

Pra Desain Pabrik *Poly Lactic Acid* (PLA) dari Porang

Mathilda Jowito Pasaribu, Berlina Yunita Sari Romaji, Yeni Rahmawati, dan Fadlilatul Taufany
Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: rifqah_18des@chem-eng.its.ac.id

Abstrak—*Poly Lactic Acid* atau disingkat PLA merupakan termoplastik *biodegradable* turunan dari sumber daya terbarukan. Kebutuhan dunia akan plastik yang terus meningkat diiringi dengan pencemaran lingkungan akan plastik yang juga terus meningkat, membuat PLA menjadi alternatif baik pengganti plastik *non-degradable* seperti PET, PP dan PS. Selain membantu mengurangi pencemaran lingkungan, PLA dapat membantu mengurangi penggunaan sumber daya fosil serta mengurangi emisi CO₂ secara bersamaan. Bahan baku utama yang digunakan untuk membuat PLA adalah umbi Porang basah (*Amorphophallus muelleri*). Untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri dan adanya peluang ekspor yang masih terbuka, maka dirancang pabrik PLA dengan kapasitas 10.000 ton/tahun. Pabrik direncanakan berdiri di Kabupaten Nganjuk, Jawa Timur pada tahun 2025. Proses pembuatan PLA melalui beberapa tahap proses, meliputi proses pembentukan asam laktat melalui proses fermentasi menggunakan bakteri *Lactobacillus pentosus* B-227, proses pemurnian asam laktat melalui proses esterifikasi, dan proses polimerisasi melalui proses *ring-opening polymerization*. Dengan desain umur pabrik selama 10 tahun, didapatkan *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar 14,50% yang dimana nilainya lebih besar dari bunga pinjaman bank sebesar 8%. Kemudian didapatkan *Pay Out Time* (POT) sebesar 8,08 tahun dan *Break Even Point* (BEP) sebesar 35,6%.

Kata Kunci—*Biodegradable*, *Poly Lactic Acid*, Porang, *Ring Opening Polymerization*.

I. PENDAHULUAN

KEHIDUPAN manusia tidak pernah luput dari penggunaan plastik untuk mendukung kegiatan sehari-hari, mulai dari kegiatan domestik baik dari segi rumah tangga, komersil, maupun industri. Proses produksi dan kegiatan penunjang lainnya pasti membutuhkan plastik. Penggunaan plastik tersebut terbukti menimbulkan masalah sampah yang serius. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), jumlah sampah plastik Indonesia pada tahun 2019 mencapai 9,52 juta ton atau 14 persen dari total sampah yang ada. Berdasarkan data Jambeck (2015), Indonesia berada di peringkat kedua dunia penghasil sampah plastik ke laut yang mencapai sebesar 187,2 juta ton setelah Tiongkok yang mencapai 262,9 juta ton. Sampah plastik atau benda-benda lain yang mengandung plastik bisa menjadi ancaman bagi kelestarian bumi. Jika dibuang begitu saja ke tanah, plastik baru bisa hancur setelah sekitar 200-400 tahun. Sedangkan jika dibakar, asap pembakaran akan berubah menjadi racun yang berbahaya jika dihirup. Oleh karena itu, inovasi pembuatan plastik ramah lingkungan perlu dikembangkan, yaitu *Poly Lactic Acid* (PLA). PLA dapat berasal dari 2 jenis monomer asam laktat hasil fermentasi, yaitu *D(-)-Lactic Acid* dan *L(+)-*

Tabel 1.

Supply demand PLA di Indonesia

Tahun	Produksi (ton/tahun)	Konsumsi (ton/tahun)	Ekspor (ton/tahun)	Impor (ton/tahun)
2012	0	114.449	0	114.449
2013	0	117.018	0	117.018
2014	0	141.437	0	141.437
2015	0	104.784	0	104.784
2016	0	131.239	0	131.239

Tabel 2.

Estimasi ekspor dan impor PLA di Indonesia Tahun 2025

Tahun	Ekspor (kg/tahun)	Impor (kg/tahun)
2025	-	214.490,62

Lactic Acid. Pemilihan monomer asam laktat bergantung pada tujuan aplikasi produk PLA yang akan diproduksi.

Penggunaan PLA tidak hanya terbatas pada bahan pembuatan bioplastik, tetapi PLA dapat dikembangkan sebagai kemasan makanan, hingga kapsul obat, industri dan industri tekstil. *L(+)-Lactic Acid* biasanya dipilih dalam industri farmasi dan makanan karena dapat diproses oleh enzim dehydrogenase *L-lactate* sehingga aman untuk tubuh. Namun, secara alamiah, proses fermentasi akan menghasilkan dua enantiomer (isomer cermin) sehingga produk PLA yang dihasilkan berupa rasemik PDLA [1]. PLA menjadi pilihan plastik karena bersifat *biodegradable* melalui proses degradasi enzimatis oleh mikroorganisme seperti bakteri dan jamur [2]. Berbeda dengan plastik konvensional, plastik *biodegradable* terbuat dari material yang dapat diperbaharui, yaitu dari senyawa-senyawa yang terdapat dalam tanaman misalnya pati, selulosa, kolagen, kasein, protein atau lipid yang terdapat dalam hewan [3]. Penggunaan material *biodegradable* dari sumber daya alam yang dapat diperbarui sangat membantu mengurangi persentase limbah plastik. Akan tetapi, bahan yang paling potensial untuk menghasilkan plastik yang bersifat *biodegradable* adalah plastik yang berbahan PLA (*Poly lactic Acid*) [3].

Pendirian pabrik PLA di Indonesia memiliki peluang yang baik untuk memenuhi kebutuhan PLA dalam negeri maupun luar negeri. Selain itu, pendirian pabrik PLA diharapkan juga dapat menghemat devisa negara dalam mengimpor PLA, meningkatkan pendapatan negara melalui ekspor PLA, membuka lapangan kerja baru bagi masyarakat, serta mendorong berdirinya pabrik baru yang menggunakan PLA sebagai bahan baku.

