

Pra Desain Pabrik *Poly-L-Lactic Acid* (PLLA) dari Tetes Tebu

Eriska Wahyu Kusuma, Ayu Larasati, Siti Nurkhamidah, dan Ali Altway
Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
e-mail: dst_eureka@yahoo.co.uk; alimohad@chem-eng.its.ac.id

Abstrak—*Poly-L-Lactic Acid* atau disingkat PLLA merupakan termoplastik *biodegradable* turunan dari sumber daya terbarukan. Kebutuhan dunia akan plastik yang terus meningkat seiring dengan meningkatnya pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh plastik. Hal ini membuat PLLA menjadi alternatif pengganti plastik *petroleum-based* untuk mengurangi pencemaran lingkungan. Untuk memenuhi kebutuhan bioplastik dalam negeri dan adanya peluang ekspor yang masih terbuka, maka dirancang pabrik PLLA dengan kapasitas 20.000 ton/tahun dengan memanfaatkan limbah tetes tebu yang dihasilkan oleh pabrik gula sebagai bahan baku. Pabrik direncanakan berdiri pada tahun 2020 di Lampung Tengah, Sumatera Selatan. Proses pembuatan PLLA dilakukan melalui tiga tahap, yakni proses produksi asam laktat, pemurnian asam laktat, dan polimerisasi asam laktat. Tahap produksi asam laktat dilakukan dengan proses fermentasi dengan menggunakan bakteri *Lactobacillus delbrueckii subsp. delbrueckii* selama 26 jam pada kondisi 42°C, tekanan atmosfer, dan pH 6,9. Tahap pemurnian dilakukan hingga asam laktat mencapai kemurnian 99% dalam kolom distilasi reaktif. Tahap polimerisasi asam laktat dilakukan dengan metode *ring-opening-polymerization*. Untuk mendirikan pabrik PLLA dari limbah tetes tebu ini diperlukan modal tetap (FCI) sebesar Rp 926.811.877.912,00 dan modal kerja (WCI) sebesar 92.681.187.791,00. Dari perhitungan analisa ekonomi didapatkan nilai *Pay Out Time* (POT) 5,13 tahun dengan *Break Event Point* (BEP) sebesar 45,6% dan *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar 13,19%.

Kata Kunci—Asam Laktat, PLLA, *Renewable Resource*, *Ring Opening Polymerization*, *Thermoplastic Biodegradable*.

I. PENDAHULUAN

Kesadaran penduduk dunia pada lingkungan semakin meningkat seiring meningkatnya masalah lingkungan yang timbul akibat kegiatan manusia sehari-hari. Salah satu sumber indikator tersebut adalah meningkatnya jumlah produk bioplastik dari tahun ke tahun. Data dari Badan Pusat Statistik (BPS) menyebutkan bahwa produksi bioplastik diproyeksikan akan mencapai 1.200.000 ton atau 1/10 dari total produksi bahan plastik pada tahun 2010. Jumlah ini meningkat seribu kali lipat dari produksi bioplastik pada tahun 1999, yaitu 2.500 ton atau 1/10.000 kali dari produksi bahan plastik

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi menghasilkan bahan-bahan plastik yang bersifat *biodegradable* seperti kolagen, kasein, protein dan lipida yang berasal dari hewan dan tumbuhan. Akan tetapi, bahan yang paling potensial adalah plastik yang berbahan *Polylactic acid*. *Polylactic acid* (PLA) merupakan termoplastik *biodegradable* yang berasal dari sumber daya terbarukan. PLA dibentuk melalui proses polimerisasi asam

Tabel 1.
Komposisi tetes tebu

Komponen	Persentase (%)
Air	20
Sukrosa	32
Glukosa	14
Fruktosa	16
<i>Nitrogenous material</i>	10
SiO ₂	0,5
K ₂ O	3,5
CaO	1,5
MgO	0,1
P ₂ O ₅	0,2
Na ₂ O	0,2
<i>Impurities</i>	2

laktat, yang mana asam laktat dapat dibuat melalui proses fermentasi gula [1].

