2</b>	Bahan Baku dan Bakteri Fermentasi Asam Laktat....	11
<b>Tabel 2.3</b>	Sifat Fisik Poli(Asam Laktat).....	15
<b>Tabel 2.4</b>	Sifat Fisik Laktida .....	20
<b>Tabel 2.5</b>	Sifat Fisik dan Mekanik PLLA .....	25
<b>Tabel 2.6</b>	Sifat Mekanik Polimer Biodegradabel sebagai Material <i>Scaffold</i> pada Teknik Jaringan .....	26
<b>Tabel 2.7</b>	<i>Grade</i> PLA untuk Botol oleh Natureworks.....	27
<b>Tabel 2.8</b>	Radius Luar dan Dalam yang Terukur dari Mikrokapsul PLA Berongga .....	28
<b>Tabel 3.1</b>	Rancangan Penelitian .....	44
<b>Tabel 4.1</b>	<i>Peak</i> spektra FTIR Asam Laktat dan PLA. ....	47

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Poliiasam laktat (PLA) merupakan senyawa keluarga poliester alifatik yang berasal dari sintesis asam  $\alpha$  – hidroksi. PLA memiliki sifat biodegradabel dan biokompatibel yang cukup baik sehingga dapat diaplikasikan sebagai implant, benang operasi, dan *drug delivery*. Pembuatan PLA menggunakan tiga metode yaitu polikondensasi langsung, kondensasi dehidrasi azeotropik, dan polimerisasi pembukaan cincin laktida (Auras dkk., 2004). Pada proses sintesis PLA dengan metode ROP laktida terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi karakteristik PLA salah satunya yaitu katalis yang bertindak sebagai inisiator pada proses polimerisasi PLA. Timah (II) dan seng merupakan katalis yang dapat digunakan untuk menghasilkan polimer paling murni (Garlotta, 2001). Penggunaan katalis berbasis timah memberikan dampak buruk bagi kesehatan lingkungan terutama manusia sehingga diperlukan katalis alternatif salah satunya yaitu seng asetat. Penelitian penggunaan seng asetat sebagai katalis pernah dilakukan oleh R. Gowda dan D. Chakraborty (2010) pada proses sintesis beberapa poliester salah satunya PLA menyimpulkan bahwa seng asetat dapat digunakan sebagai katalis pada ROP laktida menghasilkan PLA dengan berat molekul 64870 g/mol. Perbandingan laktida/katalis/inisiator yang digunakan yaitu 200:1:5 dengan waktu reaksi selama 8 jam dan temperatur 145°C. Selain katalis, salah satu faktor penting pada proses ROP laktida adalah konsentrasi katalis yang digunakan. Penambahan katalis dapat meningkat laju reaksi sehingga dapat mempercepat terjadinya pembentukan polimer (Putrilia, 2014). Penelitian tentang pengaruh konsentrasi katalis seng asetat pada ROP laktida kurang detail, sehingga perlu dilakukan penelitian yang lebih mendalam tentang pengaruh konsentrasi katalis seng asetat pada proses ROP laktida terhadap karakteristik PLA yang dihasilkan.

Penelitian tentang pengaruh konsentrasi katalis pernah dilakukan oleh Muhammad Tamziz dan Agustini (2012) menggunakan stannous oktoat sebagai katalis dengan metode ROP laktida. Konsentrasi katalis yang digunakan yaitu 0; 0,05; 0,10; 0,15; dan 0,20% wt dengan waktu reaksi selama 5 jam dan temperatur yang digunakan 160°C. Dari hasil penelitian diperoleh kesimpulan konsentrasi katalis sangat berpengaruh terhadap polimer yang dihasilkan. Berat molekul yang dihasilkan meningkat berbanding lurus dengan konsentrasi katalis yang ditambahkan, akan tetapi pada konsentrasi tertentu berat molekul akan berkurang karena adanya depolimerisasi polimer yang terbentuk. Berat molekul tertinggi diperoleh pada konsentrasi katalis 0,15%wt sebesar 10557,68 g/mol. Pada konsentrasi katalis 0,20%wt berat molekul mengalami penurunan menjadi 7481,25 g/mol.

Oleh karena itu, penelitian tentang pengaruh konsentrasi katalis seng asetat terhadap karakteristik PLA pada metode *ring-opening polimerization* (ROP) laktida dari asam laktat perlu dilakukan dengan asumsi penambahan konsentrasi katalis seng asetat berpengaruh terhadap berat molekul, biodegradasi, dan *water absorption* PLA yang dihasilkan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh konsentrasi katalis seng asetat terhadap berat molekul PLA yang dihasilkan pada ROP laktida?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi katalis seng asetat terhadap biodegradasi PLA yang dihasilkan pada ROP laktida?
3. Bagaimana pengaruh konsentrasi katalis seng asetat terhadap *water absorption* PLA yang dihasilkan pada ROP laktida?



---

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk menganalisa masalah pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah yaitu:

1. Asam laktat yang digunakan diasumsikan  $L$ -Asam laktat.
2. Pengotor pada asam laktat dapat diabaikan.
3. Proses depolimerisasi diasumsikan hanya menghasilkan  $L$ -Laktida.
4. Pengaruh residu seng oksida pada proses depolimerisasi pembentukan laktida diabaikan.
5. Pengotor pada laktida dapat diabaikan.

### 1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Menganalisis pengaruh konsentrasi katalis seng asetat terhadap berat molekul PLA yang dihasilkan pada ROP laktida.
2. Menganalisis pengaruh konsentrasi katalis seng asetat terhadap biodegradasi PLA yang dihasilkan pada ROP laktida.
3. Menganalisis pengaruh konsentrasi katalis seng asetat terhadap *water absorption* PLA yang dihasilkan pada ROP laktida.

### 1.5 Manfaat

Penelitian ini dilakukan dengan harapan dapat memberikan informasi ilmiah tentang pengaruh konsentrasi katalis seng asetat terhadap karakteristik PLA seperti berat molekul, biodegradasi, dan *water absorption* pada proses polimerisasi pembentukan PLA dengan metode ROP laktida dari asam laktat sehingga dapat diketahui konsentrasi yang optimal dalam proses polimerisasi.

---

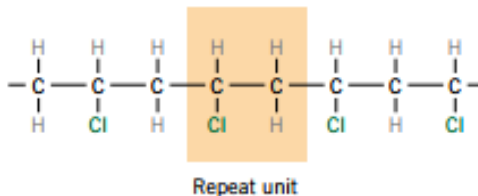
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Polimer

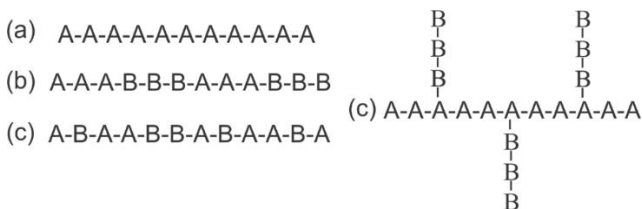
Polimer merupakan salah satu material yang banyak digunakan dalam kehidupan sehari – hari. Polimer berasal dari bahasa Yunani dari kata “*poly*” dan “*meros*” yang artinya banyak bagian. Polimer terdiri dari banyak unit berulang (monomer) yang berikatan secara kimia menjadi rantai panjang (McKeen, 2012). Secara umum polimer dapat dibedakan menjadi dua yaitu polimer alam dan polimer sintesis. Polimer alam merupakan polimer yang berasal dari makhluk hidup dan terbentuk melalui proses polimerisasi kondensasi contohnya selulosa, protein, kapas, latex, dan sutra. Sedangkan polimer sintesis merupakan polimer buatan manusia dan terbentuk melalui proses polimerisasi adisi. Industri kimia pembuatan polimer sintesis ini berkembang pesat setelah perang dunia kedua. Contoh polimer sintesis adalah serat, plastik, dan karet SBR (Putrilia, 2014).

Polimer dapat dibedakan berdasarkan monomer penyusun menjadi dua jenis yaitu homopolimer dan kopolimer. Homopolimer adalah polimer yang tersusun dari monomer yang sejenis contohnya yaitu *Poly(vinyl chloride)*, *Poly(methyl methacrylate)*, *Polystyrene*, *Polyethylene*, dan *Polypropylene*. Monomer penyusun *Poly(vinyl chloride)* berupa *vinyl chloride* ( $\text{CH}_2\text{CHCl}$ ) yang membentuk rantai linier melalui reaksi polimerisasi (Gambar 2.1).



**Gambar 2.1** Rantai Linier pada *Poly(Vinyl Chloride)*  
(Callister, 2009).

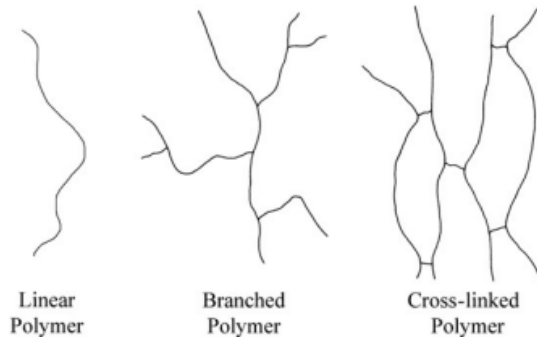
Sedangkan kopolimer adalah polimer yang tersusun dua atau lebih monomer contohnya yaitu Nilon-66 yang terbentuk dari polimerisasi asam adipat dan heksametilendiamin (Callister, 2009). Kopolimer dapat diklasifikasikan berdasarkan monomer – monomer yang menyusun di sepanjang rantai yaitu *alternating copolymer*, *random copolymer*, *block copolymer*, dan *graft copolymer* (McKeen, 2012). Adapun klasifikasi kopolimer berdasar rantai dan monomer penyusunnya dapat dilihat pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Klasifikasi Kopolimer Berdasarkan Rantai dan Monomer Penyusunnya yaitu (a) Kopolimer Alternating, (b) Kopolimer Blok, (c) Kopolimer Acak, dan (d) Kopolimer Cabang (McKeen, 2012).

Rantai molekul yang membentuk polimer sangat mempengaruhi karakteristik suatu polimer. Berdasarkan rantai molekul yang membentuk, polimer dibagi menjadi tiga yaitu polimer linier, polimer cabang, dan polimer *crosslink* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Polimer linier memiliki rantai lurus dan tidak memiliki cabang. Polimer linier memiliki sifat larut pada sejumlah pelarut, pada temperatur ruang membentuk padatan, *Poly(Lactic Acid)* merupakan salah satu jenis polimer linier yang berasal dari asam laktat melalui proses polimerisasi. Polimer bercabang merupakan polimer yang pada rantai utamanya memiliki rantai cabang. Rantai cabang ini dapat dihasilkan dari reaksi samping yang terjadi selama sintesis polimer. Polimer bercabang memiliki kecenderungan rendah untuk mengkristal dan polimer hanya larut di dalam pelarut tertentu tanpa terlarut secara

sempurna (Putrilia, 2014). Polimer *crosslink* adalah polimer yang terhubung dengan berbagai rantai. Polimer *crosslink* memiliki sifat kaku, titik leleh tinggi, dan tidak larut jika derajat ikatan silangnya sangat tinggi. Salah satu contoh polimer jaringan yaitu karet alam (Allcock dan Lampe, 1981).



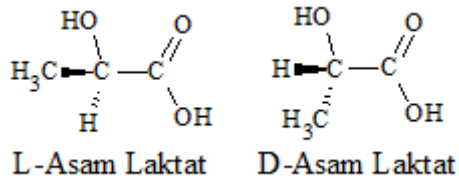
**Gambar 2.3** Rantai Molekul Polimer (McKeen, 2012).

## 2.2 Asam Laktat

Asam laktat (*2-hydroxypropanoic acid*) memiliki rumus kimia  $C_3H_6O_3$  pertama kali ditemukan dalam fermentasi susu oleh Scheele pada tahun 1780 yang awalnya menganggap sebagai komponen susu. Asam laktat dapat diproduksi melalui fermentasi karbohidrat menggunakan mikroorganisme dan sintesis kimia. Asam laktat diklasifikasikan oleh FDA (*Food and Drug Administration*) sebagai zat yang aman untuk digunakan sebagai bahan aditif pada makanan (Young-Jung Wee dkk., 2006).

Asam laktat (LA) memiliki tiga atom karbon, satu atom karbon sebagai bagian dari asam atau gugus karboksil, satu karbon sebagai bagian dari metil atau gugus hidrokarbon, dan satu karbon yang berikatan dengan gugus alcohol. Selain itu, asam laktat memiliki dua isomer optik yaitu  $L(+)$ -LA dan  $D(-)$ -LA (Narayanan dkk., 2004). Proses produksi asam laktat menggunakan cara fermentasi karbohidrat oleh mikroorganisme dapat menghasilkan

$L_{(+)}$ -LA dan  $D_{(-)}$ -LA yang murni. Sedangkan proses produksi asam laktat dengan proses sintesis kimia hanya menghasilkan *racemic*  $DL_{(-)}$ -LA. (Young-Jung Wee dkk., 2006). Adapun isomer optik asam laktat dapat dilihat pada Gambar 2.4



**Gambar 2.4** Isomer Optik Asam Laktat (Auras dkk., 2010).

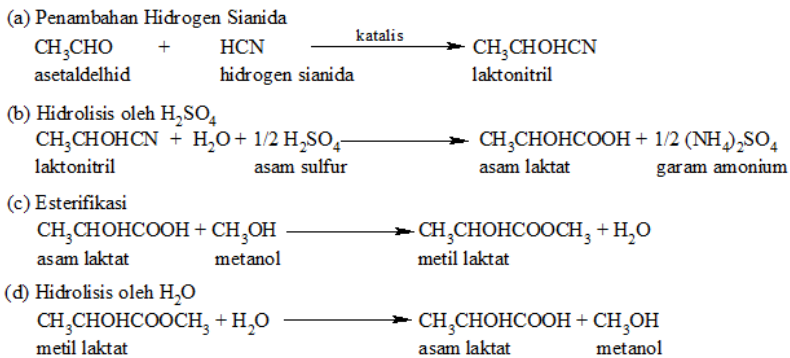
Sifat fisik asam laktat berupa cairan pekat bening yang tidak berbau, pada temperatur kamar bersifat higroskopis, dan asam lemah dengan daya penguapan yang rendah. Asam laktat larut dalam air, alkohol, dan ester akan tetapi tidak larut dalam pelarut organik lain, eter disulfida, karbon disulfida dan kloroform (Putrilia, 2014). Padatan asam laktat murni sangat sulit diperoleh dalam skala yang cukup besar karena higroskopisitasnya yang tinggi dan produksinya hanya dimungkinkan melalui kristalisasi dalam laboratorium. Asam laktat dapat membentuk ester siklik atau yang biasa disebut dengan laktida dari dua molekul asam laktat akan tetapi kurang stabil dalam air dan hanya ditemukan dengan jumlah sangat sedikit dalam larutan asam laktat (Michiel Dussler dkk., 2013). Adapun sifat fisik asam laktat dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Sifat Fisik Asam Laktat (Auras dkk., 2010).

<i>Property</i>	<i>Value</i>
<i>CAS Number</i>	<i>General: 50-21-5</i> <i>(S)-Lactic Acid: 79-33-4</i> <i>(R)-Lactic Acid: 10326-41-7</i>
<i>Molecular weight (g/mol)</i>	90.08
<i>Formula</i>	$C_3H_6O_3$
<i>Melting point (°C)</i>	18 ( <i>racemic</i> ) 53 ( <i>chiral pure</i> )
<i>Crystals structure</i>	<i>(S)-Lactic Acid: orthorhombic,</i> <i>space group P2<sub>1</sub>2<sub>1</sub>2<sub>1</sub></i>
<i>Solid density (g/mL)</i>	1.33 ( <i>solid, 20°C</i> )
<i>Solubility in water (wt%)</i>	86 ( <i>20°C, monomeric (S)-Lactic Acid</i> )
<i>Heat of Fusion (kJ/mol)</i>	<i>(S)-Lactic Acid: 18.6</i>
<i>Boiling point (°C)</i>	122 at 14 mmHg
<i>Liquid density (g/mL, 20°C)</i>	1.224 ( <i>100% undercooled liquid</i> ) 1.186 ( <i>80.8% solution in water</i> )
<i>Viscosity (mPass)</i>	28.5 ( <i>85.3% solution in water</i> )
<i>pK<sub>a</sub></i>	3.86
<i>Specific heat (J/g.K) at 25°C</i>	<i>Crystalline (S)-Lactic Acid: 1.41</i> <i>Liquid lactic acid: 2.34</i>

Proses pembuatan asam laktat melalui dua cara yaitu sintesis kimia dan fermentasi karbohidrat menggunakan bantuan mikroorganisme. Adapun proses sintesis kimia untuk menghasilkan asam laktat dapat dilihat pada Gambar 2.5. Sintesis kimia asam laktat dilakukan pada fasa cair dan tekanan atmosfer yang cukup tinggi antara asetaldelhid dengan hidrogen sianida untuk menghasilkan laktonitril. Laktonitril yang dihasilkan kemudian dimurnikan melalui proses distilasi dan dihidrolisis menggunakan asam sulfat untuk menghasilkan asam laktat dan garam ammonia. Asam laktat yang diperoleh diesterifikasi

menggunakan methanol menghasilkan metil laktat. Tahap akhir sintesis kimia berupa proses hidrolisis metil laktat menggunakan air dengan hasil reaksi berupa asam laktat dan methanol. Proses sintesis kimia hanya menghasilkan *racemic* asam laktat (Narayanan dkk., 2004). Fermentasi karbohidrat untuk menghasilkan asam laktat melalui dua tahap, tahap fermentasi dan pemurnian. Pada tahap fermentasi karbohidrat menggunakan bantuan mikroorganisme berupa jamur dan bakteri asam laktat (LAB). Jamur yang digunakan berasal dari *Rhizopus sp.* hal ini disebabkan pada spesies tersebut memiliki enzim *amy-lolytic* yang mampu mengubah karbohidrat secara langsung menjadi  $L^{(+)}$ -LA.



**Gambar 2.5** Sintesis Kimia Asam Laktat  
(Narayanan dkk., 2004).

Fermentasi dengan menggunakan media jamur memiliki beberapa kelebihan berupa media yang dibutuhkan lebih sederhana dan menghasilkan  $L^{(+)}$ -LA. Namun kelemahan fermentasi ini yaitu laju produksi rendah karena rendahnya laju reaksi yang terjadi (Young-Jung Wee dkk., 2006). Adapun bahan baku dan bakteri atau jamur yang digunakan untuk proses fermentasi dapat dilihat pada Tabel 2.2.

