

PRARANCANGAN PABRIK γ -VALEROLACTONE (GVL) DARI LIMBAH TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT KAPASITAS 55.000 TON/TAHUN

Naviatul Fauziyah¹, Laily Nur Azizah¹, Ifan Ramadana^{1,*}, Zuhriah Mumtazah¹, Ansori Ansori¹, Merymistika Yufrani Afred¹

¹Program Studi S1 Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jember
Jl. Kalimantan No. 37, Jember Jawa Timur, 68121

*Corresponding Author: ifanramadana202@gmail.com

Abstrak

Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi terbarukan memiliki banyak keuntungan, termasuk ketersediaan yang melimpah dan biaya produksi yang ekonomis. Limbah biomassa dapat diolah menjadi bahan bakar dan senyawa kimia bernilai tinggi, salah satunya γ -valerolactone (GVL), yang memiliki stabilitas tinggi, titik didih yang besar, dan tingkat toksisitas rendah. Pabrik GVL ini dirancang untuk mengolah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan kapasitas produksi 55.000 ton per tahun dan beroperasi selama 330 hari per tahun. Proses produksi terdiri dari beberapa tahap utama, dimulai dengan pretreatment menggunakan steam explosion, diikuti hidrolisis selulosa menjadi glukosa pada suhu 30°C dan tekanan atmosfer, serta hidrolisis hemiselulosa pada suhu 170°C dan tekanan atmosfer untuk menghasilkan furfural dan asam levulinat. Reaksi berlangsung dalam CSTR dengan katalis asam sulfat. Asam levulinat kemudian mengalami hidrogenasi dalam FBR dengan katalis Ru/C 5% pada suhu 150°C untuk menghasilkan GVL dan air. Pemisahan air dilakukan menggunakan flash drum, menghasilkan GVL dengan kemurnian 97%. Pabrik GVL direncanakan akan dibangun di Jejangkit, Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan dengan luas tanah 50 hektar. Pabrik ini dirancang untuk beroperasi dengan total tenaga kerja sebanyak 163 orang. Hasil perhitungan ekonomi diperoleh Rate on Investment (ROI) setelah pajak 39,42%, Pay Ot Time (POT) setelah pajak selama 2,02 tahun dan Break Even Point (BEP) sebesar 44,26%. Berdasarkan analisis ekonomi, pabrik ini layak untuk didirikan.

Kata kunci : Biomassa, selulosa, hemiselulosa, γ -valerolactone, TKKS

1. Pendahuluan

Populasi penduduk di Indonesia setiap tahunnya terus mengalami peningkatan sehingga kebutuhan bahan bakar untuk industri, transportasi, dan rumah tangga juga akan terus meningkat. Sebagian besar sumber bahan bakar yang digunakan berasal dari bahan bakar fosil (petroleum) (Sari et al., 2020). Berkurangnya cadangan minyak bumi, meningkatnya masalah lingkungan seperti pemanasan global, dan ketidakstabilan pasokan energi mendorong manusia untuk mencari bahan bakar alternatif dari sumber daya terbarukan. Berbagai penelitian telah dilakukan dengan fokus pada pemanfaatan biomassa sebagai sumber bahan bakar terbarukan yang memiliki beberapa keunggulan dibandingkan minyak bumi. Biomassa lignoselulosa adalah sumber daya terbarukan yang berpotensi untuk dikonversi menjadi bahan kimia dan berbagai jenis bahan bakar, serta tersedia dalam jumlah yang sangat melimpah di seluruh dunia (Kristiani, Vincentia and Putro, 2018).

Limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai salah satu biomassa merupakan hasil samping dari produksi minyak kelapa sawit, hal ini

menjadi salah satu permasalahan penting di Indonesia. Industri kelapa sawit di Indonesia terus berkembang pesat, sehingga volume limbah tandan kosong juga meningkat secara signifikan. Limbah padat yang dihasilkan dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) memiliki tingkat kandungan lignoselulosa yang cukup tinggi, namun belum dimanfaatkan secara optimal di Indonesia (Sari et al., 2020). Spesifikasi tandan kosong kelapa sawit ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Spesifikasi TKKS sebagai bahan baku utama (Pamungkas et al., 2024)

Komponen Penyusun	Kadar (%)
Selulosa	59,70
Hemiselulosa	22,10
Lignin	18,10
Air	7,48 – 8,96
Ash	5,29

Konsumsi bahan bakar minyak yang terus meningkat setiap tahun menjadi salah satu faktor penyebab terjadinya kelangkaan bahan bakar saat ini. Tahun 2023, produksi bahan bakar minyak di



Indonesia tercatat sebesar 1.611.549,34 ton/tahun (Badan Pusat Statistik, 2024). Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk menghasilkan bahan bakar alternatif. Salah satunya adalah GVL yang berpotensi sebagai aditif bensin dan dapat diperoleh melalui reaksi hidrogenasi dari asam levulinat (LA).