II. KAPASITAS PABRIK DAN PEMILIHAN PROSES

Dalam penentuan kapasitas pabrik *Poly Lactic Acid* yang akan dibuat, maka diambil data *supply-demand Poly Lactic Acid* di Indonesia dari Badan Pusat Statistik. Berdasarkan

Tabel 3.

Perhitungan pertumbuhan rata-rata Produksi dan konsumsi PLA dunia				
Tahun	Produksi (kiloton)	Konsumsi (kiloton)	Pertumbuhan rata-rata	
			Produksi	Konsumsi
2015	810	790,4	-	-
2016	849	831,2	4,81%	5,16%
2017	885	878,4	4,24%	5,68%
2018	912	945,6	3,05%	7,65%
Rata-rata			4,03%	6,16%

Tabel 4.

Estimasi produksi dan konsumsi PLA dunia tahun 2025			
Tahun	Produksi (kt/tahun)	Konsumsi (kt/tahun)	Kebutuhan PLA (kt/tahun)
2025	1.202,56	1.436,92	234,36

data Badan Pusat Statistik *supply-demand* PLA di Indonesia dari tahun 2012 hingga 2016 yang disajikan pada Tabel 1., tingginya *demand* dan tidak adanya *supply* menunjukkan bahwa ada potensi untuk pendirian pabrik dalam rangka pemenuhan kebutuhan PLA. Pabrik PLA ini ditargetkan untuk mulai beroperasi pada tahun 2025.

Berdasarkan Tabel 1 Ekspor Impor *Poly Lactic Acid* (PLA) di Indonesia diperoleh pertumbuhan rata-rata impor sebesar 5,61% dan dapat diprediksi kondisi pada tahun 2025 dengan menggunakan persamaan *discounted* [4] sebagai berikut:

$$P_{2025} = P_{2016} \times (1 + i)^n \tag{1}$$

Dimana P adalah kebutuhan produk pada tahun 2025, *i* adalah pertumbuhan rata-rata dan *n* adalah selisih waktu antara tahun 2025 dan 2016. Selanjutnya, dihitung estimasi ekspor dan impor PLA di Indonesia tahun 2025.

Dari perhitungan estimasi yang tertera pada Tabel 2 dapat dihitung kebutuhan PLA nasional dengan persamaan:

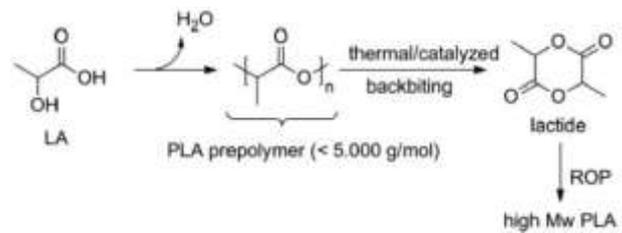
$$\text{Kebutuhan PLA nasional} = (\text{Ekspor} + \text{Konsumsi}) - (\text{Produksi} + \text{Impor}) \tag{2}$$

Selanjutnya didapat kebutuhan PLA nasional sebesar -214.490,62 kg/tahun. Hasil negatif menunjukkan bahwa total produksi PLA di Indonesia pada tahun 2025 belum mencukupi kebutuhan nasional sehingga masih bergantung pada impor. Sedangkan dari data konsumsi dan produksi PLA dunia, dapat diperkirakan pertumbuhan rata – rata yang tertera pada Tabel 3.

Dari estimasi produksi dan konsumsi PLA dunia ini dapat dihitung kebutuhan PLA dunia dengan persamaan *discounted* pada tahun 2025 dan ditunjukkan pada Tabel 4.

Dalam menentukan kapasitas produksi pabrik PLA yang akan didirikan, perlu diperhatikan aspek kompetitor yakni pabrik PLA lain yang beroperasi pada tahun 2025 dengan kapasitas produksi beragam, aspek ketersediaan bahan baku porang pada daerah di sekitar pabrik yang akan didirikan, serta aspek target pemasaran yang ada disekitar lokasi pabrik. Berdasarkan tinjauan kapasitas pabrik PLA yang sudah berdiri di dunia, kami menetapkan kapasitas pabrik plastik PLA berbahan baku porang ini sebesar 10 kiloton/tahun. Kapasitas ini mampu memenuhi kebutuhan impor PLA Indonesia sebesar 4,66% atau memenuhi kebutuhan PLA global sebesar 4,27%.

Dalam penentuan lokasi pabrik ada 3 faktor utama yang dipertimbangkan yaitu faktor teknis, ekonomi, dan lingkungan. Ketiga faktor itu dibagi menjadi beberapa kriteria yaitu ketersediaan bahan baku dalam satuan *raw*



Gambar 1. Mekanisme ring opening polymerization.

material transportation cost, lokasi pemasaran, sumber energi listrik dan air, sumber tenaga kerja, aksesibilitas dan fasilitas transportasi, hukum dan peraturan, dan iklim dan topografi. Berdasarkan kriteria tersebut ditetapkan 2 alternatif yaitu Provinsi Jawa Timur dan Provinsi Jawa Tengah. dan melalui pembobotan dengan *Analytical Hierarchy Process* (AHP), maka ditetapkan lokasi pendirian pabrik di Provinsi Jawa Timur tepatnya Kabupaten Nganjuk. Beberapa faktor penting yang membuat Nganjuk, Jawa Timur terpilih diantaranya adalah jika ditinjau dari aspek ekonomi ketersediaan bahan baku porang Sebagian besar di wilayah Jawa Timur yaitu di Jember, Nganjuk, Padangan, Saradan, Bojonegoro, dan Madiun. Dari segi akses dan transportasi di Jawa Timur memiliki banyak pelabuhan. Dari segi aspek teknis sumber tenaga kerja di Jawa Timur cukup banyak dengan lulusan perguruan tinggi sebesar 2.324.067. Berdasarkan Surat Edaran Menteri Ketenagakerjaan tahun 2019 untuk UMK Kabupaten Nganjuk sebesar Rp 1.954.705. Segi aspek lingkungan ketersediaan sumber energi di Jawa Timur tinggi dan ketersediaan air dapat dipenuhi dari sungai-sungai yang ada di Jawa Timur.

