PRARANCANGAN PABRIK γ-VALEROLACTONE (GVL) DARI LIMBAH PELEPAH PISANG KAPASITAS 45.000 TON PER TAHUN

David Permana Arshy[1], Mohammad Putra D.A.S.[1], Imam Wahyu Beny N.[1], Istiqomah Rahmawati[1], Gaguk Jatisukamto[1], Meta Fitri Rizkiana[1], Helda Wika Amini[1]

[1] Program Studi S-1 Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jember Jl. Kalimantan No.37, Jember Jawa Timur, 68121

*Corresponding Author: davidpermana652@gmail.com

Abstrak

Pabrik γ-Valerolactone (GVL) yang telah dirancang sebelumnya untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar terbarukan di Indonesia menggunakan limbah pelepah pisang sebagai bahan baku utama. GVL, senyawa turunan biomassa yang memiliki sifat stabil, toksisitas rendah, dan titik didih tinggi, memiliki potensi sebagai alternatif pengganti minyak bumi. Proses produksi meliputi pre-treatment, produksi asam levulinat, dan hidrogenasi dengan menggunakan katalis Ru√C. Pabrik ini berkapasitas 45.000 ton/tahun. Pabrik ini direncanakan berlokasi di Lampung Timur, dekat dengan sumber bahan baku dan akses utilitas yang strategis. Selain memenuhi 1,3% kebutuhan GVL nasional pada tahun 2029, proyek ini juga memberikan kontribusi bagi perekonomian lokal melalui penciptaan lapangan kerja. Analisis ekonomi menunjukkan kelayakan proyek dengan keuntungan sebesar $9.014.996,35, ROR 54,61%, POT 1,75 tahun, dan BEP 45,20%, sehingga merupakan langkah strategis dalam mendukung transisi energi terbarukan di Indonesia.

Kata kunci: γ-Valerolactone, limbah pelepah pisang, asam levulinat, hidrogenasi.

1. Pendahuluan

γ-Valerolactone (GVL) adalah turunan biomassa yang dapat digunakan sebagai sumber karbon terbarukan untuk produksi bahan bakar cair (Kholid, dkk., 2024). Produksi γ-Valerolactone (GVL) dapat memanfaatkan biomassa sebagai sumber bahan baku. Salah satu biomassa yang sangat memungkinkan adalah limbah pelepah pisang. Pelepah pisang mempunyai potensi sebagai alternatif bahan bakar karena mengandung 63% selulosa, 22% hemiselulosa, 10% lignin, dan 5% ash (Aslin, 2023).

γ-Valerolactone (GVL) banyak digunakan pada berbagai industri lainnya, seperti industri makanan, industri pembuatan BBM, dan industri pembuatan parfum. Saat ini Indonesia belum melakukan impor dan ekspor γ-Valerolactone (GVL) dikarenakan industri biofuel di Indonesia masih sampai tahap pengembangan dalam penggunaan GVL sebagai zat aditif bahan bakar. Berdasarkan pertimbangan berbagai kegunaan dan potensi dari γ-Valerolactone (GVL) dapat disimpulkan kebutuhan untuk γ-Valerolactone (GVL) di Indonesia akan semakin meningkat per tahunnya.

Berdasarkan Tabel 1 diperoleh rata-rata pertumbuhan kebutuhan GVL sebesar 2,07%. Rumus proyeksi pertumbuhan tersebut dapat diperkirakan kebutuhan GVL di Indonesia pada tahun 2029:

$F = F0\ (1 + i)^n$ (1.1)

$F = 3.473.127\ (1 + 2,07\%)^{(2029-2022)}$

$F = 4.009.657$ Ton/Tahun

Berdasarkan persamaan (1.1), kebutuhan GVL pada tahun 2029 sebesar 4.009.657 ton/tahun. Perhitungan kapasitas pabrik untuk memenuhi kebutuhan GVL di tahun tersebut menggunakan persamaan (1.2).