γ -valerolactone (GVL) adalah senyawa turunan biomassa yang sangat serbaguna dan memiliki potensi besar sebagai sumber karbon yang terbarukan. GVL memiliki sifat fisika dan kimia yang unggul, seperti titik didih yang tinggi, volatilitas rendah, kemudahan dalam proses degradasi, serta tingkat toksisitas yang rendah. Karakteristik ini menjadikan GVL sebagai bahan yang aman dan layak untuk aplikasi skala besar. GVL memiliki berbagai potensi penggunaan sebagai pelarut ramah lingkungan, aditif bahan bakar, prekursor untuk produksi bahan bakar transportasi berbasis alkena, serta senyawa antara dalam sintesis bahan kimia lainnya. Selain itu, GVL juga dianggap sebagai bahan bakar cair yang berkelanjutan, mendukung kebutuhan transportasi global (Lin et al., 2020).

Berikut merupakan data impor dan grafik bahan bakar minyak di Indonesia pada Tabel 2.

Tabel 2. Data impor bahan bakar minyak di Indonesia (Badan Pusat Statistik, 2024)

Tahun	Impor (Ton/Tahun)	%Kenaikan
2019	506.177,53	0
2020	615.071,99	21,51
2021	778.180,83	26,52
2022	979.991,03	25,93
2023	1.611.549,34	64,45
ΣP	-	-
I		27,68

Tabel 2 menunjukkan bahwa Indonesia masih sangat bergantung pada impor bahan bakar minyak. Untuk memproyeksikan nilai impor pada tahun 2030, digunakan persamaan regresi linier untuk merepresentasikan pola statistik dari impor bahan bakar minyak. Persamaan regresi tersebut adalah $y = (257566x - 5E+8)$, dengan koefisien determinasi ($R^2 = 0,8686$), (y) menyatakan jumlah impor bahan bakar minyak (ton/tahun) dan (x) adalah tahun ke-. Berdasarkan persamaan ini, apabila diasumsikan bahwa produksi pabrik ini akan memenuhi 2,5% dari produksi di Indonesia pada tahun 2030, maka kapasitas produksi pabrik sebesar 57.167,75 ton/tahun dan dibulatkan menjadi 55.000 ton/tahun.

Seleksi proses dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu *pretreatment*, produksi asam levulinat (LA), dan produksi GVL.

a. Pretreatment

Pretreatment merupakan proses awal yang bertujuan untuk mengurangi atau menghilangkan sejumlah bahan atau senyawa yang berpotensi menghambat laju hidrolisis, serta untuk meningkatkan hasil produksi. Jenis *pretreatment* berdasarkan metodenya menurut (Shukla et al., 2023) pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Perbandingan jenis *pretreatment* berdasarkan metodenya

No.	Metode	Jenis Pretreatment
1.	Pretreatment Fisika	Mekanis, Milling, Ekstruksi, Penyinaran, Sonifikasi
2.	Pretreatment Kimia	Alkali Pretreatment, Acid Pretreatment, Organosolvent Pretreatment, Deep Eutectic Pretreatment
3.	Pretreatment Fisiokimia	Steam explosion, Liquid hot water pretreatment, Ammonium fibre explosion process, CO ₂ explosion, Wet air oxidation
4.	Pretreatment Biologi	Fungal pretreatment, Bacterial pretreatment

Pretreatment pada pabrik ini menggunakan metode *milling*, dan *steam explosion*. *Milling* dipilih karena efektif dalam memperkecil ukuran partikel biomassa (Shukla et al., 2023). *Steam explosion* dipilih karena merupakan salah satu metode yang paling umum digunakan dan sangat efektif. Dalam proses *steam explosion* biomassa lignoselulosa segera dipanaskan dengan uap jenuh pada tekanan tinggi dalam waktu singkat yang kemudian akan diikuti dengan pelepasan tekanan secara mendadak sehingga menyebabkan perluasan uap dalam bahan lignoselulosa yang mengakibatkan pelepasan serat individu (Shukla et al., 2023).

b. Produksi Asam Levulinat

Katalis berperan dalam mempercepat reaksi konversi biomassa menjadi asam levulinat, sementara pelarut memengaruhi kelarutan substrat serta interaksi kimia selama proses berlangsung. Berikut perbandingan berbagai jenis katalis dan pelarut berdasarkan penelitian (Ma et al., 2021).