Untuk pemilihan proses produksi PLA mulanya dibentuk terlebih dahulu asam laktat dari bahan baku, kemudian asam laktat dimurnikan serta dilakukan polimerisasi untuk membentuk PLA. Asam laktat dapat diproduksi melalui dua macam proses, yaitu proses sintesis kimia dan proses fermentasi. Asam laktat akan mengalami proses pemurnian setelah tahap fermentasi agar dapat diaplikasikan untuk kebutuhan farmasi ataupun industri makanan. Selain itu, pemurnian akan meningkatkan efektivitas proses dalam menghasilkan polimer asam laktat dengan berat molekul yang lebih besar. Kemudian, barulah asam laktat murni melalui proses polimerisasi untuk membentuk PLA, terdapat 4 metode proses polimerisasi, yaitu proses *direct polymerization*, *chain extension polymerization*, *enzymatic polymerization*, dan *ring-opening polymerization*. Dalam pemilihan proses perlu dipertimbangkan beberapa aspek seperti bahan baku, konversi, kondisi operasi, ekonomi dll. Pemilihan proses sangat penting dilakukan untuk memperoleh produk bernilai jual tinggi dengan bahan baku yang murah dan biaya produksi yang rendah.

A. Produksi Asam Laktat dengan Sintesis Kimia

Proses produksi asam laktat dengan sintesis kimia diawali dengan *lactonitrile* yang terbentuk dari reaksi antara *acetaldehyde* dengan hidrogen sianida. Kemudian *Lactonitrile* mengalami proses *recovery* dan pemurnian dengan distilasi dan dilanjutkan dengan proses hidrolisis oleh asam klorida atau asam sulfat sehingga dihasilkan garam ammonium dan asam laktat. Asam laktat yang dihasilkan dari proses ini mengalami proses esterifikasi dengan menggunakan metanol sehingga dihasilkan metil laktat yang kemudian akan dipisahkan dan dimurnikan

Tabel 5.
Perbandingan antara proses pembuatan asam laktat, pemurnian asam laktat, dan polimerisasi asam laktat

Proses	Kelebihan	Kekurangan
1. Pembuatan asam laktat		
Sintesis kimia	Suhu operasi rendah, tidak membutuhkan area produksi yang besar	Bahan baku mahal, tidak dapat diperbarui, yield asam laktat rendah
Fermentasi	Murah, menghasilkan asam laktat dengan kemurnian tinggi, yield yang dihasilkan ramah lingkungan	Membutuhkan <i>maintenance</i> yang cukup rumit untuk mikroorganisme yang akan digunakan
2. Pemurnian asam laktat		
Presipitasi garam kation	Biaya murah, proses sederhana	Tingkat kemurnian medium (80-85%), menghasilkan CaSO ₄ dalam jumlah banyak, tahapan kompleks
Esterifikasi	Tingkat kemurnian tinggi (80-95%), efisien	Biaya cukup tinggi, menghasilkan CaSO ₄
Membran dan Elektrodialisis	Tingkat kemurnian tinggi (90-95%)	Biaya operasional tinggi, <i>maintenance</i> rumit
3. Proses polimerisasi		
<i>Direct polymerization</i> BM: 300000 gram/mol	One-step, sederhana, murah	Berat molekul produk rendah, yield rendah, optical purity rendah
<i>Chain extension polymerization</i>	Two-step, berat molekul produk tinggi	Berbahaya bagi lingkungan, tidak food-grade, optical purity rendah
<i>Enzymatic polymerization</i>	One-step, ramah lingkungan, berat molekul tinggi	Teknologi belum dikembangkan, yield rendah
<i>Ring-Opening polymerization</i>	Berat molekul tinggi, food-grade dan medical-grade, yield tinggi, optical purity Tinggi	Multi-step, membutuhkan kemurnian lactide yang tinggi sehingga menaikkan cost

dengan proses distilasi. Selanjutnya metil laktat dihidrolisis oleh air dengan katalis asam untuk menghasilkan asam laktat dengan kemurnian yang lebih tinggi dan metanol yang akan di-*recycle* menuju proses esterifikasi [5]. Sintesis asam laktat dengan proses kimia memiliki beberapa keterbatasan antara lain kapasitas produksi terbatas, tidak dapat diterapkan jika produk yang diinginkan hanya berupa isomer L-Lactic Acid, dan biaya operasional yang tinggi [6].

B. Produksi Asam Laktat dengan Fermentasi

Fermentasi merupakan metoda yang paling banyak digunakan oleh industry untuk menghasilkan asam laktat. Parameter penting dalam proses fermentasi adalah pH, temperature, dan agitasi untuk beberapa kasus. Asam laktat yang diperoleh dari proses fermentasi harus dipisahkan dari media fermentasi untuk kemudian dipurifikasi guna mendapatkan asam laktat murni. Bahan baku yang diperlukan harus memenuhi syarat tertentu seperti: murah, memiliki persediaan yang banyak, menghasilkan *yield* yang tinggi, kecepatan produksi yang tinggi, dan tidak menghasilkan produk samping dalam jumlah yang banyak [2]. Terdapat dua macam jenis bakteri yang terlibat dalam proses fermentasi asam laktat yaitu homofermentatif dan heterofermentatif. Bakteri homofermentatif hanya menghasilkan asam laktat, sedangkan bakteri heterofermentatif menghasilkan asam laktat, ethanol, dan CO₂. Pada industri umumnya digunakan bakteri homofermentatif untuk mengurangi produk samping yang terbentuk [7]. Fermentasi berlangsung pada pH 6,9. pH 6,9 dijaga dengan menggunakan *buffering agent* seperti NaOH, Ca(OH)₂, CaCO₃, ataupun NH₂OH. Dari proses fermentasi, maka akan terbentuk garam laktat yang kemudian akan dihidrolisis dengan asam kuat untuk menghasilkan asam laktat *crude*. Bakteri yang akan digunakan dalam seleksi proses pabrik ini yaitu bakteri yang menghasilkan substrat glukosa dan mannose diantaranya *Lactobacillus pentosus* NRRL B-227, *Lactobacillus plantarum* NRRL B-531, *Lactobacillus lactis* sp. *Lactis* NRRL B-4449.