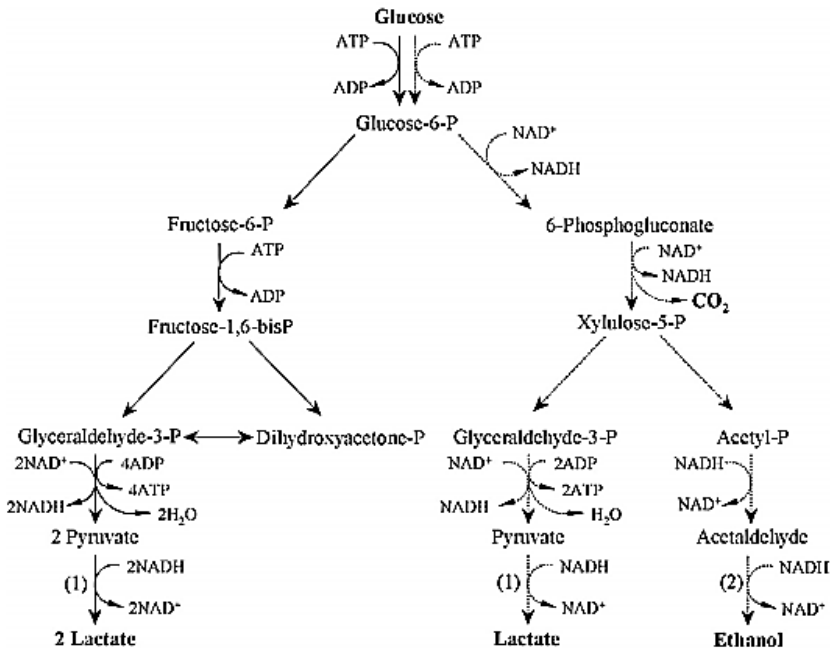


**Tabel 2.2** Bahan Baku dan Bakteri Fermentasi Asam Laktat  
(Young-Jung Wee dkk., 2006).

<i>Raw Material</i>	<i>Organism</i>	<i>Lactic Acid g/L</i>	<i>Productivity g/(L.h)</i>
<i>Mollases</i>	<i>Lactobacillus delbrueckii</i> NCIMB 8150	90	3.8
	<i>Enterococcus faecalis</i> RKY1	95.7	4
<i>Sweet Sorghum</i>	<i>Lactobacillus paracasei</i> No. 8	84.5	2.7
<i>Wheat</i>	<i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>Lactis</i> ATCC 19435	106	1
	<i>Enterococcus faecalis</i> RKY1	102	4.8
<i>Corn</i>	<i>Enterococcus faecalis</i> RKY1	63.5	0.5
	<i>Lactobacillus amilovor</i> ATCC 33620	10.1	0.8
<i>Cassava</i>	<i>Lactobacillus amilovor</i> ATCC 33620	4.8	0.2
<i>Potato</i>	<i>Lactobacillus amilovor</i> ATCC 33620	4.2	0.1
<i>Rye</i>	<i>Lactobacillus paracasei</i> No. 8	84.5	2.4
<i>Whey</i>	<i>Lactobacillus helveticus</i> R211	66	1.4
	<i>Lactobacillus casei</i> NRRL B- 441	46	4
<i>Rice</i>	<i>Lactobacillus</i> sp. RKY2	129	2.9

Bakteri asam laktat (LAB) yang digunakan untuk membuat asam laktat dibedakan menjadi homofermentatif dan heterofermentatif. LAB homofermentatif mengubah karbohidrat hampir secara langsung menjadi asam laktat, sedangkan LAB hetero-

fermentatif mengubah karbohidrat menjadi etanol dan  $\text{CO}_2$  serta asam laktat. Hanya LAB homofermentatif yang tersedia untuk memproduksi asam laktat komersial. Pembuatan asam laktat menggunakan bakteri menghasilkan  $\text{L}(+)\text{-LA}$  dan  $\text{D}(-)\text{-LA}$  (Young-Jung Wee dkk., 2006). Adapun proses pembentukan asam laktat menggunakan LAB dapat dilihat pada gambar 2.6. Proses pemurnian asam laktat dapat menggunakan beberapa metode seperti esterifikasi/saponifikasi, distilasi asam laktat, kristalisasi, dan ekstraksi asam laktat.



**Gambar 2.6** Proses Fermentasi Menggunakan Bakteri Asam Laktat (Young-Jung Wee dkk., 2006).

Asam laktat banyak diaplikasikan dibidang industri makanan sebagai pengawet makanan penambah rasa. Turunan asam laktat seperti *stearoyl-2-lactylate*, *glyceryl lactostearate*, dan

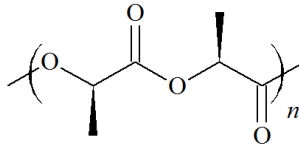
---

*glyceryl lactopalmitate* digunakan sebagai pengemulsi pada proses pembuatan roti. Pada industri kimia, farmasi, dan tekstil asam laktat digunakan sebagai bahan baku untuk memproduksi ester laktat, propilena glikol, 2,3-pentanedione, asam propanoat, asam akrilat, asetaldehid, dan dilaktat (Young-Jung Wee dkk., 2006). Polimer yang berasal dari asam laktat seperti poli(asam laktat) merupakan polimer termoplastik yang bersifat *biodegradable* dan ramah lingkungan. Polimer ini dapat diaplikasikan sebagai benang jahit pada proses operasi, implan, atau sebagai *drug delivery*. Degradasi pada poli(asam laktat) dapat dikontrol dengan cara mengatur komposisi dan berat molekulnya. Poli(asam laktat) memiliki sifat yang mendekati sifat plastik hasil pengolahan minyak bumi, kelebihan polimer ini memiliki laju degradasi yang tinggi dan dapat terurai sempurna dalam tanah (Narayanan dkk., 2004).

### 2.3 Poli(Asam Laktat)

Poli(Asam Laktat) (PLA) merupakan senyawa polyester alifatik yang dapat berasal dari sumber daya alam terbarukan. Polimer ini dibuat melalui reaksi polimerisasi asam laktat. PLA pertama kali ditemukan oleh Carothers DuPont pada tahun 1932 dengan cara pemanasan asam laktat pada kondisi vakum. Rumus struktur PLA dapat dilihat pada Gambar 2.7.

PLA memiliki sifat *biodegradable* dan *biocompatibility* yang sangat baik sehingga banyak digunakan di bidang medis sebagai benang bedah, *plates* dan *screw* untuk fiksasi tulang kraniomaxillofacial, implan jaringan lunak, material perancah pada teknik jaringan, dan *drug delivery*. Pada bidang non medis, PLA dapat dimanfaatkan sebagai plastik, *filler* untuk 3D *printing*, dan kemasan makanan (Shady Farah dkk., 2016).



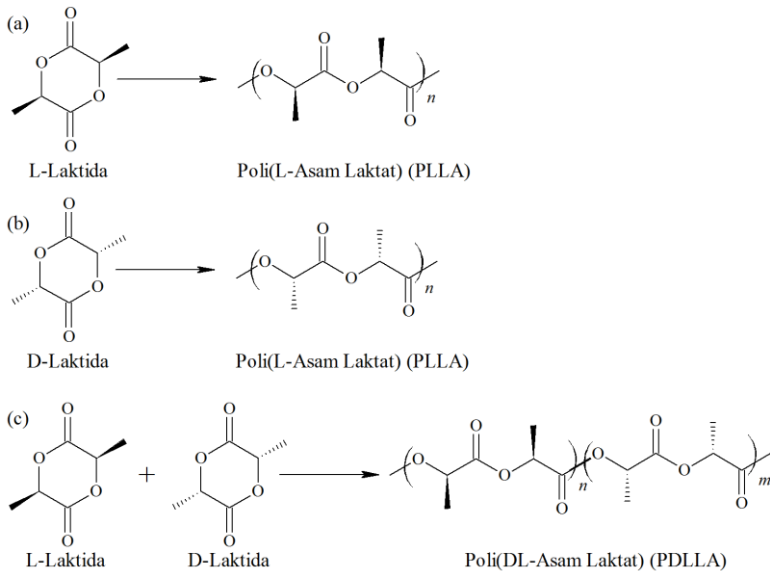
**Gambar 2.7** Rumus Struktur Poli(Asam Laktat)  
(Hideto Tsuji, 2015).

Monomer asam laktat memiliki dua isomer optik yang menyebabkan PLA memiliki beberapa jenis yaitu P<sub>L(+)</sub>-LA(PLLA), P<sub>DL(-)</sub>-LA(PDLLA), dan P<sub>D(-)</sub>-LA (PDLA). Adapun sintesis dan struktur molekul PLA dapat dilihat pada Gambar 2.8. Stereokimia pada PLA mempengaruhi sifat mekanik, ketahanan panas, dan ketahanan hidrolisis (Hideto Tsuji, 2015). Perbandingan isomer L dan D pada asam laktat juga mempengaruhi sifat PLA yang terbentuk. Kemurnian optik pada PLA memiliki efek pada kristalinitasnya. PLA dengan kandungan L<sub>(+)</sub>-LA lebih besar dari 90% cenderung bersifat kristalin, sedangkan PLA dengan kemurnian optik lebih rendah bersifat amorf. Temperatur leleh (T<sub>m</sub>), temperatur transisi gelas (T<sub>g</sub>), dan kristalinitas akan menurun sejalan dengan penurunan jumlah L-isomer. Sifat fisik PLA tergantung pada temperatur transisi dan sifat umumnya seperti sifat mekanik, reologi dalam bentuk padatan, densitas, dan kapasitas kalor (Ashok Pandey dkk., 2017).

Polimer PLA larut dalam pelarut dioksan, asetonitril, kloroform, metil klorida, 1,1,2-trikloroetana, dan asam dikloroasetat. Pelarut etil benzena, toluena, aseton, dan tetrahidrofuran hanya melarutkan sebagian PLA saat dingin akan tetapi larut sempurna ketika temperatur tinggi. Polimer berbasis PLA tidak larut dalam air, alkohol seperti metanol, etanol dan propilen glikol, dan hidrokarbon yang tidak disubstitusi misalnya heksana dan heptane. PLLA kristalin tidak larut dalam pelarut aseton, etil asetat atau tetrahidrofuran (S. Farah dkk., 2016). Sifat fisik pada PLA dapat dilihat pada Tabel 2.3.

**Tabel 2.3** Sifat Fisik Poli(Asam Laktat) (Lasprilla dkk., 2012).

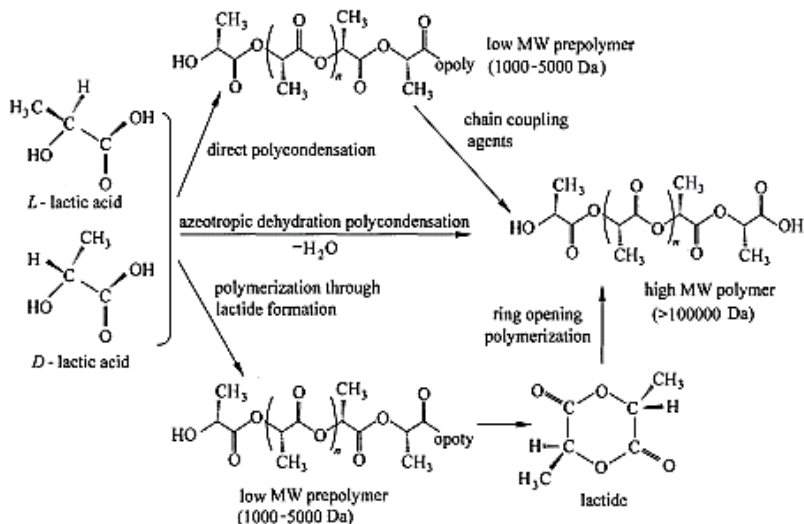
Sifat Fisik	PLLA	PDLLA	PDLA
Temperatur Transisi Kaca (°C)	55 – 80	43 – 53	40 – 50
Temperatur Leleh (°C)	173 – 178	120 – 170	120 – 150
Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	1.290	1.25	1.248
Pelarut	Klorofom, furan, dioksan, dan dioxolane	Pelarut PLLA dan aseton	Etil laktat, etil asetat, tetrahidrofuran, N,N xilena, dan dimetilsulfoksida,



**Gambar 2.8** Sintesis dan Struktur Molekul (a) PLLA, (b) PDLA, dan (c) PDLLA (Hideto Tsuji, 2015).

Sifat mekanik pada PLA bervariasi mulai dari yang lunak dan elastis hingga kaku dan memiliki kekuatan tinggi. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa parameter yang berbeda seperti kristalinitas, struktur polimer, dan berat molekul, formulasi bahan (pelunak, campuran, komposit, dll.) dan pemrosesan. Misalnya, PLA komersial, seperti poli (92 persen l-laktida, 8 persen meso-laktida), memiliki modulus 2,1 GPa dan elongasinya 9%. Setelah diberi *plastisizer*, modulus Young menurun menjadi 0.7 MPa dan elongasinya meningkat menjadi 200%, dengan penurunan Tg dari 58 °C menjadi 18 °C (Averous, 2008).

Proses sintesis asam laktat menjadi PLA dapat melalui beberapa cara yaitu polikondensasi langsung, polikondensasi dehidrasi azeotropik, dan polimerisasi pembukaan cincin. Adapun rute sintesis PLA dapat dilihat pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Proses Sintesis Poli(Asam Laktat)  
(Auras dkk., 2010).

---

### 2.3.1 Polikondensasi Langsung

Polikondensasi langsung merupakan salah satu metode sintesis PLA yang murah akan tetapi sangat sulit untuk mendapatkan PLA dengan bobot molekul tinggi. Metode ini dapat dilakukan karena asam laktat memiliki gugus hidroksil dan karboksil (Auras dkk., 2010). Metode polikondensasi langsung menggunakan pelarut dan/atau katalis pada tekanan dan temperatur tinggi untuk menghilangkan air yang dihasilkan selama proses kondensasi. Metode ini menghasilkan oligomer dengan rata-rata berat molekul beberapa puluh ribu dan reaksi samping seperti transesterifikasi yang menghasilkan pembentukan struktur cincin sebagai laktida. Reaksi samping yang terjadi memiliki pengaruh negatif pada sifat akhir polimer. Produk samping hasil polimerisasi dapat dikontrol dengan menggunakan katalis dan agen fungsionalisasi yang berbeda, serta dengan memvariasikan kondisi polimerisasi (Lasprilla dkk., 2012)

Kondensasi langsung asam laktat untuk memperoleh PLA dilakukan dalam tiga tahap: penghilangan air bebas, polikondensasi oligomer, dan kondensasi leleh PLA. Pada tahap pertama dan ketiga, pemindahan air adalah langkah penentuan laju. Pada tahap kedua, langkah penentuan laju adalah reaksi kimia, yang tergantung pada katalis yang digunakan (Auras dkk., 2010). Polikondensasi langsung asam laktat tidak diterapkan dalam skala besar karena berat molekul PLA yang dihasilkan rendah, reaksi samping pembentukan laktida, dan proses degradasi yang terjadi secara simultan. Pada metode polikondensasi langsung diperlukan agen perpanjangan rantai untuk memperoleh PLA dengan berat molekul tinggi akan tetapi kelemahan penambahan agen perpanjangan pada polikondensasi langsung yaitu polimer akhir yang terbentuk mengandung agen perpanjangan rantai yang tidak bereaksi, residu logam, dan pengotor (Lasprilla dkk., 2012 dan Garlotta 2001).

---

### 2.3.2. Polikondensasi Dehidrasi Azeotropik

Polikondensasi dehidrasi azeotropik adalah metode langsung untuk menghasilkan PLA dengan bobot molekul tinggi tanpa menggunakan agen perpanjangan rantai (Garlotta, 2001). Metode polikondensasi dehidrasi azeotropik menggunakan pelarut dan katalis untuk mempermudah pemisahan air yang terbentuk selama reaksi dan berat molekul PLA yang dihasilkan lebih tinggi. Pelarut yang dapat digunakan seperti difenil eter, klorobenzena, xilena, dan difenil sedangkan katalis yang digunakan seperti asam protonat, logam, logam oksida, dan logam halide (Auras dkk., 2010). Kim dan Woo (2002) mensintesis PLA dengan metode polikondensasi dehidrasi azeotropik memperoleh PLA dengan berat molekul sekitar 33000 melalui polikondensasi dehidrasi azeotropik pada temperatur 138 °C selama 48–72 jam menggunakan saringan molekuler sebagai bahan pengering dan m-xilena sebagai pelarut. Kelemahan metode polikondensasi dehidrasi azeotropik yaitu membutuhkan katalis yang cukup besar untuk terjadinya reaksi sehingga hasil akhir pada polimer terdapat residu katalis. Residu katalis dapat menyebabkan permasalahan pada pemrosesan lebih lanjut seperti degradasi yang tidak diinginkan, laju hidrolisis yang tidak bisa dikontrol dan diprediksi, atau pada aplikasi medis dapat menyebabkan keracunan (Garlotta, 2001).

### 2.3.3 *Ring-Opening Polymerization (ROP) Laktida*

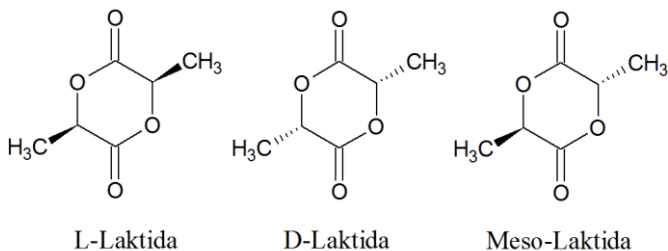
ROP laktida umumnya merupakan rute yang paling disukai karena dapat menghasilkan PLA dengan berat molekul tinggi dan proses pada ROP mudah dikontrol sehingga memvariasikan sifat-sifat polimer yang dihasilkan lebih banyak secara terkendali. Hal ini membuat ROP sangat cocok untuk proses industri skala besar (Auras dkk., 2010).



## 2.4 Ring-Opening Polymerization Laktida

Sintesis PLA dengan metode polikondensasi langsung LA menjadi rute termurah akan tetapi metode polimerisasi pembukaan cincin (ROP) laktida lebih banyak digunakan secara komersial dalam skala besar. ROP laktida pertama kali dipelajari sejak lama dari tahun 1932 namun hanya polimer dengan berat molekul rendah yang dihasilkan hingga teknik pemurnian laktida dikembangkan oleh DuPont pada tahun 1954 untuk menghasilkan polimer dengan berat molekul tinggi (Jie Ren, 2010).

Laktida (*3,6-dimethyl-1,4-dioxane-2,5-dione*), dimer siklik dari asam laktat merupakan bahan utama pada proses ROP. Laktida memiliki dua atom karbon asimetris dalam molekul menyebabkan laktida memiliki tiga bentuk yang berbeda yaitu *D*-Laktida, *L*-Laktida, dan *DL*-Laktida. Adapun bentuk laktida dapat dilihat pada Gambar 2.10. Sintesis laktida pertama kali dilakukan oleh Pelouze pada tahun 1845. Pelouze menyelidiki esterifikasi asam laktat dengan memanaskan dan membuang air yang terbentuk hingga memperoleh prepolimer yang tidak lagi sepenuhnya larut dengan air. Setelah pemanasan terus-menerus pada prepolimer, Pelouze memperhatikan pada fraksi distilasi terbentuk kristal yang bagus dan diberi nama laktida (Auras dkk., 2010).



**Gambar 2.10** Tiga Struktur Distereomerik Laktida (Auras dkk., 2010).

Laktida dapat disintesis dari asam laktat menggunakan katalis. Seng asetat adalah salah satu katalis logam yang belum

banyak digunakan dalam penelitian untuk membentuk laktida. Katalis ini lebih aman daripada katalis berbasis seng lainnya. Seng asetat mampu mempercepat gugus OH dalam menyerang gugus C = O pada rantai oligomer sehingga memperoleh hasil laktida 65-70% (Gozan dkk., 2018). Selain seng, katalis berbasis Sn dapat digunakan seperti stannous oktoate. Laktida tidak larut dalam pelarut organik seperti klorofom dan diklorometana. Adapun sifat fisik laktida dapat dilihat pada Tabel 2.4.