$m1+m2+m3=m4+m5$ (1.2)

Dimana,

m1 : nilai impor pada tahun didirikannya pabrik
m2 : kapasitas pabrik lama
m3 : kapasitas pabrik baru
m4 : nilai ekspor pada tahun didirikan pabrik
m5 : konsumsi dalam negeri

$m3=(m4+m5)-(m1+m2)$

$m3=(0+4.009.657)-(0+0)$

m3=4.009.657 Ton/Tahun sebagai kebutuhan GVL di tahun 2029.

Penentuan kapasitas pabrik GVL ini juga melihat dari jumlah bahan baku limbah pelepah pisang yang tersedia di PT. Nusantara Tropical Farm sebanyak 373.868.000 kg. Pertimbangan beberapa faktor cuaca, hama dan lainnya yang dapat memungkinkan jumlah bahan baku pelepah pisang berkurang (Kusuma, dkk., 2020), sehingga jumlah bahan baku yang digunakan hanya sebanyak 85% menjadi 254.230.240 kg pelepah pisang. Berdasarkan perhitungan dari konversi bahan baku dan selektivitas produk diperoleh kapasitas produksi maksimal γ-Valerolactone (GVL) sebesar 46.815,90 ton/tahun. Kapasitas produksi γ-Valerolactone (GVL) ini dibulatkan menjadi 45.000 ton/tahun. Jumlah kapasitas pabrik ini akan memenuhi kebutuhan GVL di Indonesia pada tahun 2029 sebesar 1,3 %.

2. Deskripsi Proses

a. Pre-treatment

Pretreatment dilakukan diperlukan untuk memecah struktur polimer dari biomassa lignoselulosa dan meningkatkan aksesibilitas enzim terhadap substrat selama proses hidrolisis enzimatis. Pada proses pretreatment bahan baku limbah pelepah pisang yang masih berukuran besar perlu diperkecil ukurannya melalui proses milling. Milling dipilih karena efektif dalam memperkecil ukuran biomassa untuk memudahkan limbah pelepah pisang diproses lebih lanjut dan pengoperasian proses yang sederhana (Rocha, dkk., 2012). Biomassa dilanjutkan pada proses steam explosion untuk memperkecil kembali ukuran partikel biomassa agar memperluas spesific surface area sehingga meningkatkan area kontak antara biomassa dengan reaktan lainnya dan katalis. Suhu dan tekanan tinggi pada steam explotion dapat memperkecilkan ukuran biomassa (Baruah, dkk., 2018). Alkaline pretreatment adalah proses pretreatment kimiawi yang didasarkan pada pelarutan lignin dalam larutan alkali yang mengubah struktur lignoselulosa melalui pembengkakan (swelling).

b. Produksi Asam Levulinat

Pada produksi asam levulinat melewati 3 tahapan reaksi kimia, yaitu reaksi selulosa menjadi glukosa, reaksi glukosa menjadi HMF, dan reaksi HMF menjadi asam levulinat. Pada produksi asam levulinat ini menggunakan katalis HCl karena memiliki nilai konversi mencapai 94,7% dan selektivitas mencapai 75%. Katalis HCl juga memiliki harga yang murah yaitu Rp 5.462.000 per kg, hal ini akan menguntungkan untuk produksi komersil.

Tahap reaksi yang terjadi ditunjukkan pada persamaan reaksi dibawah ini (Alonso, dkk., 2012):

Reaksi 1: Reaksi hidrolisis selulosa menjadi glukosa

- $(C_6H_{10}O_5)_{1045\ (aq)} + 1045H_2O_{\ (g)} \rightarrow 1045C_6H_{12}O_{6\ (aq)}$
  (Selulosa) (Air) (Glukosa)

Reaksi 2: Reaksi dehidrasi glukosa menjadi HMF

- $C_6H_{12}O_{6\ (aq)} \rightarrow C_5H_6O_{3\ (g)} + 3H_2O_{\ (g)}$
  (Glukosa) (HMF) (Air)

Reaksi 3: Hidrasi HMF menjadi asam levulinat

- $C_6H_6O_{3\ (g)} + 2H_2O_{\ (g)} \rightarrow C_5H_8O_{3\ (l)} + CH_2O_{2\ (g)}$
  (HMF) (Air) (As. Levulinat) (As. Format)

c. Produksi γ-Valerolactone (GVL)