C. Purifikasi Asam Laktat dengan Presipitasi Garam

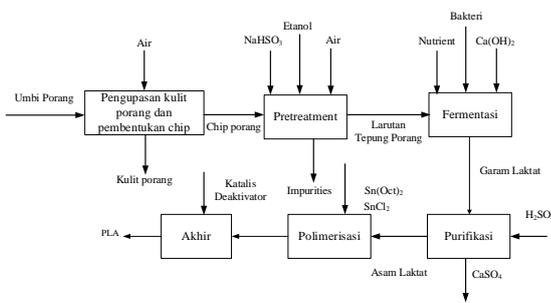
Setelah tahap fermentasi, asam laktat akan mengalami proses pemurnian. Garam laktat yang dihasilkan dari proses fermentasi dan netralisasi dipanaskan kemudian dihidrolisis dengan menggunakan asam sulfat sehingga menghasilkan garam sulfat dan larutan asam laktat *crude*. Garam sulfat yang dihasilkan dari proses ini selanjutnya dipisahkan melalui proses filtrasi, sementara larutan asam laktat akan menjalani pemurnian lebih lanjut, dengan proses evaporasi [8].

D. Proses Purifikasi Asam Laktat dengan Esterifikasi

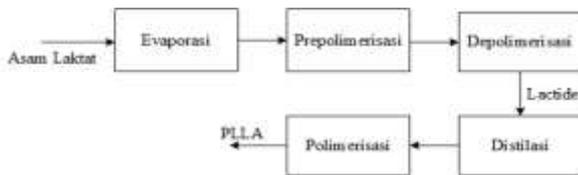
Metode pemurnian esterifikasi oleh alkohol akan dilanjutkan dengan proses hidrolisis. Proses esterifikasi dan hidrolisis akan dilakukan di dalam kolom distilasi reaktif. Esterifikasi dijalankan dengan mereaksikan asam laktat (*crude*) dari hasil fermentasi dengan metanol sehingga terbentuk ester laktat. Selanjutnya ester laktat akan dihidrolisis dengan air sehingga terbentuk asam laktat pekat. Kemurnian asam laktat yang dapat dicapai melalui proses ini adalah 80-95% [8].

E. Proses Purifikasi Asam Laktat Menggunakan Membran dan Elektrodialisis

Purifikasi asam laktat dengan membran melibatkan membran ultrafiltrasi dan elektrodialisis. Produk dari proses fermentasi dan netralisasi akan melewati membran ultrafiltrasi secara kontinyu dengan garam laktat sebagai *permeate*. Selanjutnya, garam laktat akan melalui proses pemisahan di elektrodialisis monopolar. Elektrodialisis monopolar bertujuan untuk memisahkan komponen *non-ionic* seperti fosfat dan meningkatkan kepekatan garam laktat. Proses ini dijalankan pada suhu dan tekanan *ambient* (25°C; 1 atm). Setelah melewati proses pemisahan di elektrodialisis monopolar, kemudian garam laktat akan melewati proses pemisahan di elektrodialisis bipolar. Asam laktat dari elektrodialisis bipolar ini selanjutnya akan dipekatkan kembali dengan evaporator. Kemurnian asam laktat yang



Gambar 4. Diagram blok proses pembuatan PLA dari porang.



Gambar 5. Diagram alir proses polimerisasi.

dicapai dari proses purifikasi dengan membran dan elektrodialisis adalah 90-95%.

F. Proses Polimerisasi Direct Polymerization

Direct polymerization merupakan metode yang paling sederhana. Proses ini disebut proses langsung (*direct*) karena hanya mencakup proses *polycondensation* saja. Polimerisasi terjadi akibat reaksi antara gugus hidroksil asam laktat dengan gugus asam karboksilat asam laktat lain yang terdekat. Monomer-monomer asam laktat pada keadaan vakum dan suhu sekitar 150-250°C akan bergabung dengan bantuan inisiator, membentuk asam polilaktida (PLA) dan air. Air yang terbentuk kemudian diuapkan untuk menjaga kesetimbangan reaksi sehingga reaksi akan cenderung ke arah pembentukan PLA. Dalam metode ini akan menghasilkan PLA dengan berat molekul sekitar 1000–5000 gr/mol yang mana masih tergolong rendah [9].

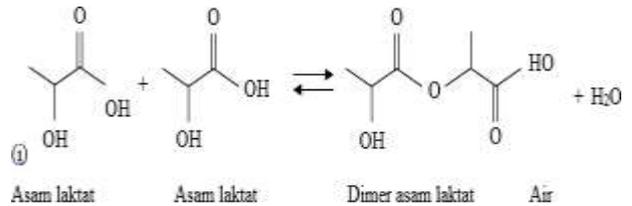
G. Proses Polimerisasi Chain Extension Polymerization

Proses *chain extension* terdiri dari dua tahap, *polycondensation* dan *chain extension*. Proses ini dapat memperpanjang rantai polimer dengan cepat tanpa proses pemisahan untuk pemurniannya dengan bantuan *chain extender*. *Chain extender* umumnya merupakan bahan kimia *bifunctional* dengan berat molekul rendah. Agen ekstensi yang digunakan pada umumnya adalah diisosiyanida karena *agent* ini merupakan yang terbaik untuk menghasilkan rantai polimer yang panjang.

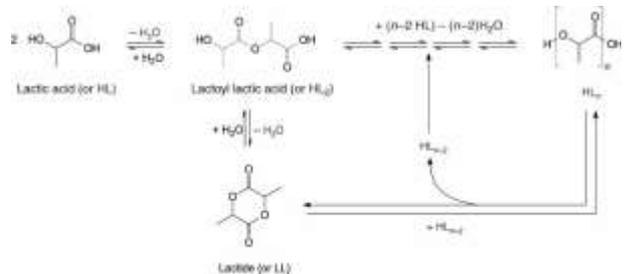
Asam laktat dipolimerisasi melalui *polycondensation* menjadi *prepolymer* yaitu polimer berberat molekul rendah (oligomer) yang mengandung hanya satu jenis gugus ujung. Kemudian berat molekul dinaikkan dengan menyambung rantai polimer menggunakan *chain extender* [10].