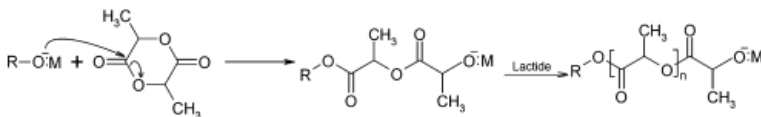
**Tabel 2.4** Sifat Fisik Laktida (Auras dkk., 2010).

	<i>D-Lactide</i>	<i>L-lactide</i>	<i>meso-Lactide</i>	<i>rac-Lactide</i>
<i>Molecular weight (g/mol)</i>	144.2	144.2	144.2	
<i>Melting point (°C)</i>	96-97	96	53	125
<i>Boiling point (°C)</i>				142
<i>Heat of fusion (J/g)</i>		146	118-128	185
<i>Heat of vaporization (kJ/mol)</i>		63		
<i>Solid density (g/mL)</i>		1.32-1.38	1.32-1.38	
		2.71 (110°C);		
<i>Liquid viscosity (mPas)</i>		2.23 (120°C);		
		188 (130°C)		

Polimerisasi pembukaan cincin laktida dapat diklasifikasikan berdasarkan tiga mekanisme reaksi dan tipe inisiator yang berbeda yaitu polimerisasi anionik, polimerisasi kationik, dan mekanisme koordinasi-penyisipan (Gupta, 2007).

### 2.4.1 Polimerisasi Anionik

Polimerisasi anionik merupakan mekanisme anionik ROP pada laktida yang menggunakan anion nukleofilik dari inisiator untuk menyerang gugus karbonil laktida sehingga menyebabkan celah pada karbon karbonil dan ikatan oksigen endosiklik. Oksigen akan menjadi anion baru yang menyebabkan reaksi terus menerus berlangsung hingga menghasilkan PLA dengan gugus akhir alkosida. Mekanisme pembukaan cincin laktida dapat dilihat pada Gambar 2.11. Inisiator pada proses ROP anionik harus memiliki nukleosilifitas yang tinggi untuk menginisiasi laktida. Inisiator dapat berupa basa lemah seperti potasium benzoate, kalium fenoksida, dan seng stearat yang tidak dapat menginisiasi laktida pada temperatur rendah, inisiasi laktida akan berlangsung pada temperatur di atas 120°C. Inisiator seperti *n*-, *sec*-, atau *tert*-butil litium dan kalium *tert*-butoksida dapat dengan cepat menginisiasi laktida pada temperatur rendah akan tetapi menghasilkan reaksi samping seperti deprotonasi monomer laktida. Deprotonasi ini menyebabkan proses polimerisasi menjadi tidak konsisten, rasemisasi, dan berat molekul yang dihasilkan terbatas (Garlotta, 2001).

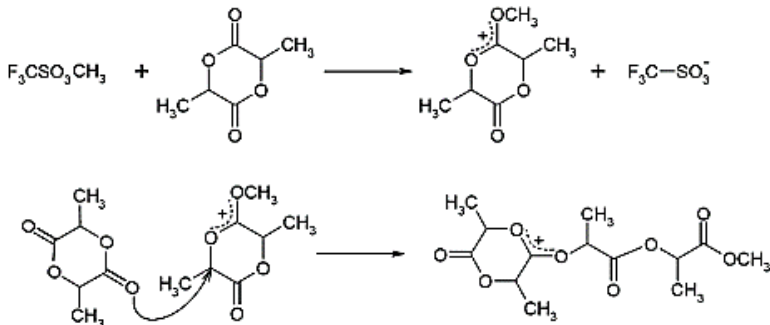


**Gambar 2.11** Mekanisme Polimerisasi Pembukaan Cincin Anionik (Gupta, 2007).

### 2.4.2 Polimerisasi Kationik

Mekanisme polimerisasi kationik pada laktida terjadi ketika oksigen eksosiklik dari salah satu karbonil laktida terprotonasi atau teralkilasi oleh inisiator menghasilkan ikatan  $O-CH_3$  yang bermuatan positif. Serangan nukleofilik oleh monomer kedua memecah ikatan ini dan menghasilkan ion karbenium elektrofilik lainnya. Reaksi ini terus berlanjut hingga polimerisasi

dihentikan oleh monofungsional nukleofil seperti air. Pada polimerisasi kationik, temperatur tinggi menyebabkan terjadinya rasemisasi karena serangan monomer kedua pada pusat kiral rantai propagasi.



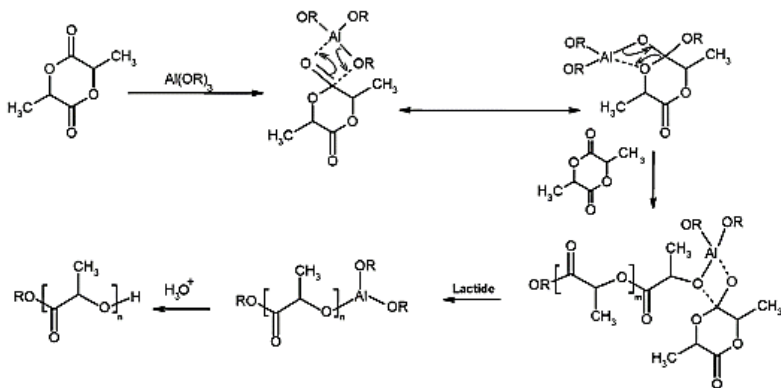
**Gambar 2.12** Mekanisme Polimerisasi Pembukaan Cincin Kationik (Gupta, 2007).

Namun rasemisasi tersebut dapat diminimalkan dengan menaikkan temperatur di atas 50 °C, akan tetapi pada temperatur tersebut laju reaksi menjadi sangat lambat dan tidak menghasilkan polimer dengan berat molekul tinggi. Adapun mekanisme polimerisasi kationik dapat dilihat pada Gambar 2.12. Katalis pada polimerisasi kationik dapat berupa donor ion karbenium dan beberapa asam kuat seperti *tryethylxonium tetrafluoroborate*, *boron trifluoride*, dan *asam trifluoroacetic* (Gupta 2007).

### 2.4.3 Polimerisasi koordinasi-penyisipan

Polimerisasi dengan mekanisme koordinasi – penyisipan merupakan salah satu metode yang paling banyak dipelajari untuk menghasilkan PLA dengan berat molekul tinggi. Pada metode ini, katalis seperti logam alkoksida sering digunakan. Katalis logam (Mg, Sn, Ti, Zr, dan Zn) memiliki ikatan kovalen antara atom logam dan atom oksigen yang berperilaku seperti asam Lewis lemah, selain itu logam tersebut mengandung orbital bebas p atau

d. Mekanisme koordinasi-penyisipan terjadi ketika salah satu oksigen eksosiklik laktida terkoordinasi sementara dengan atom logam inisiator. Koordinasi ini meningkatkan nukleofilisitas bagian alkoksida dari inisiator serta elektrofilitas gugus karbonil pada laktida. Pada langkah kedua, ikatan *axyl*-oksigen (antara gugus karbonil dan oksigen endosiklik) dari laktida terputus dan rantai laktida yang dihasilkan disisipkan ke dalam ikatan logam-oksigen inisiator. Polimerisasi berlanjut ketika molekul laktida tambahan dibuka dan dimasukkan ke dalam ikatan antara atom logam dan atom oksigen yang berdekatan, sedangkan pada ujung alkoksida dari inisiator menjadi ujung rantai mati. Proses polimerisasi dengan mekanisme koordinasi – penyisipan memiliki variabel polimerisasi yang luas sehingga memungkinkan untuk mengontrol berat molekul pada polimer yang dihasilkan. PLA dengan berat molekul tinggi dapat diperoleh dengan metode ini. Adapun mekanisme koordinasi – penyisipan dapat dilihat pada Gambar 2.13 (Gupta, 2007).



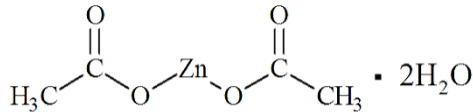
**Gambar 2.13** Mekanisme Polimerisasi Pembukaan Cincin Koordinasi - Penyisipan (Gupta, 2007).

---

## 2.5 Katalis

Penambahan katalis pada proses polimerisasi merupakan salah satu faktor penting pembentukan polimer. Katalis merupakan inisiator pada proses polimerisasi. Katalis pada proses ROP laktida dapat berupa serbuk metal, asam lewis, basa lewis, senyawa organometalik, dan berbagai garam logam, namun senyawa organometalik yang efektif untuk menghasilkan PLA dengan berat molekul tinggi utamanya alkilmetal dan logam halida, oksida, karboksilat, dan alkoksida. Berat molekul PLA sintesis dipengaruhi oleh waktu, temperatur, dan konsentrasi katalis (Harrane dkk., 2012). Adanya katalis mengubah kinetika reaksi namun tidak mengubah termodinamikanya. Definisi lainnya, katalis adalah zat yang mengubah reaktan menjadi produk melalui siklus berulang di mana katalis ikut serta dalam reaksi. Pada akhir setiap siklus selama masa pakainya, katalis diregenerasi ke bentuk aslinya (Ertl G. dkk., 2008). Logam halida, oksida, dan karboksilat akan bertindak seperti katalis asam lewis dalam ROP. Sejumlah besar katalis telah dipelajari pada proses polimerisasi laktida untuk berbagai aplikasi seperti besi,  $\text{Sn}(\text{Oct})_2$ ,  $\text{SnCl}_4$ ,  $\text{Sn}(\text{C}_6\text{H}_6)_4$ , seng laktat  $[(n\text{-C}_4\text{H}_9\text{O}_2)\text{AlO}]_2\text{Zn}$ , dan seng asetat. Senyawa organik ditemukan sangat efektif untuk sintesis PLA dengan kemurnian optik dan berat molekul yang tinggi (Gupta, 2007).

Seng asetat dihidrat merupakan bubuk kristal putih dari senyawa yang memiliki rumus kimia  $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  hasil sintesis antara seng oksida dengan asam asetat glasial. Senyawa ini memiliki berat molekul 219,51 g/mol dengan temperatur lelehnya pada 237 °C dan massa jenis 1,84 g/cm<sup>3</sup>. Seng asetat mengandung kation logam dan anion asetat yang merupakan ion poliatomik univalen (-1 charge) yang terdiri dari dua atom karbon yang terikat secara ionik dengan tiga hidrogen dan dua atom oksigen (simbol:  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ) dengan berat molekul 59,05. Asetat adalah prekursor yang sangat baik untuk memproduksi senyawa dengan kemurnian sangat tinggi, katalis, dan bahan skala nano (Americanelement). Adapun struktur kimia dari seng asetat dapat dilihat pada Gambar 2.14.



**Gambar 2.14** Seng Asetat Dihidrat (Americanelement).

## 2.6 Aplikasi PLA

PLA merupakan polimer ramah lingkungan yang dapat dimanfaatkan dalam berbagai bidang baik pada bidang medis dan non medis. Selain diaplikasikan menjadi botol minuman, PLA dapat diaplikasikan sebagai filler pada 3D printer oleh Polyfluor Plastic bv. PLA yang digunakan yaitu PLLA hal ini disebabkan PLLA cukup stabil dalam kondisi sehari-hari, meskipun perlahan-lahan kekuatannya menurun di lingkungan lembab dan temperatur di atas temperatur transisi gelasnya, yaitu 55 °C. PLLA memiliki ketahanan kimia yang cukup terbatas dan ketahanan yang baik terhadap pelarut secara umum. PLLA adalah polimer kaku dengan kristalinitas tinggi (60-70%), yang sifat mekanisnya mirip dengan polistiren. PLLA sebagian besar digunakan dalam kemasan makanan, tetapi juga digunakan untuk berbagai aplikasi medis yang sedang dalam tahap penelitian. PLLA yang digunakan pada 3D print memiliki berat molekul 60000 – 80000 g/mol, viskositas 300000 CP, dan titik leleh 150 - 180°C. Adapun sifat fisik dan mekanik PLLA dapat dilihat pada Tabel 2.5.

**Tabel 2.5** Sifat Fisik dan Mekanik PLLA (Polyfluor Plastic bv).

<i>Description</i>	<i>Value</i>
<i>Density (g/cm<sup>3</sup>)</i>	1.26
<i>Tensile Strength (MPa)</i>	71
<i>Flexural Modulus (MPa)</i>	3310
<i>Charpy Impact Strength (kJ/m<sup>2</sup>)</i>	19.6
<i>Hardness (15s) Shore D</i>	80

Di bidang medis PLA dapat digunakan sebagai material *scaffold* pada teknik jaringan. Sejumlah besar kopolimer PLA disintesis untuk teknik jaringan dengan tujuan untuk menyempurnakan waktu degradasi polimer. Pada umumnya, monomer asam glikolida dan e-kaprolakton dikopolimerisasi dengan laktida. Hal ini sangat penting untuk pembuatan *scaffold* pada teknik jaringan dan pembalut luka. Degradasi kopolimer dirancang selaras dengan pertumbuhan jaringan dan hilangnya masa dan kekuatan implan yang ditentukan sehingga pada akhirnya struktur kopolimer *scaffold* diganti oleh jaringan permanen dari pasien (Ebnesajjad, 2013). Beberapa sifat polimer dan kopolimer PLA yang dimanfaatkan sebagai material *scaffold* pada teknik jaringan ditunjukkan pada Tabel 2.6.

**Tabel 2.6** Sifat Mekanik Polimer Biodegradabel sebagai Material *Scaffold* pada Teknik Jaringan (Ebnesajjad, 2013)

<i>Polymer</i>	<i>Poly(L-Lactide)</i>	<i>Poly(L-Lactide) and Poly(glycolide)</i>	<i>Copolymer of (L-Lactide)</i>
<i>T<sub>m</sub> (°C)</i>	170	200	90-120
<i>T<sub>g</sub> (°C)</i>	58	40	-17
<i>Shape</i>	<i>Fiber, sponge, film</i>	<i>Fiber</i>	<i>Fiber, Sponge, Film</i>
<i>Tensile strength (Mpa)</i>	900 ( <i>fiber</i> )	850	12 ( <i>film</i> )
<i>Young's Modulus (Gpa)</i>	8.5 ( <i>fiber</i> )	8.6	0.9 ( <i>film</i> )
<i>Elongatoan at break (%)</i>	25 ( <i>fiber</i> )	24	600 ( <i>fiber</i> )

PLA pada bidang non medis dapat diaplikasikan sebagai botol minuman. Hal ini dikarena PLA memilik temperatur transisi



gelas antara 50 – 60°C. Ketika temperatur mencapai T<sub>g</sub>, mobilitas rantai amorf dari plastik mulai meningkat secara signifikan. PLA yang memiliki sifat seperti kaca dan kaku pada temperatur kamar, secara bertahap berubah menjadi seperti sifat karet di T<sub>g</sub>. Selain itu, PLA memiliki sifat yang mirip dengan *polyethylene terephthalate* (PET) sehingga cocok untuk diaplikasikan sebagai botol minuman (Ebnesajjad, 2013). Untuk lebih jelasnya sifat mekanik yang dimiliki PLA untuk aplikasi botol minuman dapat dilihat pada Tabel 2.7.

**Tabel 2.7** *Grade* PLA untuk Botol oleh Natureworks (Ebnesajjad, 2013).

	<i>Grade</i>	<i>7032D</i>
<i>Density (g/cm<sup>3</sup>)</i>		1.24
<i>Melt Index (g/10 min)</i>		5-15
<i>Transmission rate</i>	<i>Oxygen (cc mil/m<sup>2</sup>/24 h atm)</i>	550
	<i>Carbon dioxide (cc mil/m<sup>2</sup>/24 h atm)</i>	3000
	<i>Water vapor (cc mil/m<sup>2</sup>/24 h atm)</i>	325
<i>Thermal</i>	<i>Melting Point (°C)</i>	160
<i>Characteristic</i>	<i>Glass transition temperature (°C)</i>	55-60

Mikrosfer dan mikrokapsul telah banyak digunakan diterapkan dalam *drug delivery system* (DDS) untuk pemberian jangka panjang dari berbagai agen medis seperti kontrasepsi, antagonis narkotika, anestesi lokal, dan vaksin. Pelepasan obat dari sistem ini didasarkan pada beberapa mekanisme yang mencakup difusi dan degradasi polimer (hidrolisis atau degradasi enzimatis). PLLA dan PDLLA telah digunakan untuk sejumlah aplikasi yang memerlukan degradasi yang panjang (Auras dkk., 2010). Mikrokapsul berongga dari Poli(Asam Laktat) (PLA) yang dibuat oleh Cornejo dkk. (2011) menggunakan metode *template*

gelembung, yang melibatkan nukleasi gelembung di dalam tetesan larutan diklorometana dari PLA yang disiapkan dalam larutan Poli(Vinil Alkohol) (PVA). Berat molekul PLA yang digunakan yaitu 2000; 4500; dan 100000 g/mol. Keseragaman mikro kapsul PLA berongga optimum ketika berat molekul PLA yang digunakan 2000 g/mol dan larutan PVA 2% (w/w). Radius Mikro kapsul berongga dapat dilihat pada Tabel 2.8.