Tebu merupakan bahan baku utama untuk proses produksi gula. Kebutuhan gula di Indonesia cukup tinggi, sehingga banyak pabrik gula yang tersebar di Indonesia guna mencukupi kebutuhan tersebut. Dalam operasionalnya, pabrik gula juga menghasilkan produk samping yaitu tetes tebu (*molasses*). Tetes tebu diperoleh dari hasil pemisahan sirup *low grade* dimana gula dalam sirup tersebut tidak dapat dikristalkan kembali. Pada proses produksi, tetes tebu yang dihasilkan sekitar 5-6% dari *feed* tebu. Tetes tebu biasanya dimanfaatkan sebagai bahan baku pada industri fermentasi seperti bioetanol, alkohol, *monosodium glutamate*, asam laktat, dan lainnya. Tetes tebu merupakan hasil samping industri gula yang mengandung senyawa nitrogen, unsur mikro, dan kandungan gula yang cukup tinggi sehingga sangat cocok menjadi sumber karbon untuk fermentasi asam laktat [2].

II. BASIS DESAIN DATA

A. Kapasitas Produksi

Nilai perdagangan plastik *biodegradable* global meningkat seiring dengan peraturan-peraturan terhadap penggunaan plastik konvensional. Tabel 2 menjelaskan estimasi produksi dan konsumsi PLA Global pada tahun 2020 :

Dalam upaya mengurangi kebutuhan impor PLA di Indonesia sebesar 100% serta turut memenuhi 2% kebutuhan global, ditetapkan kapasitas pabrik PLLA dari tetes tebu sebesar 20.000 ton/tahun.

Tabel 2.
Estimasi produksi dan konsumsi PLA Global tahun 2020

Tahun	Produksi (kiloton/tahun)	Konsumsi (kiloton/tahun)
2020	1009	1048

Tabel 3.
Perbandingan proses produksi asam laktat]

Tipe Proses	Kelebihan	Kekurangan
Sintesis Kimia	<ul style="list-style-type: none"> Membutuhkan suhu operasi yang lebih rendah 	<ul style="list-style-type: none"> Membutuhkan suhu operasi yang lebih rendah Asam laktat yang dihasilkan kemurniannya medium Membutuhkan biaya yang besar
Fermentasi	<ul style="list-style-type: none"> Bahan baku terbaru dan murah Menghasilkan asam laktat dengan kemurnian yang tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> Membutuhkan <i>maintenance</i> yang cukup rumit untuk bakteri yang akan digunakan

Tabel 4.
Bakteri asam laktat dan spesifikasinya

Bakteri	Spesifikasi
<i>Lactobacillus delbrueckii subsp. Delbrueckii</i>	<ul style="list-style-type: none"> Digunakan pada substrat yang mengandung banyak sukrosa seperti tetes tebu. Bakteri homofermentatif
<i>Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus</i>	<ul style="list-style-type: none"> Digunakan pada substrat yang mengandung banyak laktosa seperti pada <i>dairy products</i>. Bakteri homofermentatif
<i>Lactobacillus amylophilus</i>	<ul style="list-style-type: none"> Digunakan pada substrat yang berasal dari pati seperti jagung, kentang, dan singkong Bakteri homofermentatif
<i>Lactobacillus plantarum</i>	<ul style="list-style-type: none"> Digunakan pada substrat yang mengandung banyak glukosa Bakteri heterofermentatif sehingga terdapat produk samping berupa CO₂ dan ethanol.

B. Lokasi Pabrik

Letak dari suatu pabrik mempunyai pengaruh besar terhadap kelangsungan atau keberhasilan pabrik tersebut. Lokasi pabrik yang tepat, ekonomis dan menguntungkan, harga produk yang semurah mungkin dengan keuntungan yang sebesar mungkin. Idealnya lokasi yang akan dipilih harus dapat memberikan keuntungan jangka panjang baik untuk perusahaan maupun warga sekitar, serta dapat memberikan kemungkinan untuk memperluas atau menambah kapasitas pabrik tersebut.