Pemilihan proses produksi GVL sangat bergantung pada jenis katalis hidrogenasi untuk mengubah LA menjadi GVL. Diketahui bahwa katalis 3 wt% Ru/C memungkinkan konversi asam levulinat sampai sebesar 100% (Piskun, dkk., 2016). Disimpulkan bahwa katalis 3 wt% Ru/C dipilih, karena kondisi operasi yang tidak terlalu ekstrem yaitu pada tekanan 30-60 bar, pada suhu 70-130°C dan selama 1,39 jam dengan jumlah konversi sebesar 98-100%. Selain itu, Ru/C merupakan katalis padat yang sudah dikomersialkan

Tabel 1. Data Konsumsi BBM dan Perkiraan Kebutuhan GVL (KESDM, 2023)

Tahun	Produksi BBM (Ton/Tahun)	Konsumsi BBM (Ton/Tahun)	Perkiraan Kebutuhan GVL (5% x Jumlah Konsumsi BBM) (Ton/Tahun)	Pertumbuhan Kebutuhan GVL (%)
2016	42.413.727	65.564.828	3.278.241	-
2017	42.541.722	69.558.210	3.477.911	6,09
2018	44.612.697	72.514.744	3.625.737	4,25
2019	44.552.436	69.154.602	3.457.730	-4,63
2020	39.984.366	59.289.126	2.964.456	-14,27
2021	56.610.519	78.694.119	3.934.706	32,73
2022	41.603.622	69.462.544	3.473.127	-11,73

sehingga mudah dalam mendapatkannya dalam jumlah besar. Adapun persamaan reaksi sebagai berikut [7]:

$C_5H_8O_{3\ (l)} + H_{2\ (g)} \rightarrow C_5H_8O_{2\ (l)} + H_2O_{\ (l)}$

Proses pemurnian GVL merupakan proses akhir pada produksi GVL, dimana pada proses ini kemurnian

GVL akan ditingkatkan. Kondisi operasi yang digunakan selam pemurnian GVL yaitu pada tekanan 1 bar, pada suhu 141°C dan selama 1 jam dengan nilai selektivitas GVL mencapai 95,07% (Dutta, dkk., 2019).

2.1 Uraian Proses

a. Tahap Pre-treatment

Limbah pelepah pisang dijemur sampai kering lalu disimpan pada Gudang Penyimpanan Limbah Pelepah Pisang (F-111). Limbah pelepah pisang kemudian dipindahkan menggunakan belt conveyor (J-112) menuju Crusher (C-113) untuk dilakukan proses penggilingan hingga ukuran 10 s/d 50 mm. Setelah proses penggilingan, limbah pelepah pisang diangkut menggunakan bucket elevator (J-114) dan dimasukkan ke dalam tangki steam explosion (D-110). Pada tangki steam explosion (D-110), steam diinjeksikan sampai tekanan menjadi 1,3 MPa dengan suhu 191,61°C. Setelah 15 menit, reaktor secara spontan diturunkan tekanannya oleh operator pada jarak yang aman, dan slurry yang meledak dengan uap dialirkan keluar menuju cyclone (H-115) untuk memisahkan slurry dengan uap. Slurry akan keluar menuju Rotary Vacuum Filter 1 (H-116) untuk mencuci pulp.

Pulp selanjutnya dipindahkan menggunakan screw conveyor 1 (J-118) menuju reaktor delignifikasi (D-120). Proses delignifikasi dilakukan untuk menghilangkan kadar lignin dengan menggunakan reaktor berpengaduk yang diberi larutan NaOH 1% dari pompa (L-125) dan dipanaskan hingga 100°C. Saat waktu operasi sudah selesai maka cake dicuci kembali untuk memisahkan NaOH dari cake menggunakan rotary vacum filter 2 (H-126), lalu dialirkan keluar menggunakan screw conveyor (J-128) menuju Reaktor Produksi Asam Levulinat (R-210).