**Tabel 2.8** Radius Luar dan Dalam yang Terukur dari Mikro kapsul PLA Berongga (Cornejo dkk., 2011).

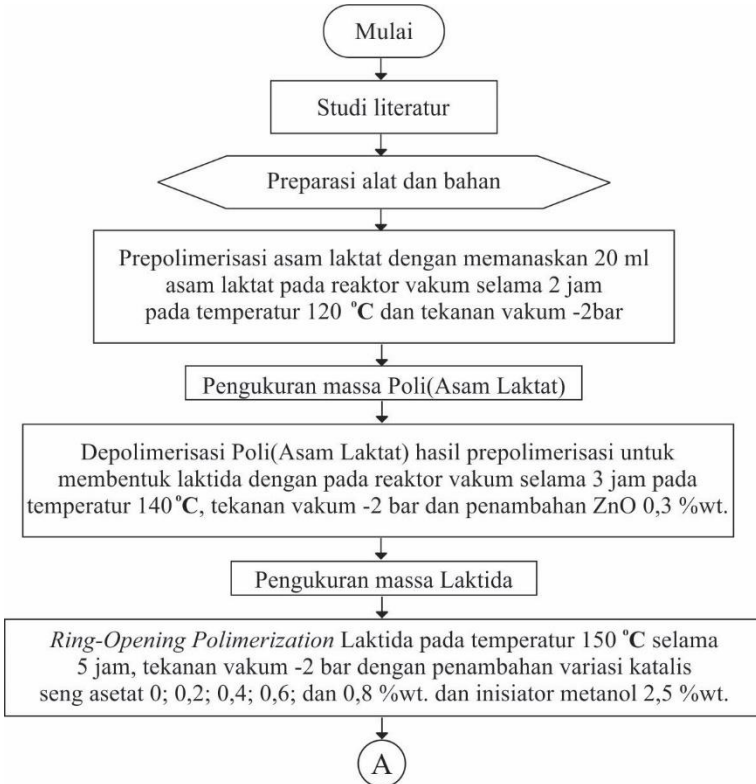
MW of PLA and type of aq medium	radius	mean ( $\mu\text{m}$ )	std dev ( $\mu\text{m}$ )	PI (%)
2 kDa in 2% (w/w) PVA aq	outer	1.03	0.08	7.7
	inner	0.41	0.04	10.3
45 kDa in 2% (w/w) PVA aq	outer	0.58	0.15	26.7
	inner	0.36	0.13	37.8
100 kDa in 2% (w/w) PVA aq	outer	0.58	0.14	25.0
	inner	0.36	0.07	20.1
2 kDa in water	outer	0.55	0.15	27.5
	inner	0.32	0.14	43.3
45 kDa in water	outer	0.57	0.13	23.2
	inner	0.37	0.13	34.7
100 kDa in water	outer	0.65	0.17	26.0
	inner	0.39	0.13	33.4

## 2.7 Penelitian Sebelumnya

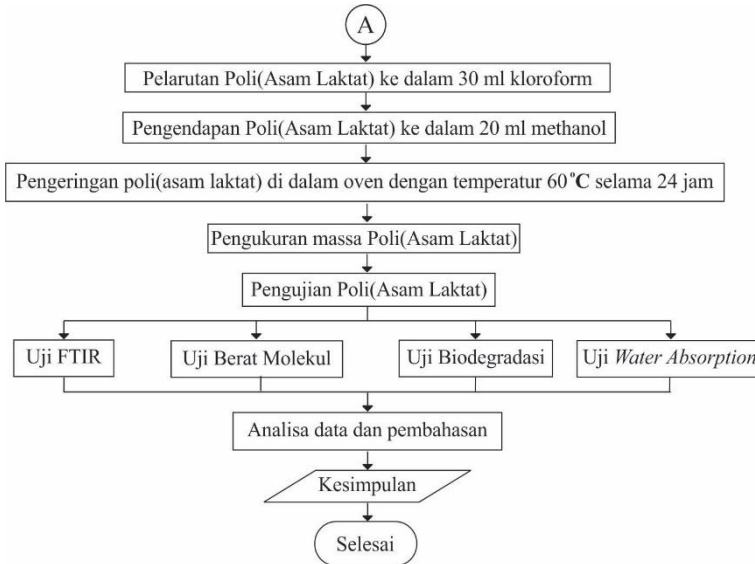
Penelitian tentang sintesis PLA dari asam laktat sudah banyak dilakukan dengan berbagai metode dan variabel – variabelnya. Adapun penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Lampiran 1 tentang *road map* penelitian.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian



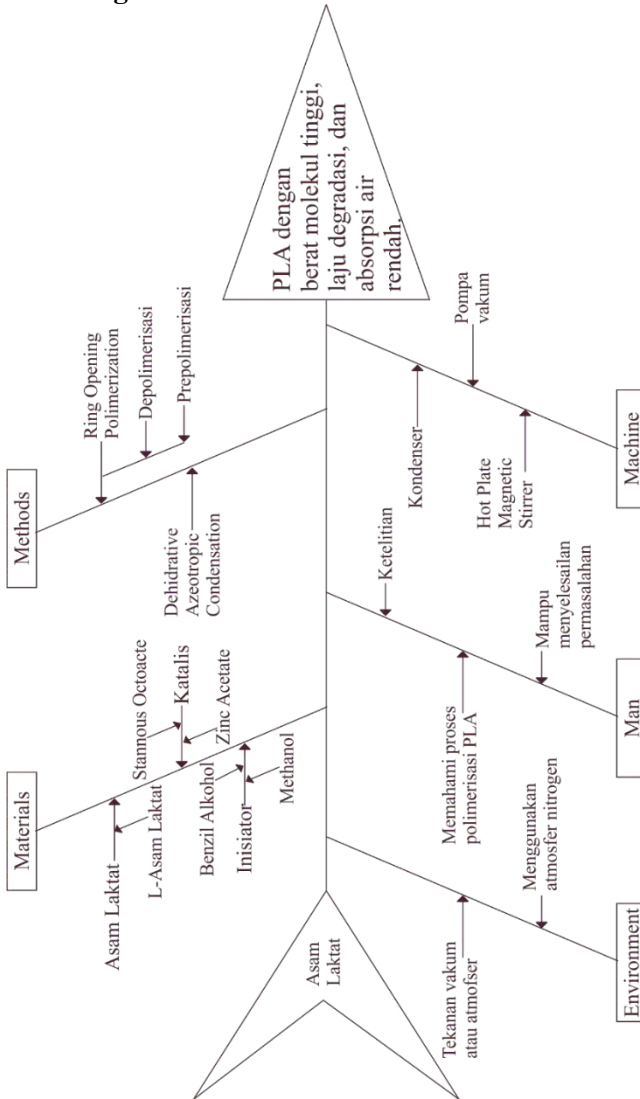
**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian –Cont’d



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

Proses sintesis poliasam laktat menggunakan metode *ring-opening polymerization* laktida memiliki tiga tahapan yaitu prepolimerisasi, depolimerisasi, dan polimerisasi. Untuk lebih jelasnya proses sintesis PLA dapat melihat diagram alir yang ditunjukkan Gambar 3.1. Sebelum proses polimerisasi dilakukan preparasi alat dan bahan. Prepolimerisasi dilakukan untuk mendapatkan PLA dengan berat molekul rendah. Tahap selanjutnya yaitu depolimerisasi, depolimerisasi bertujuan untuk mengubah PLA hasil polimerisasi menjadi laktida. Tahap terakhir yaitu polimerisasi laktida untuk menghasilkan PLA dengan berat molekul tinggi. PLA terlebih dahulu dimurnikan dan dikeringkan ke dalam oven sebelum dilakukan pengujian. Pengujian yang dilakukan yaitu uji FTIR, biodegradasi, *water absorption*, dan berat molekul. Penarikan kesimpulan dilakukan setelah analisa dan pembahasan hasil penelitian.

### 3.2 Diagram Fishbone



Gambar 3.2 Diagram Fishbone

Diagram *fishbone* yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 menunjukkan beberapa faktor yang mempengaruhi proses untuk mendapatkan PLA dengan sifat yaitu berat molekul tinggi, absorpsi air, dan laju degradasi rendah. Faktor tersebut yaitu bahan, metode, mesin, manusia, dan lingkungan. Materials yang berpengaruh dapat berupa jenis asam laktat, katalis, inisiator yang digunakan. Metode yang dapat mempengaruhi proses pembentukan PLA seperti metode sintesis *ring-opening polymerization* dan *dehidartive azeotropic condensation*. Alat – alat yang dapat digunakan yaitu *condenser*, *hot plate magnetic stirrer*, dan vakum pump. Faktor lingkungan yang dapat mempengaruhi misalnya tekanan yang digunakan pada proses polimerisasi dan menggunakan gas nitrogen yang dialirkan kedalam reaktor. Selain itu, faktor manusia dapat mempengaruhi hasil polimerisasi seperti pemahaman peneliti tentang proses polimerisasi, mampu memecahkan setiap permasalahan, dan memiliki ketelitian untuk memaksimalkan proses polimerisasi.

### 3.3 Bahan Penelitian

Bahan – bahan yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

#### 3.3.1 Asam Laktat

Asam laktat merupakan bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini. Asam laktat yang digunakan merupakan asam laktat yang berasal dari fermentasi karbohidrat menggunakan bakteri asam laktat. Asam laktat diperoleh dari Bratachem, adapun asam laktat ditunjukkan pada Gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Asam Laktat.

### 3.3.2 Seng Asetat

Seng asetat digunakan sebagai katalis pada proses ROP laktida. Katalis ini dalam bentuk dihidrat dan memiliki rumus kimia  $Zn(CH_3CO_2)_2 \cdot 2H_2O$ . Seng asetat ditunjukkan pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Seng Asetat.

### 3.3.3 Etil Asetat

Etil asetat digunakan sebagai pelarut pada proses pengujian berat molekul PLA. Etil asetat merupakan senyawa organik dengan rumus empiris  $CH_3COOC_2H_5$  hasil reaksi esterifikasi antara asam asetat dan etanol. Senyawa ini sering disingkat menjadi EtOAc dimana Et mewakili gugus etil dan OAc mewakili gugus asetat. Etil asetat diperoleh dari Sinar Ilmiah Persada, adapun gambar etil asetat ditunjukkan pada Gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Etil Asetat.

### 3.3.3 Seng Oksida

Seng oksida digunakan sebagai katalis pada proses depolimerasi PLA untuk menghasilkan laktida. Seng oksida memiliki rumus kimia  $ZnO$ , katalis ini diperoleh dari Sinar Ilmiah Persada. Adapun seng oksida ditunjukkan pada Gambar 3.6.



**Gambar 3.6** Seng Oksida.

### 3.3.5 Metanol

Metanol digunakan sebagai inisiator pada ROP laktida dan juga untuk mencuci PLA hasil ROP laktida. Metanol merupakan bentuk sederhana alkohol dengan rumus kimia  $CH_3OH$ . Metanol yang digunakan berasal dari Sinar Ilmiah Persada. Adapun methanol ditunjukkan pada Gambar 3.7.



**Gambar 3.7** Metanol.

## 3.4 Peralatan Penelitian

Alat – alat yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:



### 3.4.1 *Hot Plate Magnetic Stirrer*

*Hot Plate Magnetic stirrer* digunakan untuk memanaskan dan mengaduk agar tercampur merata dan homogen pada proses prepolimerisasi, depolimerisasi, dan ROP laktida untuk menghasilkan PLA dengan berat molekul tinggi. *Hot Plate Magnetic stirrer* ditunjukkan oleh Gambar 3.8.



**Gambar 3.8** *Hot Plate Magnetic Stirrer*.

### 3.4.2 Oven

Oven digunakan mengeringkan PLA setelah di masukkan ke dalam methanol untuk menghilangkan *moisture*. Oven ditunjukkan oleh Gambar 3.9.



**Gambar 3.9** Oven.

### 3.4.3 Gelas Beker

Gelas beker digunakan untuk media pada saat PLA dimasukkan ke dalam methanol dingin dan media untuk memanaskan PLA hasil polimerisasi di dalam oven. Gelas beker

yang digunakan terdiri dari beberapa volume seperti 100 ml, 250 ml, dan 500 ml. Adapun gelas beker yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.10.



**Gambar 3.10** Gelas Beker.

#### 3.4.4 Timbangan Digital

Timbangan Digital digunakan untuk menimbang massa produk yang dihasilkan dari proses polimerisasi dan massa katalis yang digunakan. Timbangan digital ditunjukkan pada gambar 3.11.



**Gambar 3.11** Timbangan.

#### 3.4.5 Viskometer Oswald

Viskometer Oswald digunakan untuk menghitung viskositas intrinsik dan menentukan berat molekul pada PLA dengan menggunakan persamaan Mark – Houwink. Viskometer Oswald ditunjukkan pada Gambar 3.12.



**Gambar 3.12** Viskometer Oswald.

### 3.4.6 Spatula

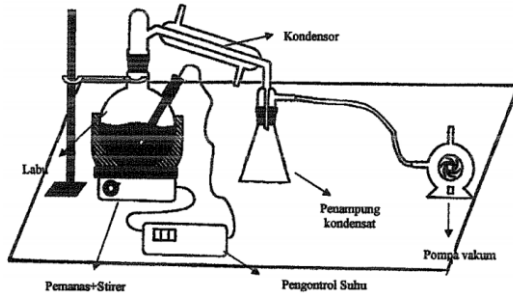
Spatula digunakan untuk membantu mengambil bahan penelitian seperti katalis seng asetat dan seng oksida. Spatula ditunjukkan pada Gambar 3.13



**Gambar 3.13** Spatula.

### 3.4.7 Reaktor

Reaktor yang digunakan merupakan modifikasi dari reaktor yang digunakan oleh Prokakis dkk (2002). Penggunaan pengontrol temperatur menggunakan *thermogun* dan penambahan pompa vakum hal ini dikarenakan pada reaktor Prokakis polimerisasi dilakukan dengan cara polikondensasi azeotrop dan langsung pada tekanan atmosfer. Pemanas dan pengaduk menggunakan *hot plate magnetic stirrer*. Adapun reaktor dapat dilihat pada Gambar 3.14



**Gambar 3.14** Reaktor Polimerisasi Pembukaan Cincin Laktida  
(Prokakis dkk., 2002).

Pompa vakum berfungsi untuk menurunkan tekanan pada saat proses prepolimerisasi dan depolimerisasi laktida. Kondenser digunakan untuk mengkondensasi uap yang terbentuk saat proses prepolimerisasi dan depolimerisasi menjadi cairan. Labu destilasi digunakan sebagai media untuk reaksi polimerisasi.

### 3.5 Variabel Penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini yaitu konsentrasi katalis seng asetat yang digunakan pada proses polimerisasi pembukaan cincin laktida dengan konsentrasi seng asetat yaitu 0; 0,2; 0,4; 0,6; dan 0,8 % wt.

### 3.6 Pelaksanaan Penelitian

Proses polimerisasi asam laktat menjadi PLA terbagi menjadi beberapa tahapan seperti berikut ini:

#### 3.6.1 Prepolimerisasi

1. Menyiapkan alat dan bahan penelitian.
2. Menimbang massa labu destilasi.
3. Memasukkan 20 ml asam laktat pada labu distilasi reaktor yang telah terhubung dengan pompa vakum.
4. Memanaskan dan mengaduk asam laktat menggunakan *hot plate magnetic stirrer* dengan temperatur reaksi 130 °C selama 2 jam dan tekanan vakum -2 bar.

---

### 3.6.2 Depolimerisasi

1. Menimbang massa PLA hasil prepolimerisasi.
2. Menambahkan ZnO sebagai katalis pembentukan laktida sebanyak 0,3 % wt pada reaktor.
3. Memanaskan PLA menggunakan *hot plate magnetic stirrer* dengan temperatur reaksi 140 °C selama 3 jam dan tekanan vakum -2 bar.

### 3.6.3 Polimerisasi Pembukaan Cincin Laktida

1. Menimbang massa laktida.
2. Menambahkan inisiator methanol 2,5 % wt dan menambahkan katalis seng asetat dengan berbagai konsentrasi (0; 0,2; 0,4; 0,6; dan 0,8 % wt).
3. Memanaskan laktida menggunakan *magnetic stirrer* dengan temperatur reaksi 150 °C selama 5 jam dan tekanan vakum -2 bar.
4. Melarutkan PLA yang terbentuk ke dalam 30 ml kloroform.
5. Memasukkan PLA yang telah dilarutkan ke dalam 20 ml methanol.
6. Mengeringkan PLA dengan memanaskan ke dalam oven selama 24 jam dengan temperatur 60 °C.
7. Menimbang massa PLA yang terbentuk dan melakukan pengujian.

### 3.6.4 Pengujian

Pengujian PLA hasil sintesis dilakukan untuk memperoleh data yang sesuai dengan tujuan penelitian. Pengujian yang dilakukan antara lain:

1. **FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*)**

Struktur kimia pada yang membentuk polimer merupakan salah satu aspek penting untuk diketahui, salah satunya yaitu gugus fungsi. Gugus fungsi pada polimer mempengaruhi sifat – sifat polimer. Pengujian FTIR dilakukan untuk mengetahui gugus fungsi yang menyusun

---

PLA. Mesin FTIR yang digunakan yaitu *Thermo Scientific Nicolet* dengan range *wavenumber* antara 400-4000  $\text{cm}^{-1}$ . Prinsip kerja FTIR yaitu ketika sampel ditembakkan dengan sinar inframerah sejumlah energi akan diabsorpsi dan sebagian akan dipancarkan kembali. Energi yang diserap pada sampel berhubungan erat dengan vibrasi dalam molekulnya. Besar energi vibrasi setiap komponen molekul berbeda-beda tergantung pada perbedaan ikatan pada molekul polimer. Pada analisis gugus kimia menggunakan FTIR terdapat dua istilah yaitu *bond stretching* dan *bond bending*. Dua atom berikatan karena memiliki pasangan elektron yang sama dan kedua inti saling bervibrasi maju mundur, serta mendekat menjauh antara satu dengan lainnya, hal ini disebut sebagai *bond stretching*. Sama halnya seperti *stretching*, ikatan kimia juga dapat membengkok atau *bending*. Radiasi inframerah yang sering digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada polimer adalah daerah inframerah dengan bilangan gelombang antara 4000-650  $\text{cm}^{-1}$  (Nida El Husna, 2006). Alat uji FTIR ditunjukkan oleh Gambar 3.15.



**Gambar 3.15** Alat Uji FTIR.

## 2. Berat Molekul dan Viskositas

Berat molekul merupakan salah satu parameter untuk menentukan karakteristik polimer. Penentuan berat molekul dapat dilakukan dengan pengukuran sifat fisik polimer seperti viskositas dan tekanan osmosis (Callister,

2009). Viskositas intrinsik  $[\eta]$  dapat dikaitkan dengan berat molekul menggunakan Persamaan 3.1 Mark – Houwink:

$$[\eta] = K.M^a \dots\dots\dots(3.1)$$

dimana  $[\eta]$  adalah viskositas intrinsik, K dan a merupakan tetapan yang bergantung pada temperatur, jenis polimer, dan pelarut yang digunakan. Pada penelitian ini menggunakan pelarut etil asetat dengan temperatur 25°C sehingga nilai K dan a yang diperoleh yaitu  $1,58 \times 10^{-4}$  dan 0,78. (Auras dkk., 2010 dan Garlotta, 2001). Metode viskometri larutan encer digunakan untuk mencari viskositas relatif, viskositas spesifik, dan viskositas reduksi. Metode ini menggunakan alat viskometer Oswald. Viskositas relatif ( $\eta$ ) merupakan perbandingan waktu antara pelarut dan larutan sehingga dapat ditulis pada Persamaan 3.2:

$$\eta = \frac{t}{t_0} \dots\dots\dots(3.2)$$

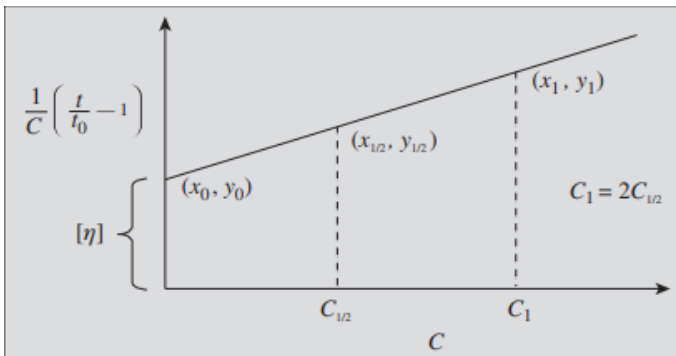
dimana t adalah waktu alir larutan dan  $t_0$  adalah waktu alir pelarut. Viskositas spesifik dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 3.3:

$$\eta_{sp} = \eta - 1 \dots\dots\dots(3.3)$$

dimana  $\eta$  merupakan viskositas relatif. Viskositas reduksi merupakan perbandingan viskositas relatif dengan konsentrasi polimer pada pelarut sehingga dapat ditulis dengan Persamaan 3.4:

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c} = \frac{1}{c} \left( \frac{t}{t_0} - 1 \right) \dots\dots\dots(3.4)$$

dimana  $C$  ada konsentrasi polimer pada pelarut. Viskositas intrinsik dapat ditentukan dengan membuat kurva viskositas reduksi – konsentrasi dan diekstrapolasi pada konsentrasi nol (ASTM D – 2857 dan Rudin, 2013). Adapun grafik viskositas reduksi – konsentrasi dapat dilihat pada Gambar 3.16.