Pada pemilihan lokasi pendirian pabrik *Polylactic Acid* dari tetes tebu ini, telah dilakukan beberapa pertimbangan yang diantaranya sebagai berikut:

1. Ketersediaan Bahan Baku
2. Lokasi Pemasaran
3. Sumber Energi Listrik dan Air

Tabel 5.
Perbandingan tipe proses pemurnian asam laktat

Tipe Proses	Kelebihan	Kekurangan
Presipitasi garam kation dengan asam kuat	<ul style="list-style-type: none"> Proses yang digunakan sederhana 	<ul style="list-style-type: none"> Tingkat kemurnian yang dihasilkan medium (80-85%)
Esterifikasi-hidrolisis	<ul style="list-style-type: none"> Tingkat kemurnian tinggi (85-95%) Efisien karena hanya membutuhkan satu jenis alat 	<ul style="list-style-type: none"> Membutuhkan biaya utilitas yang cukup tinggi.
Proses pemisahan dengan membran dan elektrodialisis	<ul style="list-style-type: none"> Tingkat kemurnian yang dihasilkan tinggi (90-95%) 	<ul style="list-style-type: none"> Membutuhkan biaya yang sangat tinggi. Proses purifikasi yang diperlukan rumit <i>Maintenance</i> yang cukup rumit untuk membran.

4. Sumber Tenaga Kerja
5. Aksesabilitas dan Fasilitas Transportasi
6. Hukum dan Peraturan
7. Iklim dan Topografi

Berdasarkan pertimbangan dari beberapa faktor diatas, lokasi pabrik PLLA dari tetes tebu ini akan dibangun di Lampung Tengah, Sumatera Selatan.

C. Seleksi Proses

Bahan baku pembuatan PLLA ini adalah tetes tebu yang kemudian melewati tiga tahapan proses, yaitu produksi asam laktat, pemurnian asam laktat, dan polimerisasi asam laktat.

a. Produksi Asam Laktat

Proses produksi asam laktat dapat dilakukan dengan proses sintesis kimia ataupun dengan proses fermentasi substrat. Tabel 3 menjelaskan perbandingan antara kedua proses ini.

Dari dua jenis proses produksi asam laktat yang ada, proses yang paling efektif digunakan adalah proses fermentasi karena bahan baku yang digunakan untuk proses fermentasi dapat diperbaharui dan murah, serta kemurnian asam laktat yang dihasilkan dengan proses fermentasi juga lebih tinggi.

Terdapat dua jenis bakteri yang terlibat dalam proses fermentasi asam laktat yaitu homofermentatif dan heterofermentatif [3]. Bakteri homofermentatif hanya menghasilkan asam laktat, sedangkan bakteri heterofermentatif menghasilkan asam laktat, ethanol, dan CO₂. Pada industri, umumnya yang digunakan adalah bakteri homofermentatif untuk mengurangi produk samping yang terbentuk [4].

Berdasarkan perbandingan spesifikasi bakteri pada table di atas, bakteri yang akan digunakan pada proses fermentasi asam laktat ini adalah *Lactobacillus delbrueckii subsp. delbrueckii* dengan pertimbangan jenis substrat dan jenis bakteri homofermentatif.

b. Pemurnian Asam Laktat

Untuk mendapatkan hasil yang baik, sebelum memasuki proses polimerisasi, asam laktat yang telah dihasilkan dari

Tabel 6.
Perbandingan tipe proses polimerisasi

Tipe Proses	Kelebihan	Kekurangan
Direct Polymerization	<ul style="list-style-type: none"> • One-step • Sederhana • Murah 	<ul style="list-style-type: none"> • Berat molekul produk rendah • Yield rendah • Optical purity rendah
Chain extension polymerization	<ul style="list-style-type: none"> • Two-step • Berat molekul produk tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> • Berbahaya bagi lingkungan • Tidak food grade maupun medical grade • Optical purity rendah
Enzymatic polymerization	<ul style="list-style-type: none"> • One-step • Ramah lingkungan • Berat molekul tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> • Teknologi yang belum dikembangkan • Yield rendah
Ring-opening polymerization	<ul style="list-style-type: none"> • Berat molekul produk tinggi • Food grade dan medical grade • Yield tinggi • Optical purity tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> • Multi-step • Membutuhkan kemurnian laktide yang tinggi sehingga menaikkan cost.

proses fermentasi perlu dimurnikan terlebih dahulu. Tabel 5 menjelaskan perbandingan proses pemurnian asam laktat yang pada umumnya digunakan.