b. Produksi Asam Levulinat

Reaksi yang terjadi dari proses ini merupakan reaksi seri dimana selulosa akan direaksikan sampai menjadi asam levulinat melalui beberapa tahapan reaksi. Reaksi kesatu adalah reaksi hidrolisis selulosa menjadi glukosa selama 20 menit, reaksi kedua adalah reaksi dehidrasi glukosa menjadi HMF selama 20 menit, dan reaksi ketiga adalah reaksi hidrasi HMF menjadi asam levulinat selama 180 menit. Cake dari unit pretreatment dimasukkan ke dalam reaktor asam levulinat (R-210) untuk dilakukan hidrolisis dengan perlakuan hidrotermal menggunakan asam klorida (HCl) sebagai katalis yang dipompa dari (L-212). Reaktor asam levulinat (R-210) merupakan reaktor CSTR yang mempunyai suhu operasi 180°C dengan penambahan air yang dipompa dari (L-213). Pada reaktor asam levulinat (R-210), produk yang memiliki titik didih di bawah suhu operasi akan dihasilkan pada produk atas dalam bentuk uap, asam levulinat diperoleh pada bagian bawah dikarenakan titik didih asam levulinat diatas suhu operasi pada tekanan normal (252°C). Asam levulinat dipisahkan dari sisa padatan seperti selulosa hemiselulosa, lignin, ash dan humin menggunakan centifuge (H-214). Asam levulinat yang sudah dipisahkan dari padatan kemudian dipompa menuju Reaktor GVL (R-310).

c. Produksi γ-Valerolactone (GVL)

Produksi GVL pada perancangan ini berasal dari asam levulinat yang dihasilkan dari unit produksi asam levulinat. Pada produksi GVL, H2 yang dimasukkan adalah H2 berlebih yang akan di-recycle untuk diumpankan kembali ke dalam reaktor. Aliran yang tinggi asam levulinat dipompa (L-215) ke dalam reaktor GVL (R-310) yang dioperasikan pada suhu 130°C selama 1,39 jam dengan tekanan 30 bar dan H2 diumpankan dari (F-311), dimana asam levulinat dihidrogenasi menjadi GVL menggunakan katalis heterogen Ru/C [8]. Aliran hidrogen berlebih dari unit produksi asam levulinat, selanjutnya dialirkan menuju kompresor (G-312) untuk diumpankan kembali ke dalam reaktor. Produk bawah berupa senyawa campuran dengan fraksi GVL terbanyak, selanjutnya dipanaskan sampai 141°C menggunakan Heater Flash Drum (E-313) dan meningkatkan kemurnian GVL yang awalnya 84,75% menjadi 95,07% menggunakan flash drum (D-314). GVL yang sudah dimurnikan dipompa (L-315) kemudian didinginkan menggunakan Cooler GVL (E-316) dan disimpan dalam tangki penyimpanan GVL (F-317).