H. Proses Polimerisasi Enzymatic Polymerization

Enzymatic polymerization hadir sebagai alternatif yang ramah lingkungan. Proses ini mudah dikontrol, namun penelitian tentang metode ini masih sedikit. Salah satu jurnal berhasil mensintesis PLA menggunakan cairan ionik (1-ethyl-3ethylimidazoliumhexafluorophosphate) yang dimeditasi oleh enzim lipase B. Yield PLLA tertinggi adalah 63% diperoleh pada suhu 90°C dengan berat molekul mencapai 37,8×103 g/mol.



(ii) $L_nA + L_mA \rightleftharpoons L_{n+m}A + H_2O$
 Gambar 2. Reaksi *direct polymerization*.



Gambar 3. Reaksi *polycondensation* pada kesetimbangan.

I. Proses Polimerisasi Ring Opening Polymerization

Berbeda dengan *direct polycondensation*, *ring opening polymerization* tidak memerlukan *chain extension* untuk mendapatkan PLA berberat molekul tinggi. Proses polimerisasi terjadi dengan membuka cincin dimer asam laktat siklik (*lactide*) dengan bantuan katalis. Karena *lactide* adalah ester siklik, yang mana cincinnya dapat dibuka dengan serangan *nucleophilic* pada ikatan ester untuk memulai polimerisasi. Inisiator yang cocok (*nucleophiles*) adalah air dan alkohol, termasuk gugus hidroksil dari asam laktat sendiri. Satu rantai ester dari cincin *lactide* dibelah oleh reaksi gugus OH pada gugusan R-OH inisiator, membentuk ester baru dengan gugus ujung R-O-C(O)- dan gugus ujung OH. Setiap molekul inisiasi berikatan kovalen dengan gugus ujung dari setiap rantai polimer. Reaksi yang terjadi seperti pada Gambar 1.

Metode ini terdiri dari tiga tahap: *polycondensation* yaitu pembentukan oligomer asam laktat berberat molekul rendah (*prepolymer*), *depolymerization* yaitu pembentukan dimer siklik (*lactide*), dan *ring opening polymerization* yaitu pembentukan PLA berberat molekul tinggi [11].

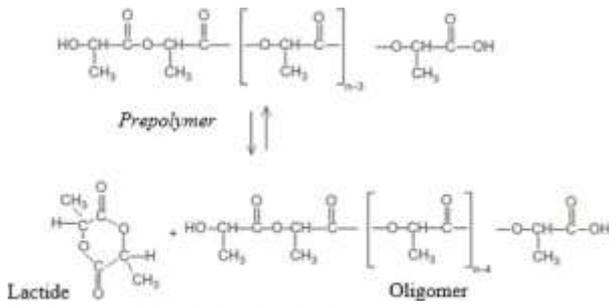
J. Seleksi Proses

Berdasarkan uraian dan data-data yang telah dijelaskan di atas maka didapatkan perbandingan dalam seleksi proses pada Tabel 5.

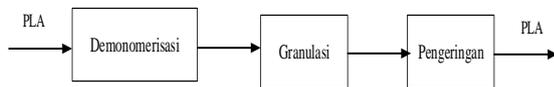
Berdasarkan pertimbangan pada Tabel 5, maka dipilih proses pembuatan asam laktat dengan cara fermentasi, pemurnian asam laktat dengan proses esterifikasi, dan proses polimerisasi menggunakan *ring opening polymerization* dengan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP).

III. URAIAN PROSESTERPILIH

Proses produksi *Poly Lactic Acid* (PLA) terbagi menjadi beberapa tahapan proses, yaitu tahap persiapan, tahap fermentasi, tahap purifikasi, tahap polimerisasi dan tahap akhir. Diagram blok proses pembuatan PLA dari porang tertera pada Gambar 2.



Gambar 6. Reaksi pada depolimerisasi.



Gambar 7. Tahap akhir pembuatan PLA.

A. Tahap Persiapan

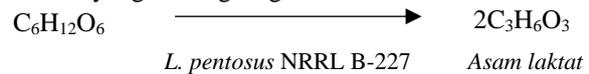
Pada produksi asam laktat dengan proses fermentasi digunakan bahan baku porang (*Amorphophallus muelleri*). Porang akan diolah menjadi tepung porang. Umbi porang segar dikupas menggunakan mesin pengupas untuk memisahkan kulit porang dengan dagingnya. Kemudian daging umbi masuk ke rotary drum washer untuk membersihkan kotoran-kotoran umbi porang. Selanjutnya dimasukkan ke chipper untuk dipotong dengan ketebalan (0,5-1 cm). Chip porang dicuci dan direndam dengan etanol 50% dengan penambahan natrium bisulfit NaHSO₃ 2% selama 4 jam dalam tangka berpengaduk. Pencucian tepung porang dengan etanol 50% dan NaHSO₃ 2% dapat meningkatkan kadar glukomanan dimana etanol akan melarutkan senyawa-senyawa selain glukomanan karena etanol memiliki kepolaran yang tinggi [12]. Chip umbi masuk ke rotary drum washer II untuk menghilangkan etanol dan natrium bisulfit yang menempel pada chip porang. Selanjutnya chip porang dikeringkan dalam tunnel dryer untuk dikeringkan pada suhu 50°C dan tekanan atmosferik. Umbi kering dihaluskan dengan hammer mill sehingga diperoleh tepung porang dengan ukuran 80-120 mesh. Pada ukuran 80-120 mesh kadar glukomanan akan naik pada kecepatan putar sedang (17450 rpm) [13]. Lalu tepung porang diencerkan dalam dilution tank sebelum masuk fermentor. Selanjutnya larutan encer dipompa menuju *culture tank* dan fermentor melewati tangki berpengaduk dimana pH larutan dikondisikan menjadi 7,6 agar fermentasi dapat berjalan optimum dengan penambahan Ca(OH)₂.