Tabel 4. Perbandingan katalis dalam produksi LA

No.	Katalis	% LA	% Konversi	% Selektivitas LA
-----	---------	---------	---------------	----------------------

2. Seleksi dan Uraian Proses

2.1 Seleksi Proses



1.	HCl	50,81	94,7	53,65
2.	Asam Oksalat	1,57	37,22	4,22
3.	Amberlyst-15	29,91	71,29	41,96
4.	H ₂ SO ₄	57,74	77,24	74,75

Tabel 5. Perbandingan pelarut dalam produksi LA

No.	Pelarut	Suhu (°C)	% Yield LA	% Konversi	% Selektivitas LA
1.	H ₂ O	180	29,91	71,29	41,96
2.	GVL/ H ₂ O	180	36,90	93,83	39,33
3.	GVL/ H ₂ O	180	83,54	83,54	60,33
4.	THF/ H ₂ O	180	94,25	94,25	50,64
5.	THF/ H ₂ O	180	87,16	87,16	39,93
6.	DIO/ H ₂ O	180	81,04	81,04	39,71
7.	Sulfolane/ H ₂ O	180	83,71	83,71	26,97
8.	DMSO/ H ₂ O	180	42,33	42,33	13,44

Katalis yang cocok digunakan adalah asam

sulfat (H₂SO₄). Pemilihan katalis ini didasarkan pada pertimbangan hasil konversi yang dihasilkan dan kondisi operasi yang relatif moderat. Selain itu, hasil *yield* yang diperoleh tidak jauh berbeda dengan hasil penelitian lain pada skala laboratorium. Pelarut yang digunakan adalah air (H₂O) karena kelebihanannya dalam hal kemudahan pengolahan serta ketersediaan yang melimpah.

c. Produksi γ -valerolactone (GVL)

Beragam proses telah dikembangkan untuk memproduksi γ -valerolactone (GVL) sejak tahun 1930 hingga saat ini. Dari sejumlah metode yang ada terdapat tiga proses terbaru yang diuraikan secara rinci oleh para peneliti yang disajikan dalam Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Pemilihan proses produksi GVL

Proses	Bahan Baku	Kondisi Operasi dan Yield	Kelebihan	Kekurangan	Ref
<i>Hydrogenation Levulinic acid (LA) dari Biomassa.</i>	Biomassa yang Mengandung Lignoselulosa	50-70°C 30 Bar 3 Jam 99,1 %	• Yield Tinggi • Waktu Reaksi Singkat	• Tekanan Tinggi • Harga Katalis Mahal	(Chem et al., 2012)
<i>Catalytic Transfer Hydrogenation (CTH)</i>	<i>Levulinic Acid</i>	170°C 26 Bar 24 Jam 99 %	• Yield Tinggi	• Waktu Reaksi Lama	(Clara et al., 2022)
<i>Catalytic Transfer Hydrogenation (CTH)</i>	Biomassa yang Mengandung Selulosa	180°C 10 Bar 5 Jam 90%	• Yield Tinggi • Waktu Reaksi Singkat • Tekanan Rendah	• Suhu Tinggi	(Dutta et al., 2019)

Tabel 7. Pemilihan Katalis pada Produksi GVL

No	Katalis	Kondisi Operasi		Yield GVL (%)		Referensi
		P (bar)	T (°C)	T (h)		
1.	3 % wt Ru/C	30-60	70-130	1,39	98	(Yan et al., 2013)
2.	5 % wt Pd/SiO ₂	90	180	6	6,5	(Piskun et al., 2016)
3.	5 % wt Ru/C+A70	3	70	3	99,9	(Galletti et al., 2012)
4.	0,3 % wt Ru/TiO ₂	40	200	5	90	(Gu et al., 2017)
5.	4,5 % wt Ir/CNT	20	50	1	99	(Du et al., 2012)
6.	5 % wt Cu/ZrO ₂	35	200	5	90	(Hengne et al, 2012)
7.	5 % wt Ru/C	12	130	24	97,5	(Al-Shaal et al., 2012)
8.	5 % wt Ru/C	35	150	2	99	(Carlos Serrano Ruiz, 2009)

Proses yang dipilih untuk produksi GVL yaitu *Catalytic Transfer Hydrogenation* (CTH) atau hidrogenasi katalitik menggunakan katalis Ru/C dengan modifikasi bahan yaitu TKKS.