3. Utilitas

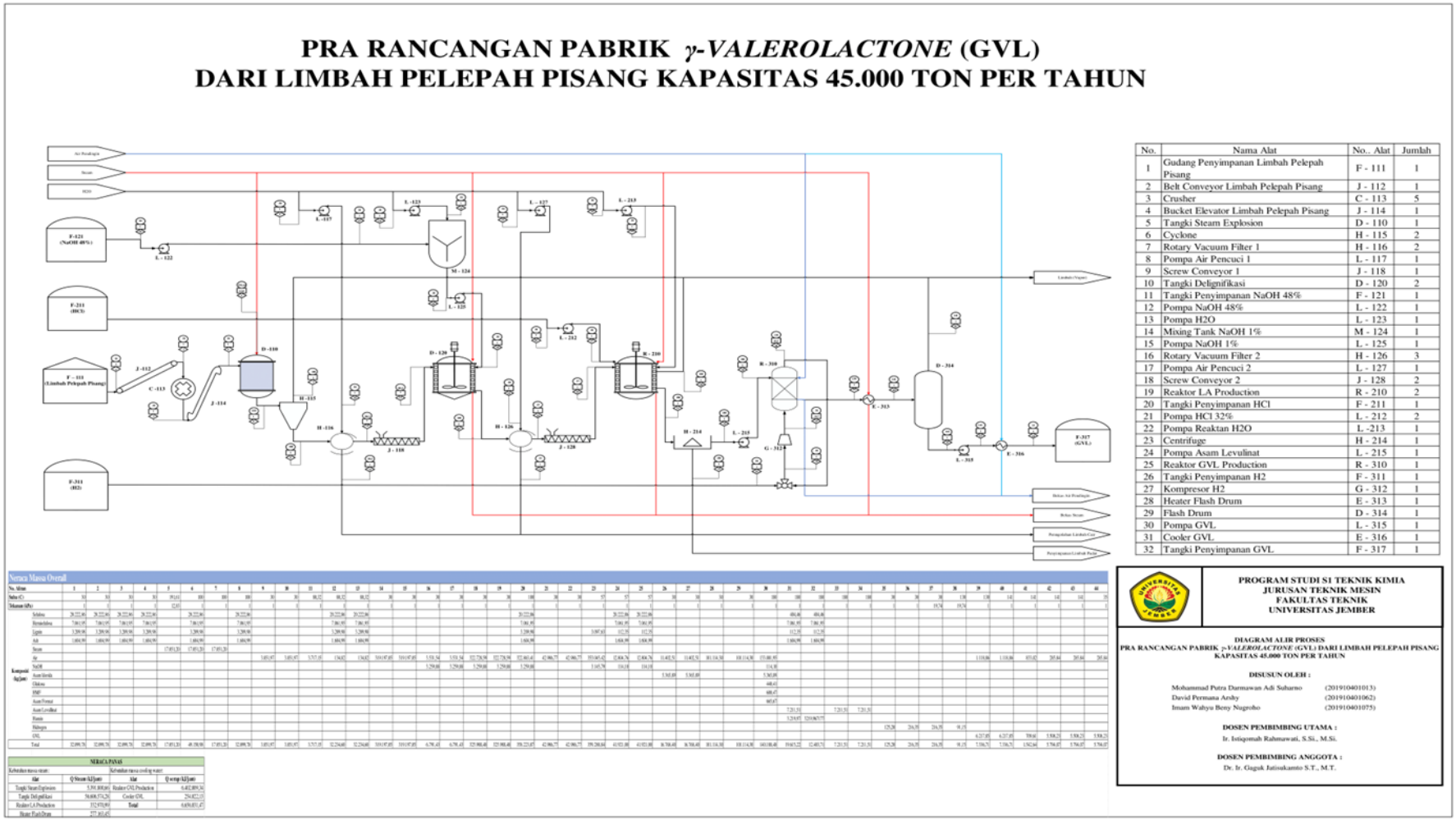
Sistem utilitas merupakan bagian yang sangat penting dalam industri, khususnya dalam industri kimia. Sistem pendukung (utilitas) dalam perencanaan pabrik γ-Valerolactone (GVL) dengan kapasitas produksi 45,000 ton/tahun terbagi dalam 5 unit yaitu unit pengolahan air, unit pengadaan steam, pengadaan Listrik, bahan bakar, dan pengolahan limbah.

a. Unit Pengadaan Air

Pengadaan air pada pabrik γ-Valerolactone (GVL)didapatkan dari PDAM Labuhan Ratu, Kab. Lampung Timur.

b. Unit Pengadaan Cairan Pendingin

Cairan pendingin yang digunakan pada pabrik γ-Valerolactone (GVL) adalah propilen glikol 30%.



No.	Nama Alat	No.. Alat	Jumlah
1	Gudang Penyimpanan Limbah Pelepah Pisang	F - 111	1
2	Belt Conveyor Limbah Pelepah Pisang	J - 112	1
3	Crusher	C - 113	5
4	Bucket Elevator Limbah Pelepah Pisang	J - 114	1
5	Tangki Steam Explosion	D - 110	1
6	Cyclone	H - 115	2
7	Rotary Vacuum Filter 1	H - 116	2
8	Pompa Air Pencuci 1	L - 117	1
9	Screw Conveyor 1	J - 118	1
10	Tangki Delignifikasi	D - 120	2
11	Tangki Penyimpanan NaOH 48%	F - 121	1
12	Pompa NaOH 48%	L - 122	1
13	Pompa H2O	L - 123	1
14	Mixing Tank NaOH 1%	M - 124	1
15	Pompa NaOH 1%	L - 125	1
16	Rotary Vacuum Filter 2	H - 126	3
17	Pompa Air Pencuci 2	L - 127	1
18	Screw Conveyor 2	J - 128	2
19	Reaktor LA Production	R - 210	2
20	Tangki Penyimpanan HCl	F - 211	1
21	Pompa HCl 32%	L - 212	2
22	Pompa Reaktan H2O	L -213	1
23	Centrifuge	H - 214	1
24	Pompa Asam Levulinat	L - 215	1
25	Reaktor GVL Production	R - 310	1
26	Tangki Penyimpanan H2	F - 311	1
27	Kompresor H2	G - 312	1
28	Heater Flash Drum	E - 313	1
29	Flash Drum	D - 314	1
30	Pompa GVL	L - 315	1
31	Cooler GVL	E - 316	1
32	Tangki Penyimpanan GVL	F - 317	1