**Gambar 3.16** Kurva Viskositas Reduksi Vs Konsentrasi untuk Menentukan Viskositas Intrinsik (Rudin, 2013).

### 3. Uji Biodegradasi

Metode kuantitatif sederhana yang digunakan untuk mengkarakterisasi terjadinya degradasi pada polimer adalah dengan menghitung massa yang hilang pada polimer (Hatakeyama, 1995). Kehilangan massa polimer ditentukan dengan menimbang massa polimer sebelum dan setelah polimer terjadi degradasi selama beberapa waktu tertentu. Pengujian ini dilakukan dengan cara mengubur PLA selama 4 minggu. Preparasi spesimen ini dengan membentuk PLA dengan ukuran  $2 \times 2 \times 0.4$  cm. Untuk menghitung massa yang hilang menggunakan Persamaan 3.5.



---

$$\text{Weight Loss, \%} = \frac{W_s - W_d}{W_s} \times 100 \dots\dots\dots(3.5)$$

dimana  $W_s$  merupakan massa sebelum diuji biodegradasi dan  $W_d$  merupakan massa spesimen setelah dilakukan uji biodegradasi.

#### 4. Uji *Water Absorbtion*

Pengujian *water absorbtion* menggunakan ASTM D570. Metode pengujian ini untuk menentukan penyerapan relatif air pada plastik ketika direndam. Spesimen pada pengujian ini dapat berupa bentuk batang, tabung, dan lembaran dengan ketebalan 0,13 mm atau lebih tebal. Preparasi spesimen ini dengan membentuk PLA dengan ukuran 3,5x1,3x0,2 cm. Pengujian ini dilakukan selama 24 jam perendaman dengan larutan aquades pada temperatur ruang. Massa awal dan akhir spesimen ditimbang untuk mengetahui persentase air yang diserap menggunakan Persamaan 3.6.

$$\text{Water Absorption, \%} = \frac{M_i - M_o}{M_o} \dots\dots\dots(3.6)$$

dimana  $M_o$  adalah massa awal spesimen sebelum direndam dan  $M_i$  adalah massa spesimen setelah dilakukan perendaman selama 24 jam.

### 3.7 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian pengaruh konsentrasi katalis seng asetat pada ROP laktida dari asam laktat dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Rancangan Penelitian

No	Material	Katalis (% wt)	Pengujian			Berat Molekul
			FTIR	Bio degrada dasi	<i>Water Absorption</i>	
1	Asam Laktat	-	√	-	-	-
2	PLA – Seng Asetat (0%)	0,0	√	√	√	√
3	PLA – Seng Asetat (0,2%)	0,2	√	√	√	√
4	PLA – Seng Asetat (0,4%)	0,4	√	√	√	√
5	PLA – Seng Asetat (0,6%)	0,6	√	√	√	√
6	PLA – Seng Asetat (0,8%)	0,8	√	√	√	√

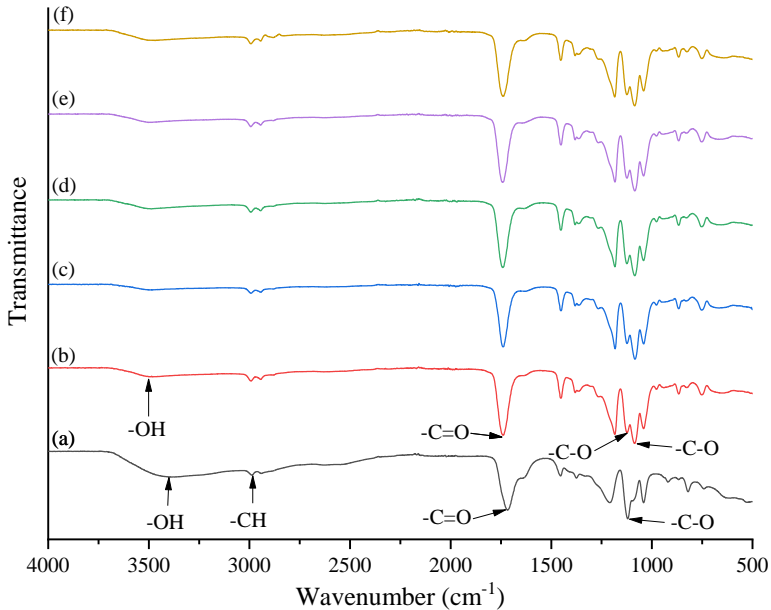
## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Poli(Asam Laktat) (PLA) pada penelitian ini menggunakan metode *ring – opening polymerization* (ROP) laktida dari asam laktat dengan variasi konsentrasi katalis seng asetat. Hasil dan pembahasan PLA sebagai hasil polimerisasi diuraikan pada pembahasan berikut ini.

### 4.1 Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap Karakteristik Struktur PLA

Karakterisasi FTIR digunakan untuk mengetahui gugus fungsi dari asam laktat dan juga gugus fungsi hasil polimerisasi asam laktat. Analisis FTIR ini berdasarkan wavenumber yang diserap oleh gugus fungsi tertentu. Perbandingan spektra FTIR antara asam laktat dan PLA hasil sintesis dapat dilihat pada Gambar 4.1.

Pada Gambar 4.1a merupakan spektra FTIR dari asam laktat. Pada asam laktat, *peak* pada *wavenumber*  $3363\text{ cm}^{-1}$  merupakan gugus hidroksil (*-OH stretch*), *peak* pada *wavenumber*  $2987\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus *-CH stretch* (Karande, dkk. 2015), *peak* pada *wavenumber*  $1716\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus *-C=O stretch* (Garlotta, 2001), dan *peak* pada *wavenumber*  $1119\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus *-C-O-* (Lee, dkk. 2015). Spektra FTIR dari setiap gugus fungsi asam laktat dapat dilihat pada Tabel 4.1.



**Gambar 4.1** Spektra FTIR spesimen (a) Asam Laktat, (b) PLA – Seng Asetat (0%) (c) PLA – Seng Asetat (0,2%), (d) PLA – Seng Asetat (0,4%), (e) PLA – Seng Asetat (0,6%), dan (f) PLA – Seng Asetat (0,8%).

Pada Tabel 4.1 menunjukkan bahwa spektra FTIR PLA hasil polimerisasi dengan penambahan variasi konsentrasi katalis seng asetat memiliki kesamaan *peak* pada *wavenumber* gugus fungsi tertentu. PLA – Seng Asetat (0%wt) pada proses polimerisasi memiliki *peak* pada *wavenumber* 3481  $\text{cm}^{-1}$  yang merupakan gugus fungsi  $\text{-OH stretch}$  (Karande dkk., 2015), *peak* pada *wavenumber* 1740  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan gugus fungsi  $\text{-C=O stretch}$  (Garlotta, 2001), dan *wavenumber* 1124 dan 1086  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan gugus fungsi  $\text{-C-O stretch}$  (Auras, 2010).

PLA – Seng Asetat (0,2%wt) memiliki *peak* pada *wavenumber* 3486  $\text{cm}^{-1}$  yang merupakan gugus fungsi  $\text{-OH stretch}$  (Karande dkk., 2015), *peak* pada *wavenumber* 1740  $\text{cm}^{-1}$

menunjukkan gugus fungsi  $\text{-C=O stretch}$  (Garlotta, 2001), dan *wavenumber* 1124 dan  $1085 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus fungsi  $\text{-C-O- stretch}$  (Auras, 2010).

PLA – Seng Asetat (0,4%wt) memiliki *peak* pada *wavenumber*  $3486 \text{ cm}^{-1}$  yang merupakan gugus fungsi  $\text{-OH stretch}$  (Karande dkk., 2015), *peak* pada *wavenumber*  $1741 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus fungsi  $\text{-C=O stretch}$  (Garlotta, 2001), dan *wavenumber* 1124 dan  $1085 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus fungsi  $\text{-C-O- stretch}$  (Auras, 2010).

PLA – Seng Asetat (0,6%wt) memiliki *peak* pada *wavenumber*  $3499 \text{ cm}^{-1}$  yang merupakan gugus fungsi  $\text{-OH stretch}$  (Lee dkk., 2015), *peak* pada *wavenumber*  $1741 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus fungsi  $\text{-C=O stretch}$  (Garlotta, 2001), dan *wavenumber* 1125 dan  $1085 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus fungsi  $\text{-C-O- stretch}$  (Auras, 2010).

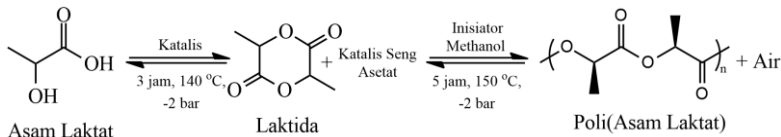
PLA – Seng Asetat (0,8%wt) memiliki *peak* pada *wavenumber*  $3497 \text{ cm}^{-1}$  yang merupakan gugus fungsi  $\text{-OH stretch}$  (Lee dkk., 2015), *peak* pada *wavenumber*  $1741 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus fungsi  $\text{-C=O stretch}$  (Garlotta, 2001), dan *wavenumber* 1124 dan  $1087 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus fungsi  $\text{-C-O- stretch}$  (Auras, 2010).

**Tabel 4.1** *Peak* Spektra FTIR Asam Laktat dan PLA.

Material	<i>Wavenumber</i> ( $\text{cm}^{-1}$ )		
	$\text{-OH stretch}$	$\text{-C=O stretch}$	$\text{-C-O stretch}$
Asam Laktat	3363	1716	1119
Seng Asetat 0%	3481	1740	1124; 1086
Seng Asetat 0,2%	3486	1740	1124; 1084
Seng Asetat 0,4%	3486	1741	1124; 1085
Seng Asetat 0,6%	3499	1741	1125; 1085
Seng Asetat 0,8%	3497	1741	1124; 1086

Berdasarkan hasil spektra FTIR tersebut terdapat perubahan pada gugus fungsi  $\text{-OH}$  antara asam laktat dan PLA dimana terjadi pengurangan intensitas dan peningkatan

transmitansinya. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Lee dkk. (2015), bahwa pada saat proses polimerisasi terjadi interaksi intermolekuler yang menghasilkan formasi ikatan baru antara gugus hidroksil yang berikatan dengan gugus karboksilat dan gugus hidroksil yang terikat gugus metil pada monomer lainnya. Gugus hidroksil pada saat proses polimerisasi terus berkurang karena terjadi reaksi kondensasi menghasilkan produk samping berupa air selama pembentukan dimer, trimer, oligomer, dan polimer PLA. Skema reaksi polimerisasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.2. Menurut Auras (2010), selain perubahan pada gugus hidroksil, perubahan lain yang cukup signifikan yaitu perubahan gugus fungsi asam karboksilat menjadi gugus ester akibat polimerisasi yang menyebabkan absorpsi  $\text{C}=\text{O}$  menjadi lebih tajam, selain itu terlihat *peak* baru akibat reaksi kimia pada *wavenumber*  $1090\text{ cm}^{-1}$  yang menunjukkan  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ - asimetris pada PLA.



**Gambar 4.2** Skema Reaksi Kimia Pembentukan PLA dengan Metode Ring - Opening Polymerization (ROP).

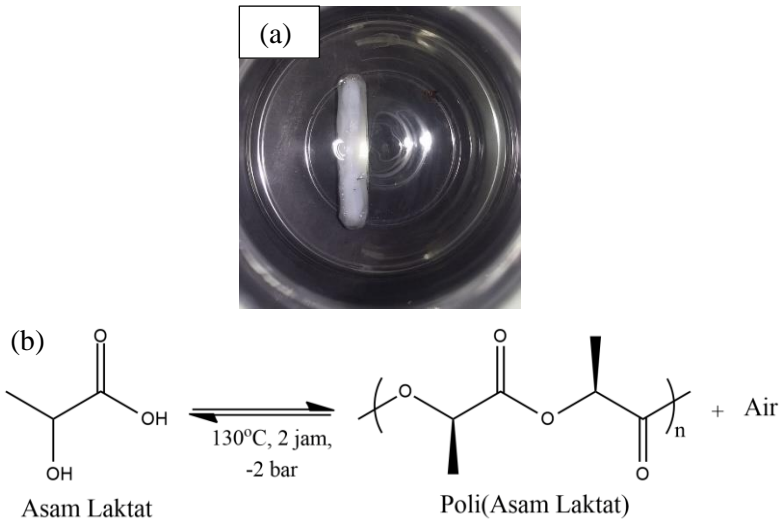
PLA hasil polimerisasi apabila dibandingkan dengan PLA referensi memiliki perbedaan *peak* yang cukup signifikan pada gugus  $\text{OH stretch}$ . PLA referensi memiliki *peak* pada *wavenumber*  $3571\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan gugus fungsi  $\text{OH stretch}$  (Garlotta, 2001). Menurut Lee dkk. (2015), hal ini disebabkan oleh perbedaan berat molekul pada PLA yang dipengaruhi oleh panjang rantainya. Semakin tinggi berat molekul PLA menyebabkan rantai PLA semakin panjang. Bertambahnya panjang rantai PLA, kandungan gugus fungsi hidroksil dalam rantai PLA menjadi lebih sedikit. Oleh karena itu, sinar IR yang digunakan untuk getaran

---

gugus -OH menjadi lebih rendah dan transmitansi yang lebih tinggi direkam dalam spektra.

ROP laktida dari asam laktat menggunakan katalis seng asetat dan metanol sebagai inisiator. Polimerisasi ROP melalui tiga tahapan yaitu prepolimerisasi, depolimerisasi, dan ROP laktida. Asam laktat yang digunakan merupakan asam laktat pro analis. Sebelum proses polimerisasi, asam laktat berwarna bening dan tidak terlalu kental.

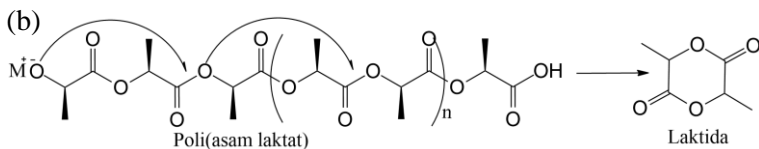
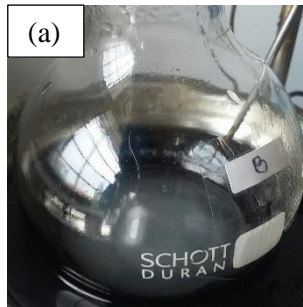
Pada Gambar 4.3a dapat dilihat hasil prepolimerisasi pada pembentukan PLA yang menghasilkan cairan dengan viskositas yang meningkat dan berwarna bening. Menurut Fakirov (2010), cairan yang dihasilkan merupakan oligomer PLA dengan berat molekul antara 1000-5000g/mol. Selain itu, pada tahap prepolimerisasi menghasilkan produk samping berupa air hasil kondensasi yang tertampung pada reaktor. Reaksi yang terjadi pada prepolimerisasi asam laktat merupakan reaksi polikondensasi yang ditunjukkan oleh Gambar 4.3b. Pada tahap ini pemisahan air merupakan faktor yang sangat penting. Keberadaan air di dalam reaksi dapat menyebabkan reaksi berlangsung ke arah kiri yang mengakibatkan penguraian dari polimer yang terbentuk (depolimerisasi).



**Gambar 4.3** Sintesis Asam Laktat Menjadi PLA pada Tahap Prepolimerisasi dengan Temperatur 130°C Selama 2 Jam (a) Oligomer PLA (b) Skema Reaksi Prepolimerisasi.

Pada Gambar 4.4a dapat dilihat hasil depolimerisasi dari PLA yang dihasilkan pada tahap prepolimerisasi. Pada tahap ini menghasilkan cairan kental berwarna putih yang merupakan laktida (dimer siklik asam laktat). Menurut Hu dkk. (2007), laktida pada tahap ini dihasilkan melalui transesterifikasi internal atau yang biasa disebut reaksi *backbiting* pada PLA. Mekanisme reaksi tersebut ditunjukkan oleh Gambar 4.4b.

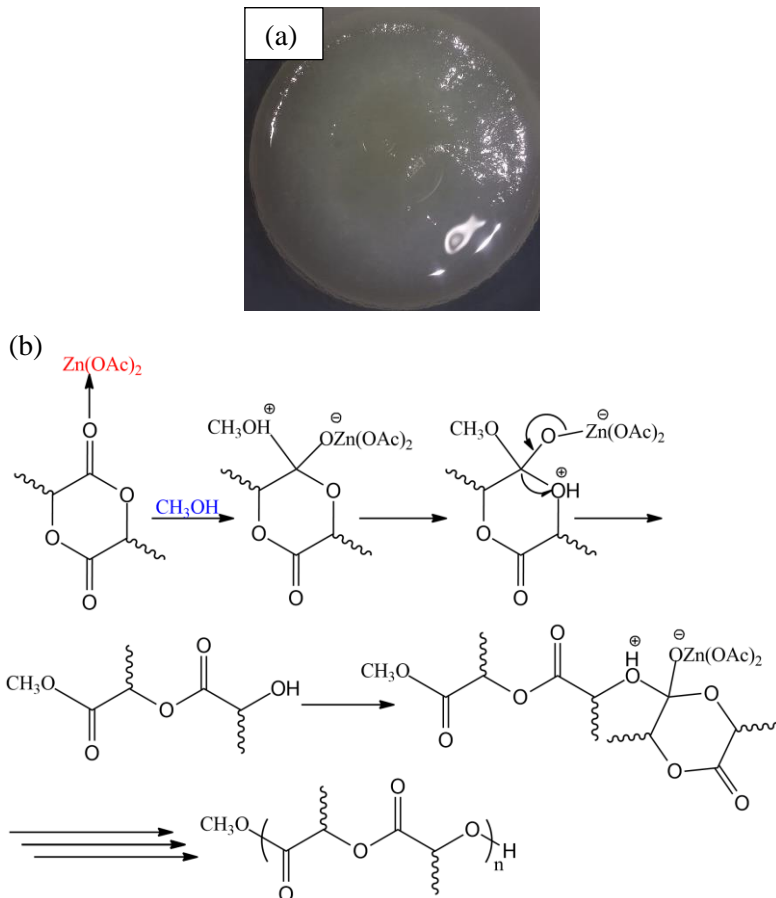




**Gambar 4.4** Sintesis Asam Laktat Menjadi PLA pada Tahap Depolimerisasi dengan Temperatur 140°C Selama 3 Jam (a) Laktida (b) Mekanisme Reaksi *Backbiting* pada PLA.