2.2 Uraian Proses

a. Pretreatment

Limbah TKKS dari pabrik kelapa sawit akan disimpan terlebih dahulu dalam Gudang Penyimpanan TKKS (F-111) kemudian dicuci pada *Rotary Washer* TKKS (H-113) untuk menghilangkan kotoran yang dapat mengganggu

proses berikutnya. TKKS kemudian dicacah 10 mm di *Crusher* TKKS (C-115) sebelum masuk Reaktor *Steam Explosion* (R-110). TKKS dalam reaktor dikontakkan dengan uap jenuh bersuhu 242°C dan tekanan 35 atm selama 10 menit. Perlakuan hidrotermal ini bertujuan memecah struktur lignoselulosa TKKS menjadi selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Limbah yang keluar dari R-110 berbentuk *slurry* dialirkan menuju *Cyclone* (H-116). *Steam* yang tidak terserap dipisahkan melalui bagian atas, sedangkan bawah berupa *slurry* TKKS yang kemudian dimasukkan ke *Filter* 1 (H-

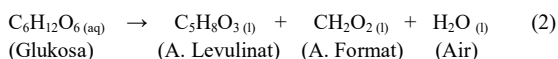
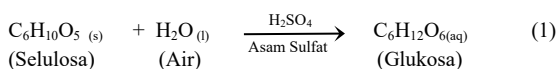


117) untuk memisahkan komponen padatan (selulosa dan lignin) dari komponen cairan (hemiselulosa).

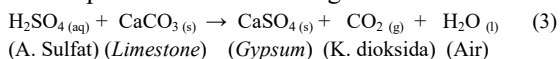
b. Produksi Asam Levulinat (LA) dari Selulosa

Selulosa dan lignin selanjutnya dialirkan ke *Reaktor Hidrolisis Selulosa* (R-210) untuk proses hidrolisis mengubah selulosa menjadi glukosa pada suhu 30°C dan tekanan 1 atm selama 2 jam, dibantu asam sulfat 72% berat, dengan suhu reaktor dijaga stabil menggunakan *air pendingin* melalui *coil*. Produk berupa campuran glukosa 98%, lignin, dan ash selanjutnya dipisahkan di *Filter 2* (H-215).

Glukosa 98% kemudian dipanaskan sebelum dimasukkan ke *Reaktor LA Selulosa* (R-220). Glukosa dalam reaktor ini direaksikan untuk membentuk asam levulinat pada suhu 200°C dan tekanan 15 atm selama 1 jam, dengan asam sulfat yang masih tersisa diencerkan menjadi 5% berat melalui penambahan air. Reaksi ini menghasilkan campuran asam levulinat dengan *yield* 90% dan asam format. Asam sulfat dinetralkan menggunakan *limestone*, menghasilkan endapan *gypsum* (CaSO₄). *Gypsum* dan humin dipisahkan dari asam levulinat. Humin terbentuk akibat kondensasi glukosa yang tidak bereaksi. Berikut reaksi kimia pembentukan asam levulinat dari selulosa:



Reaksi penetralan adalah sebagai berikut:

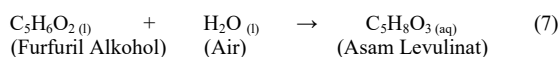
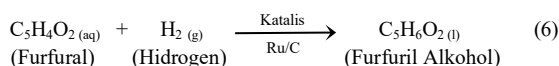
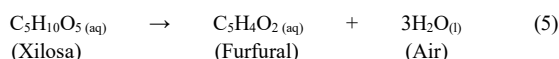
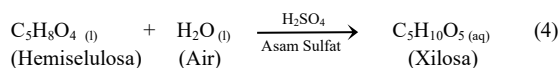


c. Produksi Asam Levulinat dari Hemiselulosa

Hemiselulosa dipanaskan mencapai suhu 170°C pada tekanan atmosfer untuk memenuhi kondisi operasi di *Reaktor Hidrolisis Hemiselulosa 1* (R-310) selama 30 menit. Dalam reaktor ini, hemiselulosa dihidrolisis menjadi furfural dengan bantuan asam sulfat 1% sebagai katalis dengan *yield* furfural 99%. Asam sulfat akan dinetralkan menggunakan *limestone* berlebih, menghasilkan endapan *gypsum* (CaSO₄) dan karbon dioksida. CO₂ dan air dilepaskan melalui bagian atas tangki, sedangkan *slurry* dikeluarkan dari bagian bawah dan dipisahkan di *Filter 4* (H-315) untuk memisahkan *gypsum* dan humin dari cairan furfural.