Gambar 1. *Flow Diagram Process Pra-Rancangan Pabrik γ-Valerolactone (GVL) Kapasitas 45.000 Ton/Tahun*

c. Unit Pengadaan Steam

Unit pengadaan steam memiliki peran dalam menghasilkan steam yang dibutuhkan pada proses produksi. Steam yang diperoleh berada dalam kondisi operasi yang sudah ditentukan. Total kebutuhan steam pada pabrik γ-Valerolactone (GVL) adalah 45.111,42 kg/jam.

d. Unit Pengadaan Listrik

Kebutuhan listrik pabrik GVL didapatkan dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai sumber listrik utama dan generator sebagai sumber listrik cadangan apabila terjadi gangguan pada PLN. Total kebutuhan listrik pada pabrik γ-Valerolactone (GVL) adalah 6.225,72 kW/jam.

e. Unit Pengadaan Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan untuk pabrik GVL ini adalah anthracite coal sebagai bahan bakar boiler dan High Speed Diesel (Solar) sebagai bahan bakar generator. Kebutuhan anthracite coal sebanyak 37.548,97 kg/jam dan kebutuhan High Speed Diesel sebanyak 25,72 ft^3/jam.

f. Unit Pengolahan Limbah

- Pengolahan Limbah Padat

Limbah yang dihasilkan dari proses produksi pabrik GVL berupa cake dan tidak tergolong dalam limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun). Pemanfaatan yang dapat dilakukan dari limbah cake adalah sebagai bahan bakar tambahan boiler.

- Pengolahan Limbah Gas

Limbah gas dari cyclone, reaktor LA, dan flash drum dihisap dengan kompresor, kemudian diumpankan ke kondensor untuk merubah fase dari gas menjadi liquid. Cairan yang dihasilkan dipompa untuk menuju tangki penyimpanan limbah cair. Efisiensi dari kondensor sebesar 100%.

- Pengolahan Limbah Cair

Limbah cair terbagi menjadi dua yaitu limbah cair proses produksi dan limbah cair hasil kondensasi limbah gas. Limbah cair proses produksi yang dihasilkan dari Rotary Vacuum Filter 1 (H-116) dan Rotary Vacuum Filter 2 (H-126) mengandung natrium hidroksida 1%, air, dan lignin. Natrium hidroksida tidak bisa dibuang langsung karena berbahaya bagi lingkungan. Limbah cair lainnya dihasilkan dari backwash, sanitasi dan laboratorium. Pengolahan limbah cair ini dilakukan dengan menampung limbah tersebut pada 1 tangki, kemudian ditambahkan asam klorida untuk membentuk senyawa natrium klorida. Limbah cair yang dihasilkan dari hasil kondensasi limbah akan ditampung dalam 1 tangki. Limbah cair ini selanjutnya akan dikirim ke pihak ketiga untuk diolah.