Pada Gambar 4.5a merupakan hasil akhir ROP laktida yang menghasilkan PLA. Skema reaksi pembentukan PLA pada tahap ROP ditunjukkan oleh Gambar 4.5b. Pada tahap ini ditambahkan katalis seng asetat dan inisiator metanol. Menurut Ravikumar Gowda dan Debashis Chakraborty (2010) dalam penelitiannya, metanol digunakan sebagai inisiator karena memiliki ikatan alkohol primer yang memiliki sifat lebih nukleofilic, mempermudah pemutusan ikatan *acyl*-oksigen. Proses polimerisasi ROP laktida menggunakan mekanisme koordinasi-penyisipan. Mekanisme koordinasi-penyisipan terdiri dari koordinasi antara monomer laktida dengan katalis seng asetat dan inisiator metanol dengan gugus karbonil. Katalis seng asetat memutus ikatan pada gugus karbonil menghasilkan ikatan sementara antara seng asetat-oksigen dan methanol pada laktida. Pada tahap selanjutnya pembukaan cincin laktida melalui pemutusan ikatan *acyl*-oksigen melalui donor atom hidrogen dari inisiator metanol yang menghasilkan ujung rantai gugus hidroksil

pada polimer. Reaksi terus berlanjut hingga membentuk PLA dengan ujung rantai gugus hidroksil dan gugus metil dari inisiator metanol.



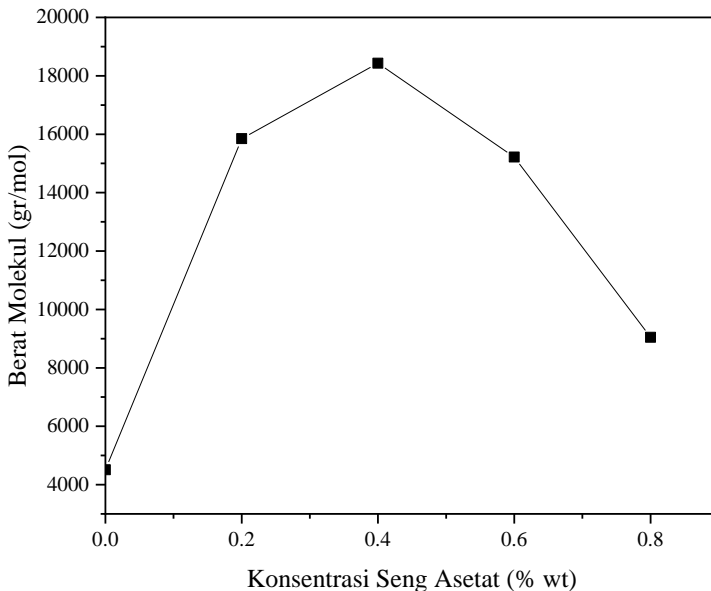
**Gambar 4.5** Tahapan *ROP* Asam Laktat Menjadi PLA (a) Poli(Asam Laktat) (PLA) (b) Mekanisme Reaksi *ROP* Laktida Menggunakan Katalis Seng Asetat dan Inisiator Metanol.

---

#### **4.2 Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap Berat Molekul PLA**

Penambahan katalis pada proses polimerisasi merupakan salah satu faktor penting pembentukan polimer. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Harrane dkk. (2012), berat molekul PLA sintesis dipengaruhi oleh waktu, temperatur, dan konsentrasi katalis. Semakin banyak konsentrasi katalis yang ditambahkan pada proses polimerisasi, berat molekul PLA yang dihasilkan semakin meningkat. Untuk membuktikannya, dilakukan pengujian berat molekul PLA hasil polimerisasi asam laktat dengan metode viskometri dengan standar ASTM D-2857. Hasil pengukuran waktu dan viskositas intrinsik dapat dilihat pada Lampiran 3.

Grafik pengaruh konsentrasi katalis terhadap berat molekul PLA yang dihasilkan ditunjukkan oleh Gambar 4.6. Berat molekul terendah yang dihasilkan pada PLA – Seng Asetat (0% wt) yaitu 4.509 g/mol. Pada grafik, penambahan katalis meningkatkan berat molekul, penambahan katalis ke tingkat yang lebih tinggi menurunkan berat molekul. Berat molekul PLA optimum yang dihasilkan yaitu 18.434 g/mol diperoleh pada polimerisasi asam laktat dengan penambahan konsentrasi katalis seng asetat (0,4% wt). Berat molekul PLA dihasilkan pada penambahan katalis seng asetat (0,2% wt) sebesar 15.849 g/mol, penambahan katalis seng asetat (0,6% wt) sebesar 15.218 g/mol, dan penambahan katalis seng asetat (0,8% wt) sebesar 9.045 g/mol.



**Gambar 4.6** Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap Berat Molekul PLA.

PLA – Seng Asetat (0% wt) memiliki berat molekul yang paling rendah dibandingkan dengan PLA dengan penambahan katalis, hal ini dikarenakan tidak adanya katalis seng asetat yang ditambahkan selama proses polimerisasi menyebabkan proses *ring opening polymerization* (ROP) laktida tidak terjadi. Sehingga pada pembentukan PLA – Seng Asetat (0% wt) menggunakan metode polikondensasi langsung. Hal ini sesuai dengan Jie Ren (2010), polimer yang diperoleh dari polikondensasi langsung memiliki berat molekul rendah dikarenakan sulitnya untuk menghilangkan air sepenuhnya. Oleh karena itu diperoleh polimer dengan berat molekul beberapa puluh ribu.

Berdasarkan hasil pengujian, penambahan konsentrasi menyebabkan berat molekul meningkat. Berat molekul PLA optimum diperoleh pada penambahan katalis seng asetat (0,4%).

Peningkatan berat molekul ini terjadi karena semakin banyak katalis yang digunakan menyebabkan laju inisiasi dan propagasi semakin cepat sehingga menghasilkan polimer yang lebih tinggi. Hal ini juga dilaporkan oleh Karande dkk., (2015), polimerisasi menggunakan metode azeotropic polikondensasi dengan katalis stannous oktoat. Pada konsentrasi stannous oktoat (0,1% mol) menghasilkan berat molekul yaitu 26.348 g/mol). Penambahan konsentrasi stannous oktoat (0,15%) pada proses polimerisasi meningkatkan berat molekul menjadi 28.823 g/mol.

Berdasarkan data pengujian, PLA – Seng Asetat (0,6% wt) dan PLA – Seng Asetat (0,8% wt) pada proses polimerisasi asam laktat, berat molekul PLA yang dihasilkan mengalami penurunan dibandingkan dengan berat molekul PLA – Seng Asetat (0,2% wt) dan PLA – Seng Asetat (0,4% wt). Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Harrane dkk. (2012), penambahan katalis/inisiator ketinggian yang lebih tinggi menurunkan berat molekul dan yield polimer yang dihasilkan, Penurunan ini disebabkan oleh sisa katalis yang menyebabkan rantai polimer terdegradasi. Fenomena ini terjadi akibat kelebihan konsentrasi “situs aktif asam Bronsted dan Lewis” pada permukaan katalis sehingga terjadi reaksi sekunder yaitu hidrolisis gugus ester pada rantai polimer. Menurut Gozan (2018), penambahan katalis tidak selalu linier untuk meningkatkan produksi PLA, hal ini terkait dengan laju perpindahan massa antara katalis dengan substrat. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Yu dkk. (2005), kelebihan konsentrasi menyebabkan laju inisiasi yang jauh lebih cepat daripada laju propagasi rantai polimer, sehingga menghasilkan polimer dengan rantai yang lebih pendek.

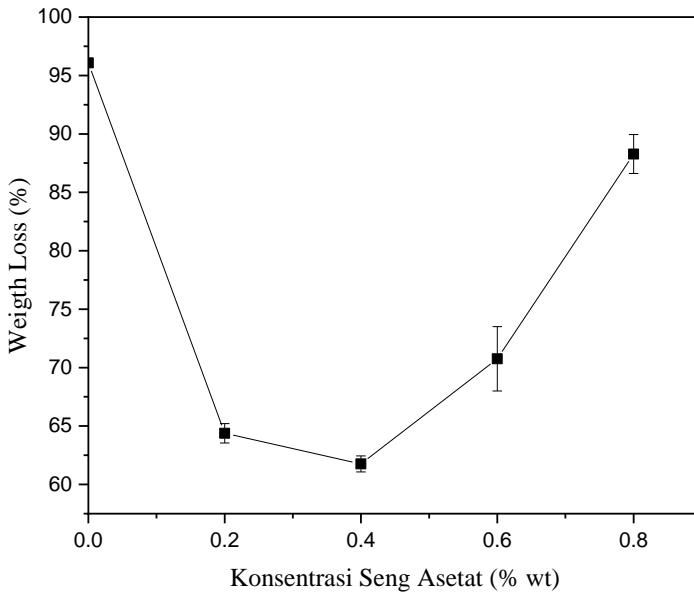
Berdasarkan hasil dan pembahasan, penambahan katalis meningkatkan laju reaksi dan propagasi sehingga meningkatkan berat molekul PLA, namun penambahan katalis ke tingkat konsentrasi yang lebih tinggi menyebabkan laju inisiasi jauh lebih cepat dibandingkan dengan laju propagasi sehingga menghasilkan berat molekul yang lebih rendah.

---

### 4.3 Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap Biodegradasi PLA

Biodegradasi polimer berkaitan dengan perubahan sifat mekanik dan fisik yang disebabkan perubahan rantai utama pada polimer. Pengujian biodegradasi pada PLA dilakukan pada media tanah menggunakan metode *weight loss*. Pada penelitian yang dilakukan oleh Proikakis (2002), sifat fisik dan biologis serta kinetika degradasi PLA dipengaruhi oleh berat molekul, struktur kimia unit berulang, dan karakteristik makromolekulnya. Penambahan katalis seng asetat mempengaruhi sifat biodegradasi PLA yang dihasilkan. Semakin banyak konsentrasi katalis yang ditambahkan pada proses polimerisasi, persentase *weight loss* PLA yang dihasilkan semakin menurun. Hasil pengukuran persentase *weight loss* PLA dapat dilihat pada Lampiran 4.

Grafik pengaruh penambahan konsentrasi katalis terhadap persentase *weight loss* PLA hasil polimerisasi hasil pengujian biodegradasi ditunjukkan oleh Gambar 4.7. Persentase *weight loss* tertinggi diperoleh pada polimerisasi asam laktat tanpa penambahan katalis seng asetat sebesar 96,07%. Pada grafik, penambahan katalis menurunkan persentase *weight loss*, penambahan katalis ke tingkat yang lebih tinggi meningkatkan persentase *weight loss*. Persentase *weight loss* PLA optimum diperoleh pada polimerisasi asam laktat dengan penambahan katalis seng asetat (0,4% wt) sebesar 61,75%. Penambahan katalis seng asetat (0,2% wt), seng asetat (0,6% wt) dan seng asetat (0,8% wt) pada proses polimerisasi asam laktat menghasilkan persentase *weight loss* PLA sebesar 64,38; 70,74; dan 88,28%. Penambahan katalis seng asetat (0,6% wt) dan seng asetat (0,8% wt) pada proses polimerisasi asam laktat, persentase *weight loss* PLA yang dihasilkan mengalami kenaikan dibandingkan dengan persentase *weight loss* PLA sebelumnya.



**Gambar 4.7** Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap *Weight Loss* PLA.

Berdasarkan hasil pengujian, penambahan katalis seng asetat pada proses polimerisasi meningkatkan berat molekul sehingga menyebabkan persentase *weight loss* menurun. Persentase *weight loss* optimum diperoleh pada konsentrasi katalis seng asetat (0,4% wt). Menurut Tokiwa dan Calabia (2006), perilaku degradasi pada polimer bergantung pada berat molekulnya ( $M_n$ ). Poliester dengan berat molekul tinggi terdegradasi pada tingkat yang lebih lambat dibandingkan dengan poliester berat molekul rendah. Pada penelitian yang dilakukan oleh Bubpachat dkk. (2018), langkah pertama pada proses biodegradasi yaitu adhesi dan kolonisasi bakteri pada permukaan PLA. Hidrofobisitas yang tinggi dari permukaan sel bakteri meningkatkan adhesi bakteri pada permukaan material hidrofobik. Pada tahap kedua, enzim pendegradasi PLA dan enzim ekstraseluler seperti protease

dan lipase diproduksi dan diekskresikan dari sel yang melekat dari bakteri. Enzim diadsorpsi atau dilokalisasi pada permukaan PLA untuk menghidrolisis struktur molekulnya. Lokalisasi enzim pendegradasi ekstraseluler pada permukaan PLA meningkatkan proses biodegradasi PLA. Pemutusan gugus fungsi ester pada PLA secara hidrolisis kimia dan enzimatik menghasilkan oligomer dan monomer asam laktat. Oligomer dan monomer asam laktat dengan berat molekul rendah digunakan oleh sel bakteri sebagai substrat nutrisi untuk pertumbuhannya menghasilkan karbondioksida dan air.

Berdasarkan hasil pengujian, penambahan katalis ke tingkat konsentrasi yang lebih tinggi menyebabkan laju inisiasi jauh lebih cepat dibandingkan laju propagasi sehingga berat molekul polimer yang dihasilkan lebih rendah. Penurunan berat molekul mengakibatkan persentase *weight loss* pada PLA meningkat. Menurut Garlotta (2001), biodegradasi dimulai dalam beberapa hari untuk polimer dengan berat molekul rendah, sedangkan untuk polimer dengan berat molekul yang lebih tinggi membutuhkan waktu lebih lama.

Berdasarkan hasil dan pembahasan, penambahan katalis dan berat molekul saling mempengaruhi persentase *weight loss* pada PLA yang dihasilkan. Penambahan katalis meningkatkan laju propagasi sehingga meningkatkan berat molekul PLA yang menyebabkan persentase *weight loss* menurun, namun penambahan katalis ke tingkat konsentrasi yang lebih tinggi menyebabkan laju inisiasi jauh lebih cepat sehingga menghasilkan berat molekul yang lebih rendah sehingga persentase *weight loss* pada PLA meningkat.

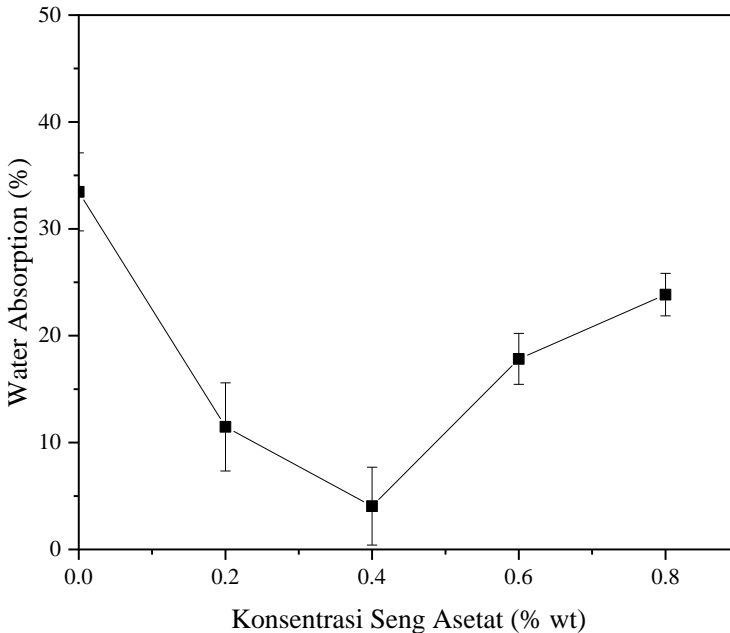
#### **4.4 Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap *Water Absorption* PLA**

*Water absorption* pada polimer bertujuan untuk mengetahui jumlah air yang diserap pada kondisi tertentu. Pengujian *water absorption* menggunakan metode immersi selama 24 jam menggunakan standar ASTM D-257. Menurut Proikakis



dkk. (2002), sifat fisik dan biologis serta kinetika degradasi PLA sangat berkaitan dengan berat molekul, struktur kimia unit berulang, dan karakteristik makromolekulnya. Penambahan katalis seng asetat mempengaruhi sifat *water absorption* PLA yang dihasilkan. Semakin banyak konsentrasi katalis yang ditambahkan pada proses polimerisasi berat molekul yang dihasilkan meningkat namun persentase *water absorption* PLA mengalami penurunan. Hasil pengujian *water absorption* PLA dapat dilihat pada Lampiran 5.

Grafik pengaruh penambahan konsentrasi katalis terhadap persentase *water absorption* PLA hasil polimerisasi ditunjukkan oleh Gambar 4.8. Persentase *water absorption* PLA yang dihasilkan pada polimerisasi asam laktat tanpa penambahan katalis seng asetat sebesar 33,46%. Pada grafik, penambahan katalis pada proses ROP menurunkan persentase *water absorption*, penambahan katalis ke tingkat yang lebih tinggi meningkatkan persentase *water absorption*. Persentase *water absorption* PLA optimum diperoleh pada polimerisasi asam laktat dengan penambahan katalis seng asetat (0,4%wt) sebesar 4,05%. Penambahan katalis seng asetat (0,2%wt), dan seng asetat (0,8%wt) pada proses polimerisasi asam laktat menghasilkan persentase *water absorption* PLA sebesar 15,68% dan 23,45%.



**Gambar 4.8** Pengaruh Katalis Seng Asetat Terhadap *Water Absorption* PLA.

Pada PLA hasil polimerisasi, polimer yang dihasilkan memiliki ujung rantai berupa gugus metil dan gugus hidroksil dari inisiator metanol. Berdasarkan hasil pengujian, penambahan katalis menghasilkan berat molekul semakin tinggi sehingga menyebabkan persentase *water absorption* mengalami penurunan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Jain (2018), adanya gugus fungsi  $-OH$  pada polimer menyebabkan peningkatan absorpsi air, *swelling*, dan kelarutan dalam air. Menurut Lee dkk. (2015), bertambahnya panjang rantai PLA, kandungan gugus fungsi  $-OH$  dalam rantai PLA menjadi lebih sedikit. Dari hasil pengujian FTIR, gugus hidroksil ( $-OH$ ) dari PLA hasil sintesis diabsorpsi di *peak* pada *wavenumber*  $3486\text{ cm}^{-1}$ .

---

Berdasarkan hasil pengujian, penambahan katalis ke tingkat konsentrasi yang lebih tinggi menyebabkan laju inisiasi jauh lebih cepat dibandingkan laju propagasi sehingga berat molekul polimer yang dihasilkan lebih rendah. Penurunan berat molekul mengakibatkan persentase *water absorption* pada PLA meningkat. Pada PLA dengan berat molekul rendah, rantai polimer yang dihasilkan lebih pendek sehingga memiliki banyak gugus fungsi hidroksil pada ujung rantai PLA.