Dari tiga macam jenis proses pemurnian asam laktat ini, proses yang akan digunakan adalah proses esterifikasi-hidrolisis. Hal ini dikarenakan proses tersebut dapat menghasilkan asam laktat dengan kemurnian yang tinggi. Selain itu proses purifikasi dengan esterifikasi-hidrolisis membutuhkan alat yang lebih sedikit dibandingkan dengan purifikasi dengan proses elektrodialisis.

c. Proses Polimerisasi Asam Laktat

Asam laktat yang telah dimurnikan, kemudian akan melalui proses polimerisasi. Tabel 6 menjelaskan perbandingan jenis proses polimerisasi asam laktat yang umumnya digunakan.

Dari keempat proses polimerisasi tersebut, yang akan digunakan adalah proses ring-opening polymerization karena dapat menghasilkan polimer dengan berat molekul tinggi tanpa menggunakan bahan yang beracun.

III. URAIAN PROSES

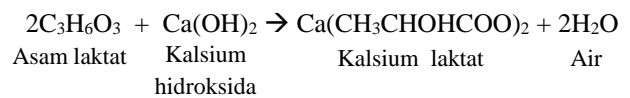
A. Tahap Produksi Asam Laktat

Pada produksi asam laktat digunakan bahan baku tetes tebu yang mengandung fermentable sugar, diantaranya sukrosa, glukosa, dan fruktosa. Sebelum digunakan untuk proses fermentasi, molasses terlebih dahulu diencerkan dalam Tangki pengenceran molasses sehingga konsentrasi fermentable sugar di dalamnya menjadi 60g/L. pH molasses

dikondisikan menjadi 6,9 agar fermentasi dapat berjalan optimum dengan penambahan HCl. Selanjutnya larutan molasses encer dipompa menuju culture tank dan fermentor tank.

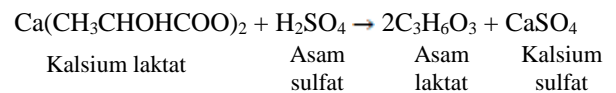
Larutan molasses encer ini kemudian displit menuju culture tank dan fermentor tank dengan perbandingan 1:10. Bakteri yang digunakan dalam proses fermentasi adalah Lactobacillus delbrueckii subsp. delbrueckii. Bakteri asam laktat ini digunakan untuk karena dapat memfermentasi sukrosa, glukosa, dan fruktosa sekaligus. Bakteri dibiakkan dalam culture tank dengan media mengandung fermentable sugar sebanyak 65 g/L dan 10 g/L yeast extract. Bakteri yang diinokulasikan ke dalam media culture tank sebanyak 0.0003 g/L dan kemudian dijaga pada suhu 42°C selama 15 jam. Bakteri yang telah dibiakkan selanjutnya diumpankan menuju fermentor tank [5].

Proses fermentasi dilakukan dalam fermentor tank berpengaduk yang bekerja secara batch. Media yang digunakan pada proses fermentasi mengandung molasses dengan fermentable sugar 65g/L dan 10 g/L yeast extract. Fermentasi berlangsung pada suhu 42°C selama 26 jam dalam pH 6,9. Selama proses fermentasi berlangsung, pH dijaga dengan menambahkan buffering agent Ca(OH)₂, sehingga terjadi reaksi sebagai berikut [6]:



B. Tahap Pemurnian Asam Laktat

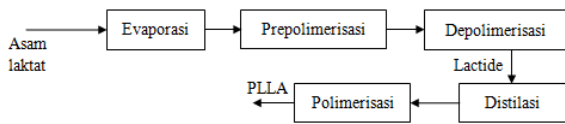
Produk fermentor tank sebagian besar berupa air dan kalsium laktat dipompa menuju tangki asidifikasi. Di dalam tangki asidifikasi, kalsium laktat dikonversi menjadi asam laktat dengan penambahan asam kuat H₂SO₄ dengan reaksi sebagai berikut:



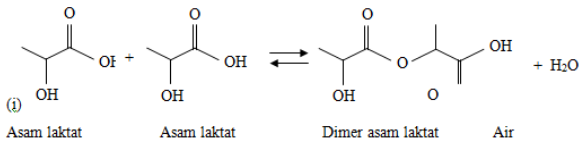
Reaksi antara kalsium laktat dan asam sulfat membentuk asam laktat dan endapan CaSO₄ yang kemudian dipisahkan dalam centrifuge. Perbedaan densitas antara larutan dengan endapan CaSO₄ menyebabkan larutan terlempat keluar dan endapan CaSO₄ turun ketika dilakukan pemutaran secara cepat dalam centrifuge.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

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%.

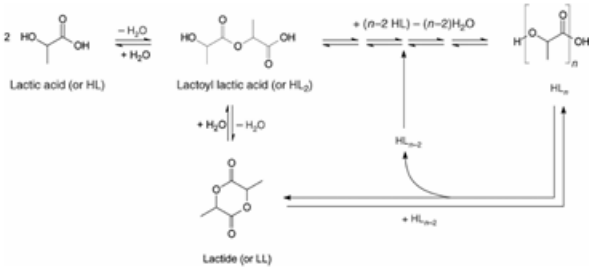
Larutan asam laktat 30% dari evaporator diumpankan ke dalam kolom distilasi reaktif. Sebelum diumpankan ke dalam kolom distilasi, larutan asam laktat dicampur dengan metanol sebagai reaktan dalam static mixer kemudian dipanaskan dalam heater hingga suhu mencapai 99°C. Suhu tersebut merupakan suhu optimum reaksi pembentukan ester laktat. Di dalam kolom distilasi terjadi reaksi sekaligus



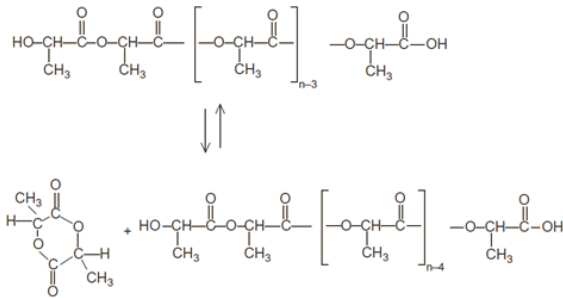
Gambar 1. Diagram alir proses polimerisasi



Gambar 2. Reaksi *direct polymerization*

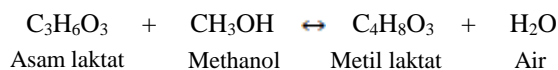


Gambar 3. Reaksi *polycondensation* pada kesetimbangan



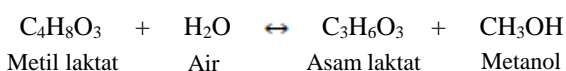
Gambar 4. Reaksi pada depolimerisasi

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 97°C untuk mendorong terjadinya reaksi hidrolisis sebagai berikut:



Methanol 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.

C. Tahap Polimerisasi Asam Laktat

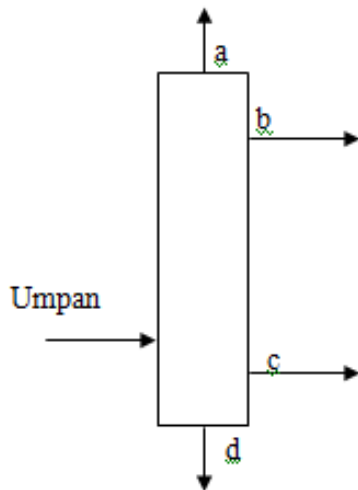
Larutan asam laktat pekat 99% dari kolom distilasi kemudian dipompa menuju reaktor *prepolymer* yang merupakan reaktor berpengaduk. Di dalam reaktor terjadi reaksi *polycondensation* pembentukan polimer asam laktat dengan berat molekul rendah (*prepolymer*) dan air dengan bantuan katalis SnCl_2 . Molekul 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 [7].

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 intramolekuler 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 [7].

Produk yang terbentuk terdiri dari monomer asam laktat, *prepolymer*, oligomer, dan *lactide* dalam keadaan lelehan viskus (*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*) [8].