Larutan keluar tangki berpengaduk displit menuju *culture tank* dan *fermentor*. Bakteri yang digunakan dalam proses fermentasi adalah *Lactobacillus pentosus* NRRL B-227. Bakteri asam laktat ini digunakan karena merupakan bakteri heterofermentatif dengan L-lactic acid dan D-lactic acid sebagai hasil fermentasi dari substrat mannosida dan glukosa. Bakteri dibiakkan dalam *culture tank* dengan media larutan porang dengan fermentable sugar selama 72 jam pada suhu 32°C. Bakteri yang telah dibiakkan selanjutnya diumpangkan menuju fermentor [14].

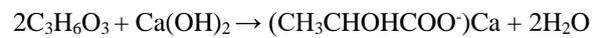
B. Tahap Fermentasi

Proses fermentasi dilakukan dalam fermentor berpengaduk yang bekerja secara *batch*. Media yang digunakan pada proses fermentasi mengandung tepung porang dengan fermentable sugar 101 g/L dan nutrient berupa *yeast extract*.

Fermentasi berlangsung pada suhu 32°C selama 72 jam dalam pH 7,6 [15]. Selama proses fermentasi berlangsung, pH dijaga dengan menambahkan *buffering agent* Ca(OH)₂. Reaksi yang berlangsung di fermentor:



Netralisasi dengan menggunakan kalsium hidroksida



Dari proses fermentasi ini, akan terbentuk garam laktat (CH₃CHOHCOO)₂Ca dan selanjutnya akan mengalami proses purifikasi.

C. Tahap Purifikasi

Produk hasil fermentasi sebagian besar berupa air dan kalsium laktat hasil netralisasi asam laktat dengan larutan kapur Ca(OH)₂ dipompa menuju tangki asidifikasi. Di dalam tangki asidifikasi kalsium laktat dikonversi menjadi asam laktat dengan penambahan asam kuat H₂SO₄ dengan reaksinya sebagai berikut [8].



Reaksi antara kalsium laktat dan asam sulfat membentuk asam laktat dan endapan CaSO₄ yang kemudian dipisahkan dalam *centrifuge*. Perbedaan densitas antara larutan dengan endapan CaSO₄ menyebabkan larutan terlempar keluar dan endapan CaSO₄ turun ketika dilakukan pemutaran secara cepat dalam *centrifuge*. Larutan yang telah terpisah dari CaSO₄ kemudian diumpangkan ke dalam evaporator untuk dipekatkan sebelum mengalami proses pemurnian lebih lanjut dalam kolom distilasi.

Evaporator yang digunakan adalah *triple-effect evaporator* untuk menghemat penggunaan *steam*. Pada suhu di atas 90°C asam laktat akan mulai terpolimerisasi sehingga peralatan non-reaktor dijaga suhunya kurang dari 90°C. Evaporator bekerja dalam keadaan vakum untuk menjaga titik didih larutan tidak lebih dari 90°C. Larutan keluar evaporator memiliki konsentrasi 30%.

Larutan asam laktat 30% dari evaporator diumpangkan ke dalam kolom distilasi reaktif. Sebelum diumpangkan ke dalam kolom distilasi, larutan asam laktat dicampur dengan metanol sebagai reaktan dalam tangki berpengaduk kemudian dipanaskan dalam *heater* hingga suhu mencapai 99°C. Suhu tersebut merupakan suhu optimum reaksi pembentukan ester laktat. Di dalam kolom distilasi terjadi reaksi sekaligus pemisahan produk. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



Reaksi yang terjadi merupakan reaksi bolak-balik sehingga pemisahan produk secara terus menerus dapat mendorong reaksi ke arah pembentukan produk sehingga konversi reaksi dapat mencapai 100%. Pemisahan produk dilakukan dengan memanfaatkan titik didih metil laktat yang rendah, sehingga sebagian besar metil laktat teruapkan menjadi *top product* kolom sedangkan komponen lain yang kurang volatil turun menjadi *bottom product* dan dibuang sebagai *waste*. Vapor metil laktat kemudian dikondensasi dalam kondensor dan

ditampung dalam *reflux drum*. Sebagian kecil metil laktat *direflux* menuju kolom distilasi.

Larutan metil laktat yang masih mengandung banyak air kemudian diumpankan menuju kolom distilasi reaktif II untuk dikonversi menjadi asam laktat melalui reaksi hidrolisis sekaligus dipisahkan dari air sebagai *by-product*. Larutan metil laktat terlebih dahulu dipanaskan dalam *heater* hingga suhu mencapai 150°C untuk mendorong terjadinya reaksi hidrolisis sebagai berikut:



Metanol dan sisa air yang terbentuk langsung terpisahkan menuju *top product* sedangkan asam laktat menuju *bottom product*. Asam laktat yang terbentuk dalam *bottom product* memiliki konsentrasi mencapai 99% yang siap untuk dipolimerisasi.

D. Tahap Polimerisasi

Larutan asam laktat pekat 99% dari kolom distilasi II kemudian dipompa menuju reaktor *prepolymer* yang merupakan reaktor berpengaduk. Di dalam reaktor terjadi reaksi *polycondensation* pembentukan polimer asam laktat dengan berat molekul rendah (*prepolymer*) dan air dengan bantuan katalis SnCl_2 . Molekul asam laktat memiliki dua ujung dengan gugus yang berbeda yaitu gugus hidroksil dan gugus fungsi asam yang mana dapat mengakibatkan terjadinya reaksi esterifikasi intermolekuler dan intramolekuler. Gugus alkoksi asam laktat bereaksi dengan hidrogen yang terpecah dari gugus hidroksil asam laktat terdekat membentuk rantai polimer. Gambar 3 menunjukkan diagram alir proses polimerisasi.

Pada saat yang sama, terjadi pula pembentukan dimer siklik (*lactide*) namun dalam jumlah yang kecil dengan derajat polimerisasi 2. *Lactide* dapat terbentuk karena reaksi transesterifikasi intramolekular dari *lactoyl lactic acid* atau karena degradasi oligomer. Karena kesetimbangan reaksi yang kuat, menyebabkan rantai polimer yang terbentuk tidak terlalu panjang sehingga menghasilkan berat molekul yang rendah berkisar antara 400 hingga 2500. Penghilangan air yang terbentuk sangat penting untuk menggeser reaksi cenderung ke arah pembentukan oligomer. Reaksi *direct polymerization* tertera pada Gambar 4.