Berdasarkan hasil dan pembahasan, penambahan katalis dan berat molekul saling mempengaruhi persentase *water absorption* pada PLA yang dihasilkan. Penambahan katalis meningkatkan laju inisiasi dan propagasi sehingga meningkatkan berat molekul PLA yang menyebabkan persentase *weight loss* menurun, namun penambahan katalis ke tingkat konsentrasi yang lebih tinggi menyebabkan laju inisiasi jauh lebih cepat dibandingkan laju propagasi sehingga menghasilkan berat molekul yang lebih rendah yang menyebabkan persentase *water absorption* pada PLA meningkat.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa data yang telah dilakukan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan katalis seng asetat pada *ring – opening polimerization* (ROP) laktida dari asam laktat meningkatkan berat molekul PLA. Penambahan katalis ke tingkat konsentrasi yang lebih tinggi menyebabkan laju inisiasi jauh lebih cepat dibandingkan dengan laju propagasi sehingga menghasilkan berat molekul yang lebih rendah. Berat molekul PLA optimum diperoleh dengan penambahan katalis seng asetat (0,4% wt) sebesar 18.434 g/mol.
2. Penambahan katalis meningkatkan berat molekul PLA menyebabkan persentase *weight loss* menurun. Penambahan katalis ke tingkat konsentrasi yang lebih tinggi menghasilkan berat molekul yang lebih rendah sehingga persentase *weight loss* pada PLA meningkat. Persentase *weight loss* PLA optimum diperoleh dengan penambahan katalis seng asetat (0,4% wt) sebesar 61,75%.
3. Penambahan katalis meningkatkan berat molekul PLA menyebabkan persentase *water absorption* menurun. Penambahan katalis ke tingkat konsentrasi yang lebih tinggi menghasilkan berat molekul yang lebih rendah menyebabkan persentase *water absorption* pada PLA meningkat. Persentase *water absorption* PLA optimum diperoleh dengan penambahan katalis seng asetat (0,4% wt) sebesar 8,25%.

#### **5.2 Saran**

1. Perhitungan berat molekul dapat menggunakan *Gel Permeation Chromathrogapy* (GPC) untuk menghasilkan berat molekul yang akurat.

- 
2. Pada penelitian selanjutnya, temperatur dan waktu polimerisasi dapat digunakan sebagai variabel penelitian pada proses polimerisasi metode *ring – opening polymerization* (ROP) laktida untuk memperoleh berat molekul yang lebih tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, F., Yamane, K., Quan, S., dan Kokugan, T. 2009. "Synthesis of polylactic acid by direct polycondensation under vacuum without catalysts, solvents and initiators". **Chemical Engineering Journal** 151, 1-2:342–350.
- Allock, H.R. dan Lampe, F.W. 1981. **Contemporary Polymer Chemistry**. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Americanelement. **Zinc Acetate Dihydrate**. <<https://www.americanelements.com/zinc-acetate-557-34-6>>. Diakses pada 16 Februari.
- ASTM. 1970. **American Standar for Testing Material International**. West Conshohocken: ASTM International
- Auras, R., Harte, B., dan Selke, S. 2004. "An Overview of Polylactides as Packaging Materials". **Macromolecular Bioscience** 4, 9:835–864.
- Auras, R., Lim, L. T., Selke, S. E. M., dan Tsuji, H. 2010. **POLY(LACTIC ACID): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications**. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Avérous, L., 2008. "Polylactic Acid: Synthesis, Properties and Applications" dalam **Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources**. Amsterdam: Elsevier Ltd.
- Bubpachat, T., Sombatsompop, N., dan Prapagdee, B. 2018. "Isolation and role of polylactic acid-degrading bacteria on degrading enzymes productions and PLA biodegradability at mesophilic conditions". **Polymer Degradation and Stability** 152:75–85.
- Callister, W. D. 2009. **Materials Science and Engineering an Introduction**. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Chua, C.K., Wong, C.H., dan Yeong, W.Y. 2017. **Standards, Quality Control and Meas-urement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing**. San Diego: Academic Press.

- 
- Chuensangjun, C., Pechyen, C., & Sirisansaneeyakul, S. 2013. “Degradation Behaviors of Different Blends of Polylactic Acid Buried in Soil”. **Energy Procedia** 34:73–82.
- Cornejo, J. J. M., Daiguji, H., dan Takemura, F. 2011. “Factors Affecting the Size and Uniformity of Hollow Poly(lactic acid) Microcapsules Fabricated from Microbubble Templates”. **The Journal of Physical Chemistry B** 115, 47:13828–13834.
- Dusselier, M. 2013. “Lactic Acid as a Platform Chemical in the Biobased Economy: The Role of Chemocatalysis”. **Energy & Environmental Science** 6, 5:1415-1442.
- Ebnesajjad, S. 2013. **Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics - Properties, Processing and Applications**. Amsterdam: Elsevier Ltd.
- Ertl, G., Knözinger, H., Schüth, F., dan Weitkamp, J. 2008. **Handbook of Heterogeneous Catalysis**. Germany: John Wiley & Sons Inc.
- Farah, S, Anderson D. G., dan Langer, R. 2016. “Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications — A Comprehensive Review”. **Advanced Drug Delivery Reviews** 107:367-392.
- Garlotta, D. 2001. “A Literature Review of Poly(Lactic Acid)”. **Journal of Polymers and the Environment** 9, 2:63-84.
- Gowda, R. R. dan Chakraborty, D. 2010. “Zinc Acetate as A Catalyst for the Bulk Ring Opening Polymerization of Cyclic Esters and Lactide”. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical** 333, 1-2:167–172.
- Gozan, M., Kamilah, F., Whulanza, Y., dan Rahmayetty. 2018. “Optimization of Lactide Synthesis from Lactic Acid in biorefinery of Palm Oil Waste using Response Surface Methodology”. **Materials Science and Engineering** 334, 1:2-9.
- Gupta, A.P. dan Kumar, V. 2007. “New Emerging Trends in Synthetic Biodegradable Polymers – Polylactide: A critique”. **European Polymer Journal**, 43:4053–4074.
-



- 
- Harrane, A., Belaouedj, M.A., Meghabar, R. dan Belbachir, M. 2012.” Bulk polycondensation of lactic acid by Maghnite- $H^+$  a non-toxic catalyst”. **Journal Polymer Research** 19, 2: 9785-9790.
- Hatakeyama, H., Hirose, S., Hatakeyama, T., Nakamura, K., Kobashigawa, K., & Morohoshi, N. 1995. “Biodegradable Polyurethanes from Plant Components”. **Journal of Macromolecular Science** 32,4:743–750.
- Hu, Y., Daoud, W. A., Fei, B., Chen, L., Kwan, T. H., dan Lin, C. S. K. 2017. “Efficient ZnO aqueous nanoparticle catalysed lactide synthesis for poly(lactic acid) fibre production from food waste”. **Journal of Cleaner Production** 165:157-167.
- Husna, N. E. 2006. **Sintesis dan Karakterisasi Polylactic Acid Secara Polikondensasi Langsung L-Asam Laktat dan N,N-Disikloheksilkarbodimida**. Bogor: IPB
- Jain, N., Singh, V. K., & Chauhan, S. 2018. “A review on mechanical and water absorption properties of polyvinyl alcohol based composites/films”. **Journal of the Mechanical Behavior of Materials** 26, 5-6:213–222
- Karande, R. D., Abitha, V. K., Rane, A. V., dan Mishra, R. K. 2015. “Preparation of Polylactide From Synthesized Lactic Acid and Effect Of Reaction Parameters on Conversion. **Journal of Materials Science and Engineering with Advanced Technology** 12, 1-2:1-37.
- Lasprilla, A. J. R., Martinez, G. A. R., Lunelli, B. H., Jardini, A. L., dan Filho, R. M. 2012. “Poly-Lactic Acid Synthesis for Application in Biomedical Devices — A Review”. **Biotechnology Advances** 30, 1:321–328.
- Lee, H. W., Insyani, R., Prasetyo, D., Prajitno, H., dan Sitompul, J. 2015. “Molecular Weight and Structural Properties of Biodegradable PLA Synthesized with Different Catalysts by Direct Melt Polycondensation”. **Journal Engineering Technology Science** 47, 4:364-373.
-

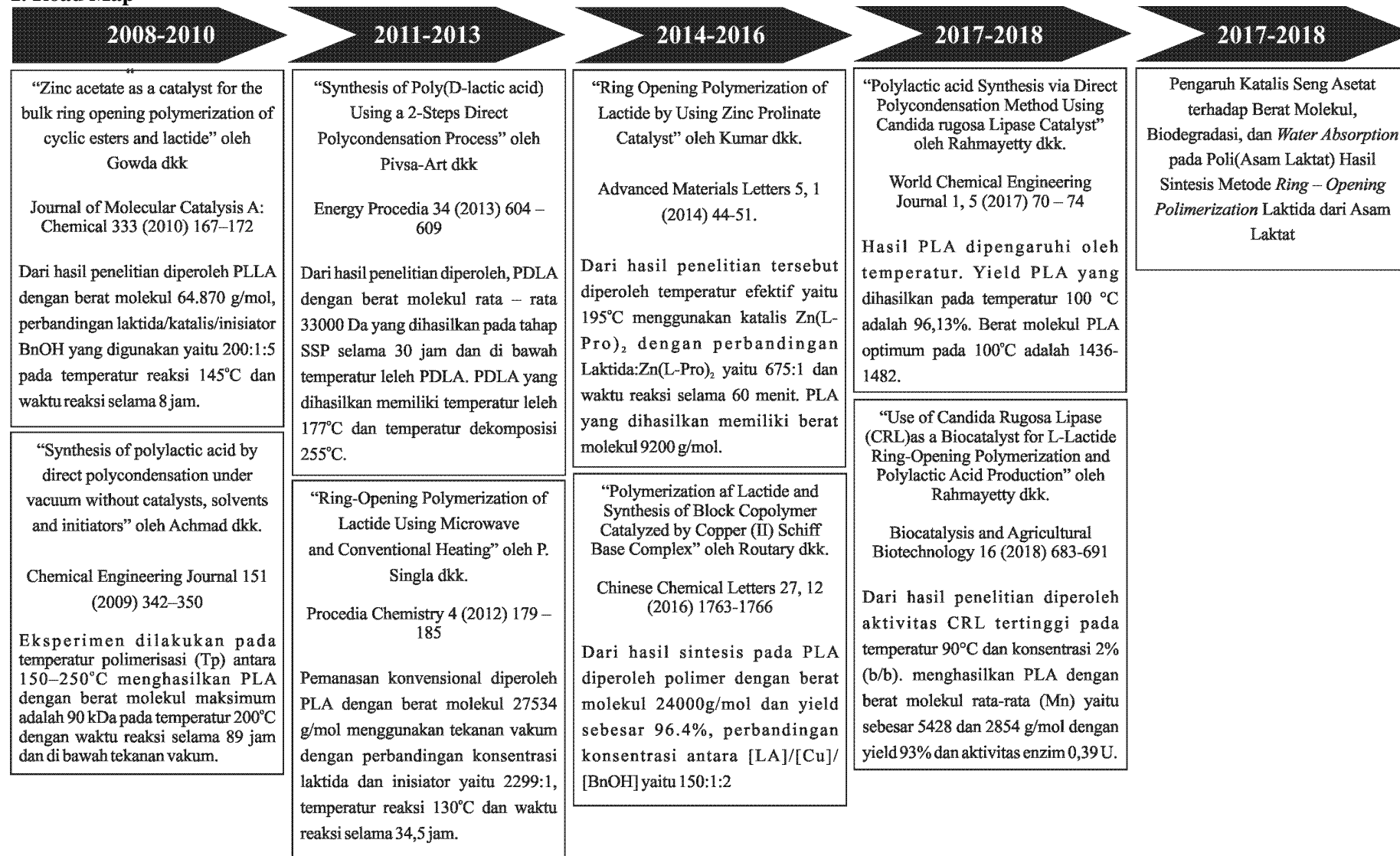
- 
- Lorenzo, M. L. D., dan Androsch, R., 2018. **Synthesis, Structure and Properties of Poly(lactic acid)**. Switzerland: Springer International Publishing.
- Maharana, T., Mohanty, B., dan Negi, Y. S. 2009. "Melt–solid polycondensation of lactic acid and its biodegradability". **Progress in Polymer Science** 34, 1:99–124.
- McKeen, L. W. 2012. **Permeability Properties of Plastics and Elastomers**. USA: William Andrew.
- Narayanan, N., Roychoudhury, P.K., dan Srivastava, A. 2004. "L(+)Lactic Acid Fermentation and Its Product Polymerization". **Electronic Journal of Biotechnology** 7, 2:167-180.
- Pandey, A., Negi, S., dan Soccol, C. R. 2017. **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Production, Isolation and Purification of Industrial Products**. Amsterdam: Elsevier.
- Pandey, Asutosh Kumar. 2014. "Ring Opening Polymerization of Lactide by Using Zinc Proline Catalyst". **Advanced Materials Letters** 5, 1:44 – 51.
- Pivsa-Art, S., Tong-ngok, T., Junngam, S., Wongpajan, R., dan Pivsa-Art, W. 2013. "Synthesis of Poly(D-lactic acid) Using a 2-Steps Direct Polycondensation Process". **Energy Procedia** 34, 1:604 – 609.
- Polyfluor. **Datasheet PLLA Filament**.  
<[https://www.polyfluor.nl/html/stream\\_file.php?key=12910iqmjz](https://www.polyfluor.nl/html/stream_file.php?key=12910iqmjz)>. Diakses pada 16 Februari.
- Proikakis, C. S., Tarantili, P. A., dan Andreopoulos, A. P. 2002. "Synthesis and Characterization of Low Molecular Weight Polylactic Acid". **Journal Elastomer and Plastics**, 34:49-63.
- Proikakis, C. S., Mamouzelos, N. J., Tarantili, P. A., dan Andreopoulos, A. G.. 2002. "Stability of DL-Poly(lactic acid) in Aqueous Solutions". **Journal of Applied Polymer Science** 87, 5:795–804.
-

- 
- Putrilia, N. R. 2014. **Pengaruh Katalis Stannous Oktoat (Sn(Oct)<sub>2</sub>) Terhadap Karakteristik Poly Lactic Acid (PLA)** (skripsi). Surabaya: UNAIR.
- Rahmayetty, Barleany, D. R., Suhendi, E., Prasetya, B., dan Andiyani, T. 2017. "Polylactic acid Synthesis via Direct Polycondensation Method Using *Candida rugosa* Lipase Catalyst". **World Chemical Engineering Journal** 1, 5:70 – 74
- \_\_\_\_\_, Whulanza, Y., Sukirno, Rahmana, S. F., Suyono, E. A., Yohda, M., dan Gozan M. 2018. "Use of *Candida Rugosa* Lipase as a Biocatalyst for L-Lactide Ring-Opening Polymerization and Polylactic Acid Production". **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology** 16, 1:683-691
- Rajek, J.F. 1983. **Experimental Method in Polymer Chemistry: Physicals Principles and Application**. New York: A Willey-Interscience Publication.
- Ren, J. 2010. **Biodegradable Poly(Lactic Acid): Synthesis, Modification, Processing and Applications**. Beijing: Tsinghua University Press.
- Routaray, A., Mantri, S., Nath, N., Sutar, A. K, dan Maharana, T. 2016. "Polymerization of Lactide and Synthesis of Block Copolymer Catalyzed by Copper (II) Schiff Base Complex". **Chinese Chemical Letters** 27, 12:1763-1766
- Rudin, A., dan Choi, P. 2013. **The Elements of Polymer Science and Engineering**. United Kingdom: Academic Press.
- Singla, P., Kaura, P., Mehta, R., Berek, D., dan Upadhyay, S.N. "Ring-Opening Polymerization of Lactide Using Microwave and Conventional Heating". **Procedia Chemistry**, 4:179-185
- Tamzis, M dan Agustini, R. 2012. **Pengaruh Konsentrasi Katalis Timah(II) Oktoat Terhadap Viskositas dan Massa Molekul Poli(Asam Laktat) pada Polimerisasi Asam Laktat dengan Metode Ring Opening Polymerization**. Surabaya: Universitas Negeri Surabaya.
-

- 
- Tokiwa, Y., dan Calabia, B. P. (2006). “Biodegradability and biodegradation of poly(lactide)”. **Applied Microbiology and Biotechnology** 72, 2:244–251.
- Tsuji, H. 2015. “Poly(lactide) Stereocomplexes: Formation, Structure, Properties, Degradation, and Applications”. **Macromolecular Bioscience** 5, 7:569–597.
- Wee, Y. J., Kim, J. N., dan Ryu, H. W. 2006. “Biotechnological Production of Lactic Acid and Its Recent Applications”. **Food Technol. Biotechnol** 44, 2:163–172.
- Yu, T. L., Wu, C. C., Chen, C. C., Huang, B. H., Wu, J., dan Lin, C. C. 2005. “Catalysts for the ring-opening polymerization of 3-caprolactone and L-lactide and the mechanistic study”. **Polymer** 46, 16:5909–5917.

## LAMPIRAN

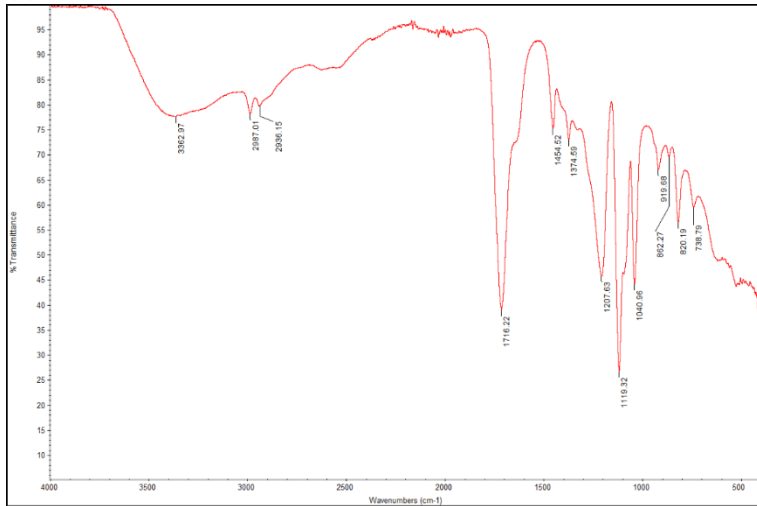
### 1. Road Map



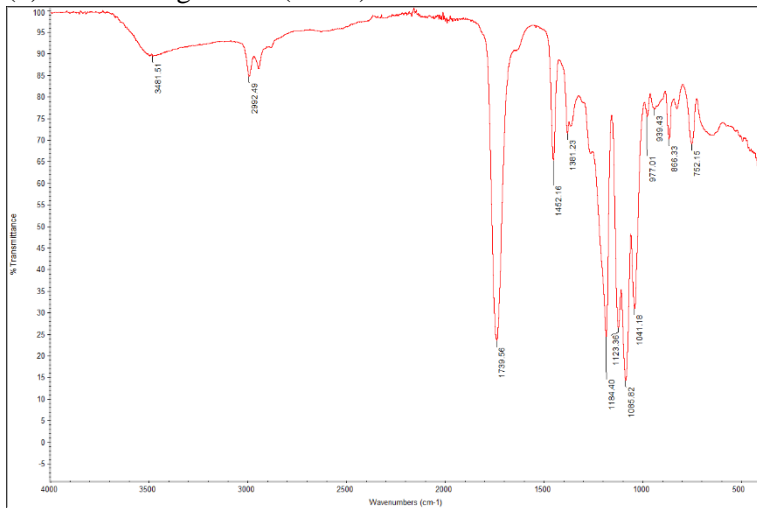
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## 2. Hasil karakterisasi FTIR