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 prepolymerisasi 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 180-250°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 sistem [7].

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



Gambar 5. Sistem distilasi pemurnian lactide

teruapkan bersama uap lactide. Sebuah kondensor parsial dihubungkan dengan reaktor depolimerisasi yang mana akan mengkondensasi sebagian vapor. Sebagian besar lactide, dimer, dan oligomer terkondensasi dan 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*, *D-lactide*, dan *meso-lactide*.

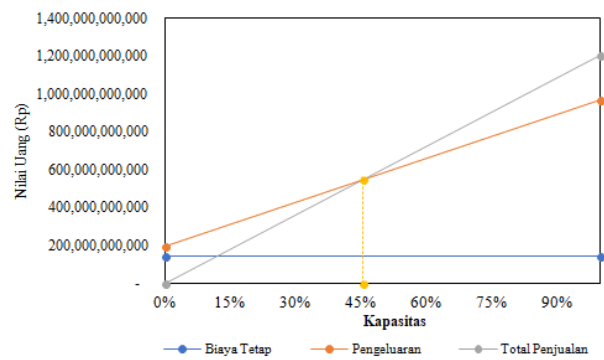
Selama polimerisasi pembukaan cincin, berat molekul dapat tercapai bergantung pada kemurnian lactide. Gugus hidroksil asam laktat dan oligomer yang ada merupakan pengotor. Semakin besar kandungan pengotor tersebut maka semakin rendah berat molekul yang dapat dicapai dalam proses polimerisasi. Konsentrasi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

Umpan vapor lactide yang masuk kolom distilasi terdiri dari *L-lactide* 96,73%, air 2,78%, dan sisanya berupa pengotor yang lebih volatile. Pengotor keluar sebagai top product sedangkan *L-lactide* dan *DL-lactide* keluar sebagai bottom product dengan konsentrasi *L-lactide* sebesar 99,7%

Fraksi *L-lactide* diumpankan ke dalam reaktor polimerisasi dengan kehadiran katalis Sn(Oct)₂ [9]. 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.

Katalis bekerja dengan mekanisme *coordination-insertion*. Pembentukan radikal bebas oleh katalis terhadap gugus fungsinya mempercepat propagasi rantai reaksi, mengakibatkan pembentukan *high molecular weight* PLA [7]. Reaktor ini berupa reaktor berpengaduk dengan konversi maksimal monomer adalah 95%. PLLA yang keluar reaktor dalam keadaan leleh dengan viskositas sebesar 10000 Pa.s.

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



Gambar 6. Break Event Point pada penelitian ini

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 PLLA dengan prinsip *degassing*. Monomer lactide yang terkandung di dalam lelehan PLLA akan menguap kemudian *directcycle* ke kolom distilasi. PLLA 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 15 mm. Granul keluar dari *extruder* dilewatkan *screen* untuk memisahkan ukuran granul yang kurang dari 15 mm. Granul yang kurang sesuai kemudian *directcycle* ke dalam *extruder* sedangkan yang ukurannya telah sesuai diumpankan ke dalam *rotary dryer* untuk dikeringkan. Produk resin PLLA yang telah kering kemudian disimpan dalam storage dengan bantuan *bucket elevator*.

IV. ANALISA EKONOMI

Analisa ekonomi dimaksudkan untuk dapat mengetahui apakah suatu pabrik yang direncanakan layak didirikan atau tidak. Pada pra desain pabrik PLLA dari tetes tebu ini dilakukan evaluasi atau studi kelayakan dan penilaian investasi. Parameter yang perlu ditinjau dalam analisa ekonomi antara lain:

- 1) Laju pengembalian modal (*Internal Rate of Return*)
- 2) Waktu pengembalian modal (*Pay Out Time*)
- 3) Titik impas (*Break Event Point*)

A. Laju Pengembalian Modal (*Internal Rate of Return/IRR*)

Pada pabrik PLLA dari tetes tebu ini memiliki laju bunga (harga i) sebesar 13,19%. Harga i yang diperoleh lebih besar dari harga I untuk bunga pinjaman yaitu 9,75% per tahun. Dengan harga i = 13,19% yang didapatkan dari perhitungan menunjukkan bahwa pabrik ini layak didirikan dengan kondisi tingkat bunga pinjaman 9,75% per tahun.