4. Analisis Ekonomi

Layak atau tidaknya suatu pabrik untuk didirikan ditinjau dari evaluasi ekonomi. Hal ini ditujukan agar dapat mengetahui seberapa besar keuntungan yang diperoleh dari kapasitas produksi tertentu. Kelayakan berdirinya pabrik γ-Valerolactone (GVL) ditentukan dari beberapa komponen yang tercantum pada tabel dibawah ini. Tabel berikut menunjukkan hasil evaluasi ekonomi yang dilakukan untuk pabrik γ-Valerolactone (GVL):

5. Kesimpulan

Berdasarkan uraian dan pembahasan sebelumnya maka dapat diambil kesimpulan pabrik γ-Valerolactone (GVL) dengan kapasitas 45.000 ton/tahun layak untuk didirikan. Lokasi pabrik berada di Kecamatan Labuhan Ratu Kabupaten Lampung Timur, Lampung. Pabrik ini direncanakan beroperasi secara kontinyu selama 330 hari/tahun dan 24 jam/hari. Bentuk badan usaha yang direncanakan pada pabrik adalah perseroan terbatas (PT) dengan jumlah karyawan sebanyak 156 orang. Evaluasi ekonomi diperoleh laba perusahaan sebesar $9.014.996,35, ROR sebesar 54,61%, POT selama 1,75 tahun, dan BEP sebesar 45,20%

Tabel 2. Analisis Kelayakan Pabrik γ-Valerolactone (GVL)

No.	Parameter	Hasil Perhitungan	Kelayakan
1.	*Annual Cash Flow* (ACF)	64%	Layak
2.	*Pay Out Time* (POT)	1.75 Tahun	Layak
3.	*Net Profit Over Total Lifetime of The Project* (NPOTLP)	$90.371.016,15	Layak
4.	*Total Capital Sink* (TCS)	$84.959.862,83	Layak
5.	*Rate of Return* (ROR)	54.61%	Layak
6.	*Discounted Cash Flow Rate of Return* (DCF-ROR)	65.56%	Layak
7.	*Break Even Point* (BEP)	45.20%	Layak

Daftar Pustaka

Alonso, D. M., Gallo, J. M. R., Mellmer, M. A., Wettstein, S. G., dan Dumesic, J. A., 2012, "Direct Conversion of Cellulose to Levulinic Acid and Gamma-Valerolactone using Solid Acid Catalysts", Catal. Sci. Technol., Volume 3 (4), hal. 927–931.

Aslin, N. A., 2023, "Pemanfaatan Hidrogel dari Selulosa Batang Pisang (Musa paradisiaca L.) Kitosan Sebagai Pembenah Tanah Tanaman Arachis hypogaea L.", skripsi, Universitas (nama perguruan tinggi penulis, jika ada).

Baruah, J., dkk., 2018, "Recent trends in the pretreatment of lignocellulosic biomass for value-added products", Front. Energy Res., Volume 6 (DEC), hal. 1–19. doi: 10.3389/fenrg.2018.00141.

Dutta, S., dkk., 2019, "Green Synthesis of Gamma-Valerolactone (GVL) Through Hydrogenation of Biomass-Derived Levulinic Acid Using Non-Noble Metal Catalysts: A Critical Review", Chem. Eng. J., Volume 372, hal. 992–1006.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2022, "Statistik Minyak dan Gas Bumi 2022".

Kholid, N., Sholehah, R., dan Irawan, R., 2024, "Prarancangan Pabrik γ-Valerolactone (GVL) dari Ampas Tebu dengan Kapasitas 15.244 Ton/Tahun", Jurnal Volume 12 (2), hal. 73–77.

Kusuma, A. M., Rostaman, dan M. K., 2020, "Penyakit Pada Tanaman Pisang dan Distribusinya di Wilayah Kecamatan Sumbang Kabupaten Banyumas", Jurnal Volume 3, hal. 8–15.

Piskun, A. S., van de Bovenkamp, H. H., Rasrendra, C. B., Winkelman, J. G. M., dan Heeres, H. J., 2016, "Kinetic Modeling of Levulinic Acid Hydrogenation to γ-Valerolactone in Water Using a Carbon Supported Ru Catalyst", Appl. Catal. A Gen., Volume 525, hal. 158–167. doi: 10.1016/j.apcata.2016.06.033.

Rocha, G. J. M., Martín, C., da Silva, V. F. N., Gómez, E. O., dan Gonçalves, A. R., 2012, "Mass Balance of Pilot-Scale Pretreatment of Sugarcane Bagasse by Steam Explosion Followed by Alkaline Delignification", Bioresour. Technol., Volume 111, hal. 447–452.