Cairan furfural yang telah terpisah kemudian dipanaskan sebelum dialirkan ke *Reaktor Hidrogenasi Katalitik* (R-320). Di reaktor ini, furfural direaksikan dengan hidrogen membentuk furfural alkohol menggunakan katalis Ru/C (*Ruthenium on Carbon*) 5%wt pada suhu 150°C dan

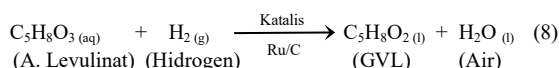
tekanan 1 atm selama 1 jam. Produk furfural alkohol didinginkan terlebih dahulu kemudian dihidrolisis di *Reaktor Hidrolisis Hemiselulosa 2* (R-330) menghasilkan asam levulinat pada suhu 130°C dengan tekanan atmosfer, dibantu asam sulfat 1% sebagai katalis. Produk utama berupa asam levulinat setelah dari tangki netralisasi selanjutnya dipisahkan dari padatan *gypsum*. Berikut reaksi kimia pembentukan asam levulinat dari hemiselulosa :



(Ashok B. & Forssell, 2022; Fasahati & Maravelias, 2018).

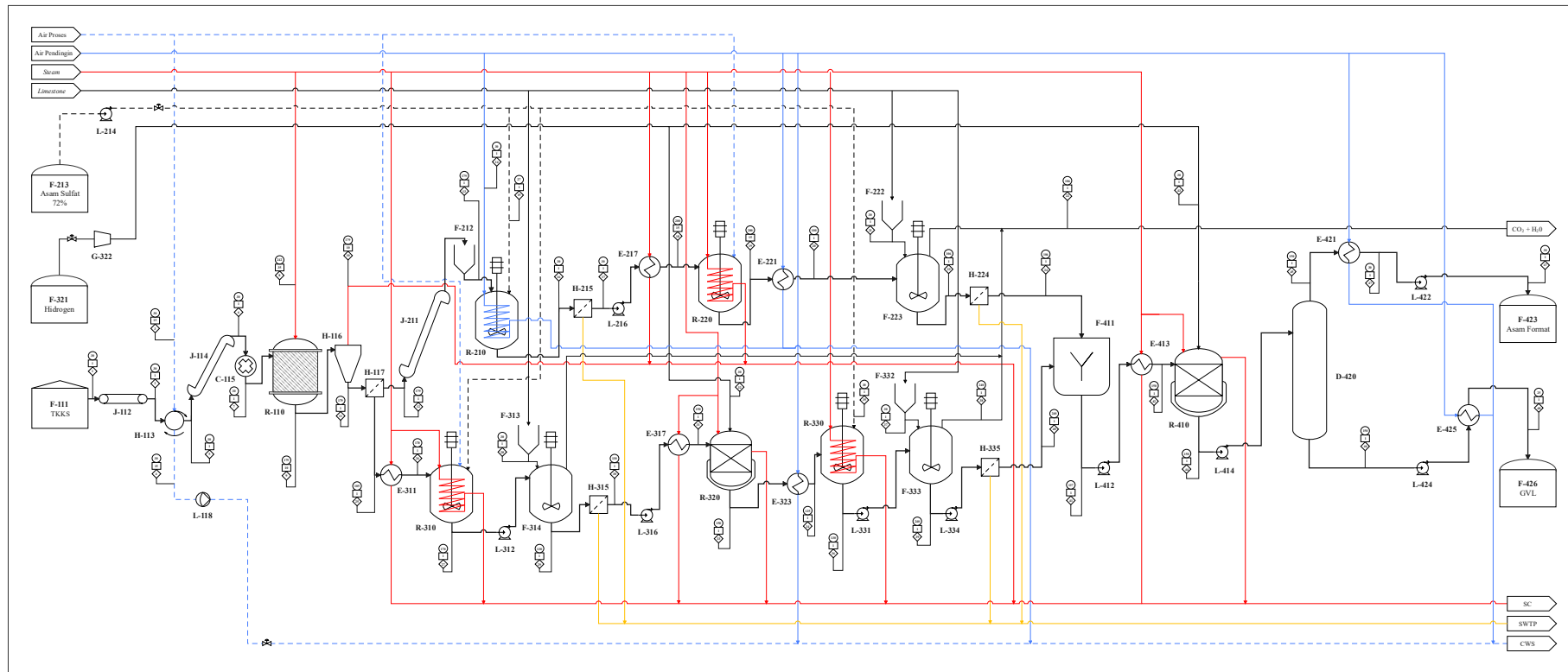
d. Pembentukan GVL dari Asam Levulinat

Asam levulinat yang dihasilkan dari jalur selulosa dan hemiselulosa dicampur dalam *Tangki Pencampur* (F-411). Campuran tersebut kemudian dipanaskan hingga mencapai suhu operasi 150°C sebelum dimasukkan ke *Reaktor Hidrogenasi Katalitik LA* (R-410), tempat asam levulinat direaksikan dengan gas hidrogen menggunakan katalis Ru/C 5%. Reaksi berlangsung dalam *fixed bed reactor* pada tekanan 30 atm. Reaksi hidrogenasi ini menghasilkan *γ-valerolactone* (GVL) dan air sebagai produk samping.



Produk dari reaktor dialirkan ke *Flash Drum* (D-420) untuk memisahkan asam format dan air dari GVL. Hasil pemisahan berupa uap air dan sisa asam format sebagai produk atas kemudian didinginkan hingga suhu ruang sebelum disimpan dalam *Tangki Penyimpanan Asam Format* (F-423). Produk bawah berupa GVL dengan kemurnian 97% didinginkan hingga suhu ruang sebelum disimpan dalam *Tangki Penyimpanan GVL* (F-426) untuk penggunaan atau distribusi lebih lanjut. Diagram alir proses pabrik GVL ini ditunjukkan pada gambar 1.





Gambar 1. Process Flow Diagram (PFD) pabrik GVL
Sumber : Penulis

3. Neraca Massa dan Energi

A. Neraca Massa

Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa, pabrik GVL memerlukan bahan baku TKKS sebanyak 17.034,892 kg/jam. TKKS tersebut mampu menghasilkan produk GVL 97% sebanyak 6.738,399 kg/jam. Operasional pabrik dirancang berlangsung selama 330 hari dalam satu tahun dengan waktu kerja selama 24 jam setiap harinya.

B. Neraca Energi

Berdasarkan hasil perhitungan neraca energi, kebutuhan steam total mencapai 485.552,861 kg/jam, dengan 20% berasal dari *make-up water*. Kapasitas boiler yang diperlukan untuk menghasilkan uap adalah 810.263,424 Btu/jam. Sementara itu, kebutuhan bahan bakar mencapai 72.217,176 lb/jam atau 32.751,554 kg/jam.

4. Utilitas

Utilitas adalah komponen krusial dalam pabrik yang mendukung kelancaran proses produksi. Unit utilitas diperlukan untuk menciptakan kondisi operasi yang optimal, terutama untuk reaksi kimia yang memerlukan syarat khusus. Keterbatasan dalam sistem utilitas dapat mengganggu efektivitas produksi, sehingga pemeliharaan dan keandalan unit-unit ini sangat penting. Pada prarancangan pabrik γ -valerolactone (GVL) dari limbah TKKS, unit utilitas yang direncanakan mencakup sebagai berikut:

1. Unit Pengolahan dan Pengadaan Air
2. Unit Pengadaan *Steam*
3. Unit Pengadaan Listrik
4. Unit Pengadaan Bahan Bakar
5. Unit Pengolahan Limbah

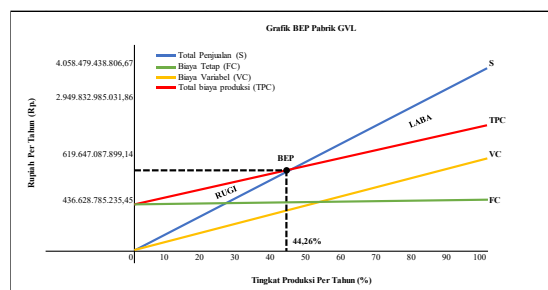
Sumber kebutuhan air berasal dari Sungai Barito. Kebutuhan air umpan boiler sebanyak 485.552,861 kg/jam, air proses 60.178,656 kg/jam dan air sanitasi/air bersih 870,000 kg/jam. Total kebutuhan steam pada proses produksi sebanyak 485.552,861 kg/jam. Sumber tenaga listrik di pabrik ini diperoleh dari Perusahaan Listrik Negara (PLN), dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) dengan total kebutuhan listrik 1838,959 kW/jam termasuk

dengan 20% untuk faktor keamanan. Kebutuhan bahan bakar yang diperlukan yaitu batubara anthracite 32.751,554 kg/jam untuk memanaskan boiler dan bahan bakar diesel sebanyak 226,119 kg/jam untuk sebagai kebutuhan listrik sekunder.