Produk yang terbentuk terdiri dari monomer asam laktat, *prepolymer*, oligomer, dan *lactide* dalam keadaan lelehan viskos (*melt*) kemudian diumpankan ke dalam reaktor depolimerisasi. Dalam proses ini terjadi reaksi transesterifikasi intramolekuler disebut juga dengan '*backbiting*'. Prepolimer berada dalam kesetimbangan dengan dimer siklik (*lactide*) [9]. Gambar 5 menunjukkan reaksi *polycondensation* pada kesetimbangan.

Dengan mengatur tekanan dan suhu dalam reaktor depolimerisasi, maka *lactide* dapat dibentuk secara kontinyu dan teruapkan. Penguapan *lactide* dalam reaktor dapat menggerakkan reaksi depolimerisasi ke arah kanan untuk menghasilkan *net lactide* sewaktu reaktor mencari kesetimbangan. Reaktor prepolimerisasi dapat berupa *falling film evaporator* karena dapat memaksimalkan *surface area* antara *liquid* and *vapor* sehingga *liquid lactide* dapat lebih mudah teruapkan. Hal ini dapat mempercepat penghilangan *lactide* yang terbentuk, akibatnya akan mendorong terjadinya reaksi. Secara umum, *falling film evaporator* memiliki waktu

hold-up yang relatif kecil dan memiliki koefisien transfer panas yang tinggi, keduanya akan menurunkan reaksi degenerasi yang terjadi selama produksi *lactide*. *Prepolymer* diumpankan ke *evaporator* dari atas, dengan suhu operasi 210°C dan tekanan vakum antara 2-60 mmHg selama 2,5– 10 menit. Ketebalan film yang digunakan berkisar antara 0,5 – 15 mm, tipis sehingga molekul *lactide* dapat teruapkan dalam waktu singkat.

Di dalam *tube* terjadi transfer panas serta reaksi depolimerisasi. Produk keluar dari bawah dimana *vapor* mengandung *lactide* keluar dari system. Reaktan dalam jumlah kecil yang tidak bereaksi serta *by-product* yang kurang volatil tertinggal di bagian bawah reaktor dan kemudian *dipurge*. Aliran *vapor* yang keluar dari reaktor depolimerisasi sebagian besar terdiri dari *lactide*. Sebagian kecil air, asam laktat, dan oligomer ikut teruapkan bersama uap *lactide*. Sebuah kondensor parsial dihubungkan dengan reaktor depolimerisasi yang mana akan mengkonsdensasi sebagian *vapor*. Sebagian besar *lactide* keluar dari sistem, sedangkan air dan asam laktat tidak tetap dalam keadaan *vapor* dan diumpankan ke proses selanjutnya. *Lactide* yang terbentuk terdiri dari tiga stereoisomer bentuk, yaitu *L-lactide* dan *D-lactide*.

Selama polimerisasi pembukaan cincin, berat molekul dapat tercapai bergantung pada kemurnian *lactide*. Gugus hidroksil asam laktat dan oligomer yang ada merupakan pengotor. Semakin besar kandungan pengotor tersebut maka semakin rendah berat molekul yang dapat dicapai dalam proses polimerisasi. Konsentrasi gugus hidroksil yang keluar dari proses depolimerisasi masih terlalu besar maka harus dipisahkan terlebih dahulu melalui proses distilasi. Umpun *vapor lactide* dialirkan menuju kolom distilasi.

Umpun *vapor lactide* dialirkan menuju kolom distilasi *lactide*. Pengotor keluar sebagai *top product* sedangkan *L-lactide* keluar sebagai *bottom product* dengan konsentrasi *L-lactide* 99,7%. Fraksi *L-lactide* diumpankan ke dalam reaktor polimerisasi dengan kehadiran katalis $\text{Sn}(\text{Oct})_2$. Katalis ini akan menginisiasi pembukaan cincin dengan menyerang rantai rangkap (*double bond*) oksigen *lactide* terdekat. Material hidroksil dan *nucleophilic* beraksi secara simultan dengan radikal yang cincinnya terbuka akhirnya membentuk molekul air sebagai *by-product*. Reaksi pada demonomerisasi tertera pada Gambar 6.

Katalis $\text{Sn}(\text{Oct})_2$ bekerja dengan mekanisme *coordination-insertion*. Pembentukan radikal bebas oleh katalis terhadap gugus fungsinya mempercepat propagasi rantai reaksi, mengakibatkan pembentukan *high molecular weight* PLA. Reaktor ini berupa reaktor berpengaduk dengan konversi maksimal monomer adalah 95%. PLA yang keluar reaktor dalam keadaan leleh dengan viskositas sebesar 10000 Pa.s.

E. Tahap Akhir

PLLA yang keluar reaktor masih mengandung 2,5% monomer *lactide*. Untuk menghasilkan produk PLA yang stabil, maka kandungan monomer tersebut harus direduksi menjadi 1% dengan melakukan proses demonomerisasi. Sebelum masuk proses demonomerisasi, katalis dalam PLA dideaktivasi dengan penambahan asam fosfat. Selain itu, ditambahkan *stabilizer* berupa α -topolone untuk mencegah polimer mengalami degradasi selama proses demonomerisasi. Pecampuran dilakukan dalam *static mixer*

dengan waktu tinggal 3-10 menit. Setelah itu, campuran masuk ke dalam *extruder* yang dioperasikan dalam keadaan vakum untuk proses demonomerisasi. Proses demonomerisasi dilakukan untuk menghilangkan kandungan monomer dalam PLA dengan prinsip *degassing*. PLA keluar dari *extruder* memiliki kadar monomer 0,05%.

Proses granulasi dilakukan dalam *underwater granulation* yang tergabung dalam serangkaian alat *extruder*. Proses ini akan mengubah *melt* menjadi granul-granul berbentuk resin dengan ukuran 3 mm. Granul yang terbentuk diumpukan ke dalam *rotary dryer* untuk dikeringkan. Produk resin PLA yang telah kering kemudian disimpan dalam *storage* dengan bantuan *bucket elevator*. Tahap akhir pembuatan PLA tertera pada Gambar 7.