B. Waktu Pengembalian Modal (*Pay Out Time/POT*)

Pada pabrik PLLA dari tetes tebu ini waktu pengembalian modal minimum adalah 5,13 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa pabrik ini layak untuk didirikan karena

POT yang didapatkan 5,13 tahun lebih kecil dari perkiraan usia pabrik.

C. Titik Impas (Break Event Point/BEP)

Analisa titik impas digunakan untuk mengetahui besarnya kapasitas produksi dimana pabrik tidak laba atau rugi, artinya total penjualan sama dengan total ongkos produksi. Beberapa komponen yang merupakan komponen *total production cost* digunakan untuk mencari BEP, yang dinyatakan dalam pengeluaran tetap (FC), *variable cost* (VC) dan *semi variable cost* (SVC). Pada pabrik PLLA dari tetes tebu ini memiliki nilai BEP sebesar 45,6% pabrik PLLA dari tetes tebu ini waktu pengembalian modal minimum adalah 5,13 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa pabrik ini layak untuk didirikan karena POT yang didapatkan 5,13 tahun lebih kecil dari perkiraan usia pabrik.

V. KESIMPULAN

Setelah ditinjau dari aspek teknis dan ekonomi yang telah dilakukan, Pabrik *Poly-L-Lactic Acid* dari tetes tebu ini layak didirikan pada tahun 2020 dengan estimasi umur pabrik selama 10 tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W.J. Groot and T. Borén, "Life cycle assessment of the manufacture of lactide and PLA biopolymers from sugarcane in Thailand," *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 15, No. 9 (2010), 970–984. doi: 10.1007/s11367-010-0225-y.
- [2] L. Nurjannah, "Tetes Tebu Sebagai Alternatif Sumber Karbon untuk Produksi Asam Laktat oleh *Lactobacillus Delbrueckii* Subsp. *Bulgaricus*.", Undergraduate Thesis, Dept of Biochemistry, Institut Teknologi Pertanian, Bogor, Indonesia (2012)
- [3] A. N. Vaidya, R. A. Pandey, S. Mudliar, M. Suresh Kumar, T. Chakrabarti, and S. Devotta, "Production and recovery of lactic acid for polylactide - An overview," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 35, No. 5, (2005), 429–467. doi: 10.1080/10643380590966181.
- [4] H.W. Ryu, Y.J. Wee, and J.N. Kim, "Biotechnological production of lactic acid and its recent applications," *Food Technology and Biotechnology*, Vol. 44, No. 2 (2006), 163–172. doi: citeulike-article-id:7853424
- [5] J. M. Monteagudo, L. Rodríguez J. Rincón, and J. Fuertes, "Kinetics of Lactic Acid Fermentation by *Lactobacillus delbrueckii* Grown on Beet Molasses," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Vol. 68, No. 3 (1997), 271–276.
- [6] S.S. Patil, S.R. Kadam, K.B. Bastawde, J.M. Khire JM, D.V. Gokhale, "Production of lactic acid and fructose from media with cane sugar using mutant of *Lactobacillus delbrueckii* NCIM 2365," *Letters in Applied Microbiology*, Vol. 43, No. 1 (2006), 53–57. doi: 10.1111/j.1472-765X.2006.01907.x.
- [7] A. Colli, A.S. Awan, A. Lombardo, T.J. Echtermeyer, T.S. Kulmala, A.C. Ferrari, "Graphene-Based Mim Diode and Associated Methods," US Patent 9.202,945 B2, Dec 1st, (2017).
- [8] S.M. Davachi and B. Kaffashi, "Polylactic Acid in Medicine," *Journal Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 54 (2015), 37–41. doi: 10.1080/03602559.2014.979507.
- [9] Y. Yu, G. Storti, and M. Morbidelli, "Kinetics of ring-opening polymerization of 1,1-lactide," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 50, No. 13 (2011), 7927–7940. doi: 10.1021/ie200117n.