5. Evaluasi Ekonomi

Evaluasi ekonomi dilakukan untuk menghitung kebutuhan biaya, estimasi biaya produksi per kg produk GVL. Evaluasi ini juga memberikan estimasi kebutuhan investasi modal awal, besaran laba yang diperoleh, lama waktu pengembalian modal dan waktu yang diperlukan untuk mencapai titik impas. Modal investasi digunakan sebagai dasar pendirian dan pengoperasian pabrik.

Komponen yang dihitung pada evaluasi ekonomi terdiri dari *Total Capital Investment* (TCI) adalah modal keseluruhan untuk mendirikan dan mengoperasikan pabrik. *Total Production Cost* (TPC) mencakup seluruh biaya operasional produksi. Keuntungan (*profit*) diperoleh dari selisih pendapatan dan modal awal yang diinvestasikan. *Pay Out Time* (POT) adalah waktu pengembalian modal. *Rate of Investment* (ROI) mengukur persentase profit yang diperoleh terhadap modal. *Break Even Point* (BEP) adalah titik saat pendapatan setara dengan biaya, tanpa untung atau rugi. Gambar 2 memuat grafik BEP sedangkan Tabel 8 memuat kesimpulan hasil evaluasi ekonomi dari pendirian pabrik GVL.



Gambar 2. Grafik BEP Pabrik GVL

Tabel 8. Kesimpulan Evaluasi Ekonomi

No.	Komponen	Nilai	Syarat kelayakan	Kesimpulan
1.	FCI (Rp)	2.531.354.463.621,53	-	-
2.	TCI (Rp)	2.978.064.074.848,86	-	-
3.	TPC (Rp)	2.949.832.985.031,86	-	-
4.	Profit (Rp)	997.781.808.397,34	-	-
5.	ROI	39,42%	Lebih besar dari suku bunga bank (12%)	Layak didirikan
6.	POT	2,02 tahun	Maksimal setengah dari umur pabrik (umur pabrik 10 tahun)	Layak didirikan
7.	BEP	44,26%	Dalam rentang 40% hingga 60%	Layak didirikan



6. Kesimpulan

Berdasarkan uraian dan perhitungan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Lokasi pabrik GVL direncanakan akan dibangun di kawasan industri terintegrasi yang terletak di Jejangkit, Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan.
2. Kapasitas produksi pabrik ini direncanakan mencapai 55.000 ton per tahun.
3. Bahan baku yang diperlukan adalah 17.034,892 kg/jam atau 149.225,661 ton/tahun limbah TKKS, dengan hasil produk GVL sebesar 97%.
4. Pabrik akan beroperasi secara kontinyu selama 330 hari per tahun, dengan operasional 24 jam per hari.
5. Bentuk badan usaha yang akan didirikan adalah perseroan terbatas (PT), dengan jumlah karyawan yang diperlukan sebanyak 163 orang.
6. Evaluasi ekonomi pabrik GVL menunjukkan hasil sebagai berikut:
 - *Total Capital Investment* (TCI) sebesar Rp 2.978.064.074.848,86
 - *Total Production Cost* (TPC) sebesar Rp 2.949.832.985.031,86
 - Laba bersih sebesar Rp 997.781.808.397,34
 - Lama waktu pengembalian modal (*payback period*) selama 2,02 tahun
 - Laju pengembalian modal (ROI) sebesar 39,42%
 - Titik impas (*break-even point*) sebesar 44,26%
7. Berdasarkan evaluasi ekonomi, pabrik GVL yang menggunakan TKKS sebagai bahan baku dengan kapasitas 55.000 ton per tahun ini layak untuk didirikan.