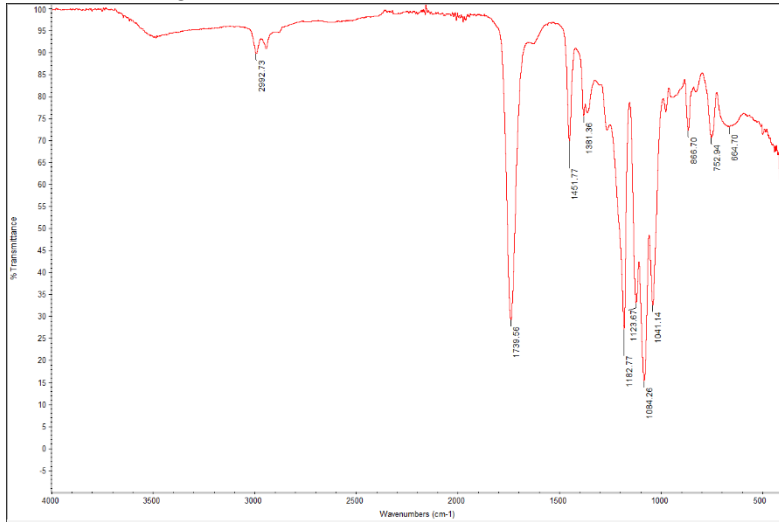
### (a) Asam laktat



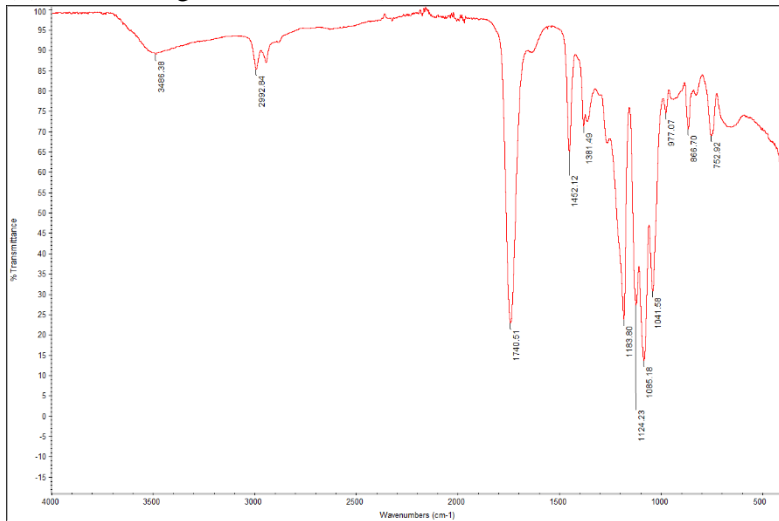
### (b) PLA – Seng Asetat (0% wt)



(c) PLA – Seng Asetat (0,2% wt)

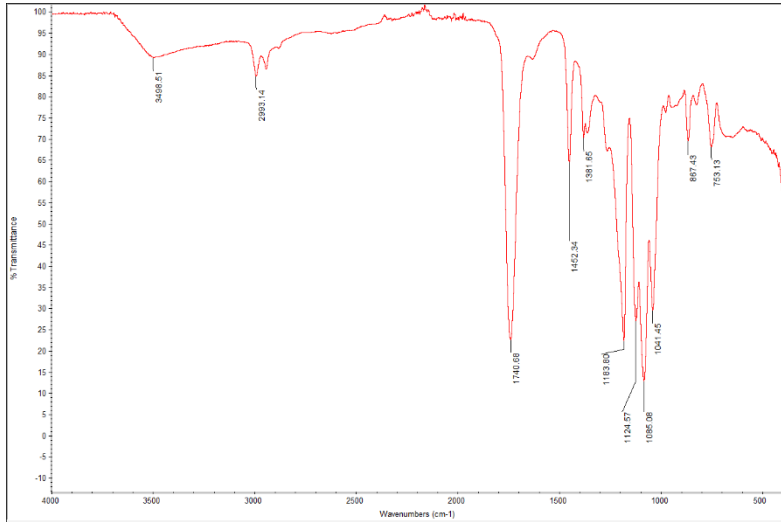


(d) PLA – Seng Asetat (0,4% wt)

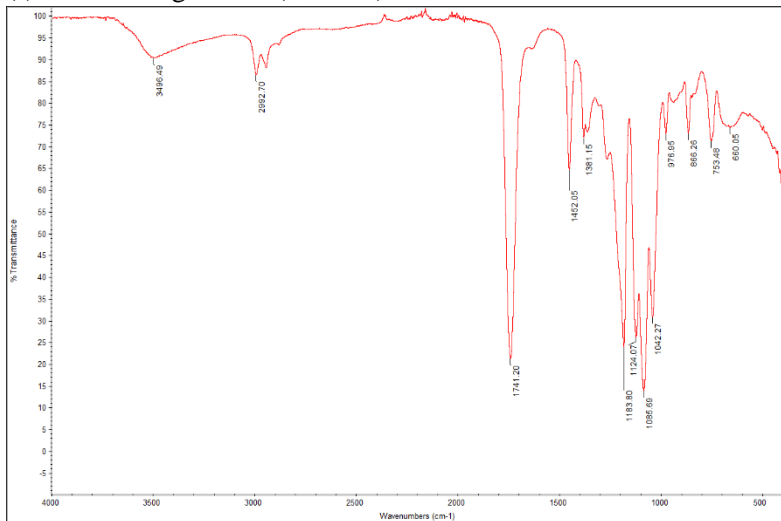




(e) PLA – Seng Asetat (0,6% wt)



(f) PLA – Seng Asetat (0,8% wt)



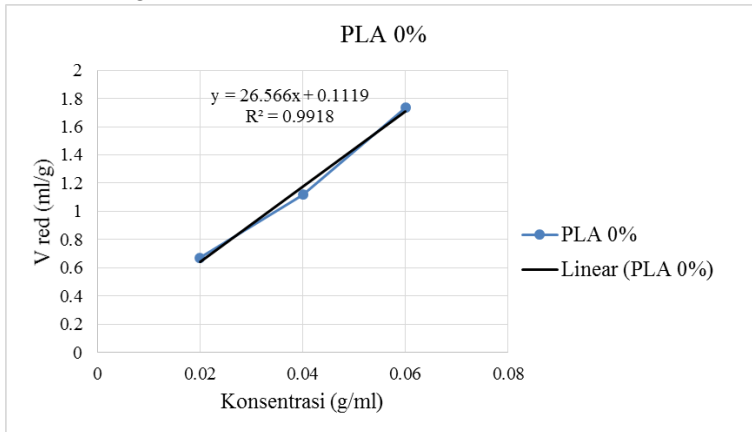
### 3. Hasil perhitungan berat molekul

#### a.) Waktu Alir PLA.

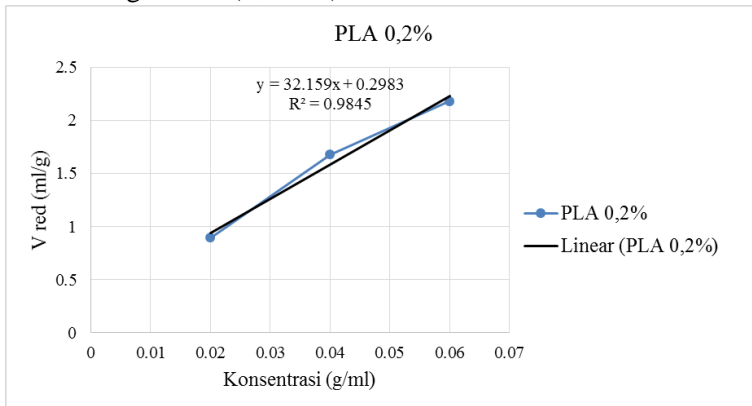
Material	M Pla (g)	C (g/ml)	t1	t2	t3	rata	stdv
Etil Asetat	-	-	3	2.96	2.98	2.980	0.020
PLA - Seng Asetat (0%)	0.1 0.2 0.3	0.02 0.04 0.06	3 3.08 3.26	3.05 3.26 3.33	3.01 3 3.28	3.020 3.113 3.290	0.026 0.133 0.036
PLA- Seng Asetat (0.2%)	0.1 0.2 0.3	0.02 0.04 0.06	3.06 3.2 3.47	2.99 3.21 3.25	3.05 3.13 3.39	3.033 3.180 3.370	0.038 0.044 0.111
PLA- Seng Asetat (0.4%)	0.1 0.2 0.3	0.02 0.04 0.06	3.08 3.29 3.53	3.02 3.17 3.51	3.04 3.2 3.37	3.047 3.220 3.470	0.031 0.062 0.087
PLA- Seng Asetat (0.6%)	0.1 0.2 0.3	0.02 0.04 0.06	3.04 3.13 3.33	3.02 3.09 3.37	3.05 3.15 3.35	3.037 3.123 3.350	0.015 0.031 0.020
PLA- Seng Asetat (0.8%)	0.1 0.2 0.3	0.02 0.04 0.06	3.08 3.1 3.33	2.97 3.17 3.25	3.01 3.13 3.27	3.020 3.133 3.283	0.056 0.035 0.042

b.) Viskositas relatif, spesifik, dan reduksi PLA.

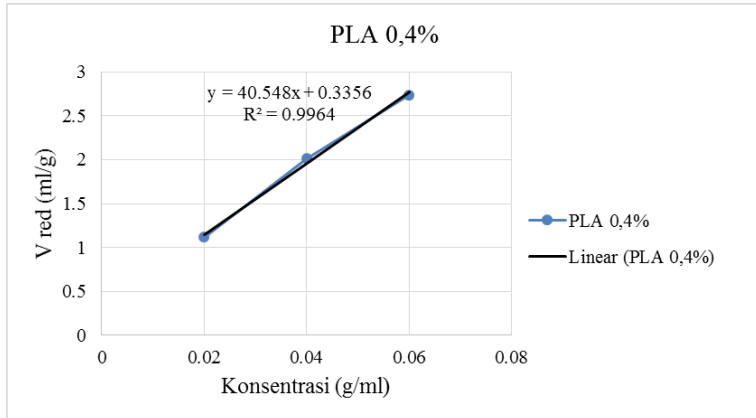
Material	Konsentrasi (g/ml)	Viskositas		
		Relatif	Spesifik	Reduksi (ml/g)
PLA - Seng Asetat (0%)	0,02	1,013423	0,013423	0,671141
	0,04	1,044743	0,044743	1,118568
	0,06	1,104027	0,104027	1,733781
PLA- Seng Asetat (0.2%)	0,02	1,017897	0,017897	0,894855
	0,04	1,067114	0,067114	1,677852
	0,06	1,130872	0,130872	2,181208
PLA- Seng Asetat (0.4%)	0,02	1,022371	0,022371	1,118568
	0,04	1,080537	0,080537	2,013423
	0,06	1,16443	0,16443	2,740492
PLA- Seng Asetat (0.6%)	0,02	1,019016	0,019016	0,950783
	0,04	1,048098	0,048098	1,202461
	0,06	1,124161	0,124161	2,069351
PLA- Seng Asetat (0.8%)	0,02	1,013423	0,013423	0,671141
	0,04	1,051454	0,051454	1,286353
	0,06	1,10179	0,10179	1,696495

c.) Grafik Konsentrasi vs viskositas Reduksi  
PLA – Seng Asetat (0% wt)

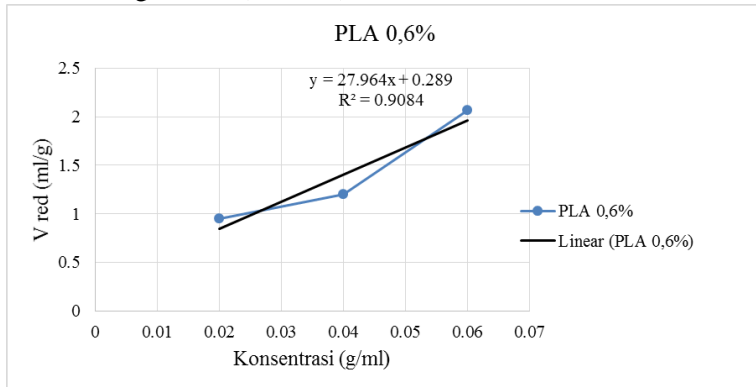
## PLA– Seng Asetat (0,2% wt)



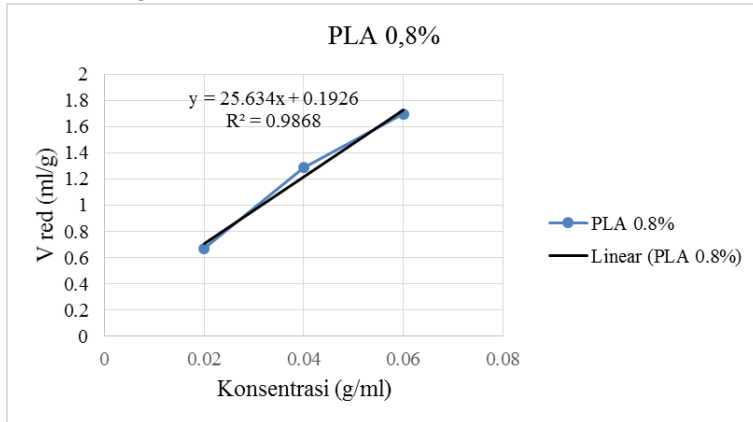
### PLA – Seng Asetat (0,4% wt)



### PLA – Seng Asetat (0,6% wt)



PLA – Seng Asetat (0,8% wt)



d.) Perhitungan berat molekul

1. PLA 0%

Persamaan garis:  $y = 26,5666x + 0,1119$

Viskositas intrinsik ( $\eta$ ) = 0,1119

2. PLA 0,2%

Persamaan garis:  $y = 32,159x + 0,2983$

Viskositas intrinsik ( $\eta$ ) = 0,2983

3. PLA 0,4%

Persamaan garis:  $y = 40,548x + 0,3356$

Viskositas intrinsik ( $\eta$ ) = 0,3356

4. PLA 0,6%

Persamaan garis:  $y = 27,964x + 0,289$

Viskositas intrinsik ( $\eta$ ) = 0,289

5. PLA 0,8%

Persamaan garis:  $y = 25,634x + 0,1926$

Viskositas intrinsik ( $\eta$ ) = 0,1926

---

6. Perhitungan berat molekul dari viskositas intrinsik

Persamaan:  $[\eta] = K \times M^a$

Dimana:

$a = 0,78$

$K = 1,58 \times 10^{-4}$

---

Material	$[\eta]$	Berat Molekul (g/mol)
PLA – Seng Asetat (0%)	0,1119	4509
PLA – Seng Asetat (0,2%)	0,2983	15849
PLA– Seng Asetat (0,4%)	0,3356	18434
PLA– Seng Asetat (0,6%)	0,289	15218
PLA– Seng Asetat (0,8%)	0,1926	9045

---

#### 4. Hasil pengujian biodegradasi

Material	M awal (g)	M Kertas (g)	M akhir (g)	M Bersih (g)	Weight loss (%)	Rata-rata	STDEV
PLA - Seng Asetat (0%)	1.4422	0.0498	0.1052	0.0554	96.15910877	96.079	0.167
	1.4344	0.0498	0.1088	0.058993333	95.8872467		
	1.4489	0.0498	0.105	0.055193333	96.19067338		
PLA - Seng Asetat (0.2%)	1.4527	0.0498	0.578	0.528193333	63.64057732	64.381	0.826
	1.4363	0.0498	0.5486	0.498793333	65.27234329		
	1.4339	0.0498	0.5627	0.512893333	64.23088546		
PLA - Seng Asetat (0.4%)	1.4328	0.0498	0.5927	0.542893333	62.10962218	61.754	0.684
	1.4458	0.0498	0.5965	0.546693333	62.18748559		
	1.4382	0.0498	0.6112	0.561393333	60.9655588		
PLA - Seng Asetat (0.6%)	1.4526	0.0498	0.5155	0.465693333	67.94070402	70.737	2.755
	1.4356	0.0498	0.4687	0.418893333	70.82102721		
	1.4398	0.0498	0.4321	0.382293333	73.4481641		
PLA - Seng Asetat (0.8%)	1.4335	0.0498	0.1936	0.143793333	89.96907336	88.276	1.666
	1.433	0.0498	0.2186	0.168793333	88.22098162		
	1.4347	0.0498	0.2415	0.191693333	86.63878627		



### 5 Hasil pengujian *water absorption*

Material	Ket	M Kering (g)	M Kertas (g)	M Basah (g)	M Nett (g)	%	Rata	STDEV
PLA - Seng Asetat (0%)	A	1.0029	0.0389	1.3506	1.3117	30.79070695		
	B	0.9656	0.0389	1.3131	1.2742	31.95940348	33.456955	3.6529957
	C	0.9213	0.0389	1.3068	1.2679	37.62075328		
PLA - Seng Asetat (0.2%)	A	0.9271	0.0389	1.0435	1.0046	8.35940028		
	B	0.9233	0.0389	1.1113	1.0724	16.14859742	11.468463	4.1254208
	C	0.9356	0.0389	1.0671	1.0282	9.897392048		
PLA - Seng Asetat (0.4%)	A	0.9222	0.0389	0.9784	0.9395	1.875948818		
	B	0.9282	0.0389	0.9859	0.947	2.025425555	4.0512672	3.6390788
	C	0.927	0.0389	1.0424	1.0035	8.252427184		
PLA - Seng Asetat (0.6%)	A	0.9263	0.0389	1.1545	1.1156	20.4361438		
	B	0.9262	0.0389	1.1254	1.0865	17.30727705	17.833709	2.3832314
	C	0.9278	0.0389	1.1129	1.074	15.7577064		
PLA - Seng Asetat (0.8%)	A	0.9282	0.0389	1.1965	1.1576	24.71450119		
	B	0.9229	0.0389	1.1948	1.1559	25.24650558	23.845684	1.983482
	C	0.9251	0.0389	1.1636	1.1247	21.57604583		

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Purworejo pada tanggal 27 April 1997 merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Mujiono dan Siti Muslikhatun. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri 2 Baledono, SMP Negeri 2 Purworejo, dan SMA Negeri 1 Purworejo. Penulis memiliki hobi naik gunung, memancing, dan menjelajah alam.

Saat ini, penulis melanjutkan studinya melalui jalur SBMPTN di Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya yang dimulai pada tahun 2015 dan terdaftar dengan nomor NRP 2715100080. Di Departemen Teknik Material penulis aktif dalam organisasi intra departemen sebagai staff LDJ Ashabul Kaffi tahun 2016-2017, wakil divisi khusus di BSO Minat Bakat HMMT FTI-ITS tahun 2017-2019, dan asisten laboratorium di laboratorium Korosi dan Kegagalan Material. Selain itu, penulis terlibat dalam beberapa kepanitiaan diantaranya panitia Metal Gear dalam rangka Dies Natalies HMMT FTI-ITS, Pra-TD FTI-ITS, dan Pearlite LDJ Ashabul Kaffi.

Penulis melakukan penelitian tugas akhir di bidang material inovatif tentang “**Pengaruh Konsentrasi Katalis Seng Asetat terhadap Berat Molekul, Bioegradasi, dan Water Absorption pada Poli(Asam Laktat) Hasil Sintesis Metode Ring – Opening Polimerization Laktida dari Asam Laktat**” dengan harapan studi ini akan memberikan kontribusi pada pengembangan polimer biodegradabel yang ramah lingkungan. Nomor telepon penulis yang dapat dihubungi 08981191822 dan alamat email [bahtiarbangjo2@gmail.com](mailto:bahtiarbangjo2@gmail.com).

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*