IV. ANALISA EKONOMI

Dengan desain umur pabrik selama 10 tahun, didapatkan *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar 14,50% yang dimana nilainya lebih besar dari bunga pinjaman bank sebesar 8,00%. Kemudian didapatkan *Pay Out Time* (POT) sebesar 8,08 tahun dan *Break Even Point* (BEP) sebesar 35,6%.

V. KESIMPULAN

Dari hasil yang telah diuraikan pada bab-bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan sebagai berikut

1. Perencanaan Operasi : kontinyu, 24 jam/hari, 330 hari
2. Kapasitas Produksi : 10.000 ton/tahun
3. Bahan Baku

Umbi porang	: 44.333,177 ton/tahun
NaHSO ₃ 2%	: 404,165 ton/tahun
Etanol 50%	: 6.465,277 ton/tahun
Nutrient	: 19,813 ton/tahun
CaO	: 4.821,540 ton/tahun
H ₂ SO ₄	: 8.437,696 ton/tahun
Metanol	: 6.542,578 ton/tahun
SnCl ₂	: 15,013 ton/tahun
Sn(Oct) ₂	: 6,278 ton/tahun
4. Produk PLA : 10.016,3778 ton/tahun
5. Umur Pabrik : 10 tahun
6. Masa Konstruksi : 2 tahun
7. Analisa Ekonomi:
 - a. Pembiayaan
 1. Modal Tetap (FCI) : Rp811.564.495.046
 2. Modal Kerja (WCI) : Rp90.173.832.783
 3. Investasi Total (TCI) : Rp901.738.327.828
 4. Biaya Produksi Total: Rp744.274.654.948
 - b. Penerimaan
 1. Hasil Penjualan : Rp 1.079.104.640.420,28
 - c. Rehabilitasi Perusahaan
 1. Laju Pengembalian Modal (IRR) : 14,5%

2. Waktu Pengembalian Modal (POT) : 8,08 tahun

3. *Break Even Point* (BEP) : 35,6%

Dari hasil uraian diatas, dari segi teknis dan ekonomis terlihat bahwa IRR sebesar 14,5% berada di atas bunga pinjaman bank sebesar 8%. Jangka waktu pengembalian modal (POT) selama 8,08 tahun, lebih kecil dari waktu pengembalian modal yang ditetapkan pemberi pinjaman yaitu 10 tahun. Berdasarkan kondisi seperti ini, pabrik *poly lactic acid* (PLA) dari porang ini layak untuk didirikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Zhang and B. Jin, "L(+)-lactic acid production using sugarcane molasses and waste potato starch: An alternative approach," *Int. Sugar J.*, vol. 112, no. 1333, p. 17, 2010.
- [2] M. Avella, A. Buzarovska, M. E. Errico, G. Gentile, and A. Grozdanov, "Eco-challenges of bio-based polymer composites, materials," *Materials (Basel)*, vol. 2, no. 3, pp. 911–925, 2009.
- [3] S. M. Tari, Y. Darni, and H. Utami, "Pemanfaatan Agar-Agar *Gracilaria coronopifolia* dan Kitosan Untuk Pembuatan Plastik Biodegradabel dengan Gliserol sebagai Plasticizer," in *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi-II*, 2008, pp. 29–40.
- [4] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, and R. E. West, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [5] N. Narayanan, P. K. Roychoudhury, and A. Srivastava, "L (+) lactic acid fermentation and its product polymerization," *Electron. J. Biotechnol.*, vol. 7, no. 2, pp. 167–178, 2004.
- [6] R. Datta and M. Henry, "Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies—a review," *J. Chem. Technol. & Biotechnol. Int. Res. Process. Environ. & Clean Technol.*, vol. 81, no. 7, pp. 1119–1129, 2006.
- [7] Y.-J. Wee, J.-N. Kim, and H.-W. Ryu, "Biotechnological production of lactic acid and its recent applications," *Food Technol. Biotechnol.*, vol. 44, no. 2, pp. 163–172, 2006.
- [8] A. Vaidya, R. Pandey, S. Mudliar, M. S. Kumar, T. Chakrabarti, and S. Devotta, "Production and recovery of lactic acid for polylactide – An overview," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 5, pp. 429–467, 2005.
- [9] R. Mehta, V. Kumar, H. Bhunia, and S. Upadhyay, "Synthesis and production of poly(lactic acid)," *J. Macromol. Sci. Part C Polym. Rev.*, vol. 45, no. 4, pp. 325–349, 2005.
- [10] Y. Qin, "Alginate fibers: An overview of the production processes and applications in wound management," *Polym. international*, vol. 57, no. 2, pp. 171–180, 2008.
- [11] G. Brown, *Unit Operations*. Tokyo: Charles E Turtle.Co, 1973.
- [12] S. B. Widjanarko, A. Sutrisno, and A. Faridah, "Efek hidrogen Peroksida terhadap sifat fisiko-kimia tepung porang (*amorphophallus oncophyllus*) dengan metode maserasi dan ultrasonik," *J. Teknol. Pertan.*, vol. 12, no. 3, pp. 143–152, 2011.
- [13] M. Rosalina and S. B. T. Cahyani, "Pengaruh Kecepatan Putar Dan Waktu pada Proses Penepungan Terhadap Kualitas Tepung Glukomanan dari Umbi Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) dengan Menggunakan Proses Fisik," Departemen Teknik Kimia: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [14] J. Monteagudo, L. Rodriguez, J. Rincon, and J. Fuertes, "Optimization of the conditions of the fermentation of beet molasses to lactic acid by *Lactobacillus delbrueckii*," *Acta Biotechnol.*, vol. 14, no. 3, pp. 251–260, 1994.
- [15] T. A. McCaskey, S. D. Zhou, S. N. Britt, and R. Strickland, "Bioconversion of municipal solid waste to lactic acid by *Lactobacillus species*," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 45, no. 1, pp. 555–568, 1994.