Daftar Pustaka

- Al-Shaal, M. G., Wright, W. R. H. & Palkovits, R., 2012, "Exploring the Ruthenium-Catalysed Synthesis of γ -Valerolactone in Alcohols and Utilisation of Mild Solvent-Free Reaction Conditions", *Green Chemistry*, 14(5), 1260–1263. <https://doi.org/10.1039/c2gc16631c>
- Carlos Serrano Ruiz, J., 2009, "Application Data (63) Continuation of Application No. 12/490", 129(8).
- Du, X. L., Bi, Q. Y., Liu, Y. M., Cao, Y., He, H. Y. & Fan, K. N., 2012, "Tunable Copper-Catalyzed Chemoselective Hydrogenolysis of Biomass-Derived γ -Valerolactone into 1,4-Pentanediol or 2-Methyltetrahydrofuran", *Green Chemistry*, 14(4), 935–939. <https://doi.org/10.1039/c2gc16599f>
- Dutta, S., Yu, I. K. M., Tsang, D. C. W., Ng, Y. H., Ok, Y. S., Sherwood, J. & Clark, J. H., 2019, "Green Synthesis of Gamma-Valerolactone (GVL) through Hydrogenation of Biomass-Derived Levulinic Acid Using Non-Noble Metal Catalysts: A Critical Review", *Chemical Engineering Journal*, 372, 992–1006. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.199>
- Galletti, A. M. R., Antonetti, C., De Luise, V. & Martinelli, M., 2012, "A Sustainable Process for the Production of γ -Valerolactone by Hydrogenation of Biomass-Derived Levulinic Acid", *Green Chemistry*, 14(3), 688–694. <https://doi.org/10.1039/c2gc15872h>
- Gu, X. M., Zhang, B., Liang, H. J., Ge, H. B., Yang, H. M. & Qin, Y., 2017, "Pt/HZSM-5 Catalyst Synthesized by Atomic Layer Deposition for Aqueous-Phase Hydrogenation of Levulinic Acid to Valeric Acid", *Ranliao Huaxue Xuebao/Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 45(6), 714–722. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(17\)30035-X](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(17)30035-X)
- Hengne, A. M. & Rode, C. V., 2012, "Cu–ZrO₂ Nanocomposite Catalyst for Selective Hydrogenation of Levulinic Acid and Its Ester to γ -Valerolactone", *Green Chemistry*, 14(4), 1064–1072. <https://doi.org/10.1039/c2gc16558a>
- Kristiani, V. & Putro, J. N., 2018, "Prarencana Pabrik Produksi γ -Valerolactone (GVL) dari Levulinic Acid Kapasitas Produksi 73.007,94 Ton GVL/Tahun", *Galang Tanjung*, 1(2504), 1–9.
- Lin, C., Wu, H., Wang, J., Huang, J., Cao, F., Zhuang, W., Lu, Y., Chen, J., Jia, H. & Ouyang, P., 2020, "Preparation of 5-Hydroxymethylfurfural from High Fructose Corn Syrup Using Organic Weak Acid In Situ as Catalyst", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(10), 4358–4366. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b06602>
- Ma, C., Cai, B., Zhang, L., Feng, J. & Pan, H., 2021, "Acid-Catalyzed Conversion of Cellulose into Levulinic Acid with Biphasic Solvent System", *Frontiers in Plant Science*, 12, 630807. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.630807>
- Pamungkas, B. W. B., Akbar, F., Rachmaniah, O. & Meka, W., 2024, "Pra-Desain Pabrik Gamma Valerolactone (GVL) dari Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit", *Jurnal Teknik ITS*, 13(1). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v13i1.121337>
- Piskun, A. S., van de Bovenkamp, H. H., Rasrendra, C. B., Winkelman, J. G. M. & Heeres, H. J., 2016, "Kinetic Modeling of Levulinic Acid Hydrogenation to γ -Valerolactone in Water Using a Carbon-Supported Ru Catalyst", *Applied Catalysis A: General*, 525, 158–167.





- <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2016.06.033>
Sari, E. P., Fani, P. A., Abubakar & Mukhlisien, 2020, "Proses Hidrolisis dan Fermentasi Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Bahan Baku Bioetanol", *Jurnal Inovasi Ramah Lingkungan (JIRL)*, 1(3), 16–19.
- Shukla, A., Kumar, D., Girdhar, M., Kumar, A., Goyal, A., Malik, T. & Mohan, A., 2023, "Strategies of Pretreatment of Feedstocks for Optimized Bioethanol Production: Distinct and Integrated Approaches", *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16(1), 1–33. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2>
- Yan, K., Lafleur, T., Wu, G., Liao, J., Ceng, C. & Xie, X., 2013, "Highly Selective Production of Value-Added γ -Valerolactone from Biomass-Derived Levulinic Acid Using Robust Pd Nanoparticles", *Applied Catalysis A: General*, 468, 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2013.08.037>

