

PRARANCANGAN PABRIK BIO-OIL DARI SERBUK KAYU MELALUI PROSES PIROLISIS CEPAT DENGAN KAPASITAS 20.000 TON/TAHUN

Intan Permatasari¹, Kamila Firda Nisa^{1,*}, Mengku Alamsyah Widya¹
Ansori Ansori¹, Istiqomah Rahmawati¹, Ditta Kharisma Yolanda Putri¹

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

*E-mail: kamilafirdanisa.3@gmail.com

Abstrak

Bio-oil merupakan bahan bakar cair hasil konversi biomassa lignoselulosa yang berpotensi sebagai substitusi bahan bakar fosil serta bahan baku industri kimia. Indonesia memiliki ketersediaan limbah serbuk kayu yang melimpah, khususnya di Provinsi Riau, namun pemanfaatannya masih belum optimal. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan prarancangan pabrik bio-oil dari serbuk kayu dengan menggunakan proses pirolisis cepat (fast pyrolysis). Pabrik dirancang dengan kapasitas produksi sebesar 20.000 ton per tahun dan direncanakan berlokasi di Provinsi Riau berdasarkan pertimbangan ketersediaan bahan baku, infrastruktur, dan aspek ekonomi. Proses produksi meliputi tahap persiapan bahan baku, reaksi pirolisis cepat pada suhu sekitar 500 °C dalam kondisi tanpa oksigen, pemisahan uap hasil pirolisis, serta proses kondensasi untuk menghasilkan bio-oil. Hasil perhitungan neraca massa dan neraca energi menunjukkan bahwa proses yang dirancang mampu menghasilkan bio-oil dengan rendemen yang tinggi. Evaluasi ekonomi menunjukkan bahwa pabrik memiliki nilai Total Capital Investment (TCI) sebesar Rp 515.991.040.292, Total Production Cost (TPC) sebesar Rp 301.759.445.113, dan laba bersih sebesar Rp 133.180.051.654. Selain itu, diperoleh nilai Pay Out Time (POT) sebesar 2,6 tahun, Rate of Return (ROR) sebesar 34,41%, serta Break Even Point (BEP) sebesar 45,0%. Berdasarkan hasil analisis teknis dan ekonomi tersebut, pabrik bio-oil dari serbuk kayu ini dinyatakan layak untuk didirikan dan berpotensi mendukung pengembangan energi terbarukan di Indonesia.

Kata kunci : Bio-oil, serbuk kayu, pirolisis cepat, biomassa, prarancangan pabrik

1. Pendahuluan

Peningkatan standar hidup masyarakat dan industrialisasi global telah memicu lonjakan kebutuhan energi yang selama ini bergantung pada sumber fosil. Namun, ketergantungan ini menghadapi tantangan serius berupa penipisan cadangan serta dampak lingkungan negatif, seperti emisi karbon dioksida, pemanasan global, dan pencemaran udara. Kondisi ini menuntut pengembangan sumber energi alternatif yang terbarukan dan berkelanjutan, di mana biomassa muncul sebagai solusi menjanjikan melalui pengembangan bio-oil (Amin et al., 2020).

Bio-oil merupakan cairan hasil pirolisis biomassa yang terdiri dari campuran senyawa organik kompleks dengan karakteristik karbon netral. Hal ini dikarenakan karbon yang dilepaskan saat pembakaran telah diserap sebelumnya oleh tanaman melalui fotosintesis. Salah satu bahan baku potensial adalah limbah lignoselulosa berupa serbuk gergaji kayu yang melimpah di Indonesia (Febriyanti et al., 2019). Secara kimia, bio-oil didominasi oleh senyawa turunan lignin, alkohol, dan asam organik dengan kandungan sulfur dan nitrogen yang sangat rendah (Uzwatania, 2017). Melalui teknologi fast pyrolysis pada suhu 400–600 °C dengan waktu tinggal singkat (0,5–2 detik), serbuk

gergaji dapat dikonversi menjadi bio-oil dengan efisiensi tinggi, di samping menghasilkan produk samping berupa biochar dan gas (Amin et al., 2020).

Indonesia memiliki potensi biomassa yang sangat besar, dengan produksi kayu olahan mencapai 68,22 juta m³ per tahun, di mana sekitar 10% di antaranya menjadi limbah serbuk gergaji (BPS, 2024). Studi menunjukkan bahwa serbuk kayu memiliki yield bio-oil yang lebih unggul dibandingkan bahan lain, yakni mencapai 65%, lebih tinggi daripada jerami oat (56,9%), jerami padi (44,4%), maupun mikroalga (39,99%) (Heo et al., 2010; Nuraini et al., 2022). Secara spesifik, Provinsi Riau menjadi wilayah strategis karena produksi kayu bulatnya yang mencapai 25,73 juta m³ pada tahun 2023, dengan pusat industri di Kabupaten Pelalawan, Siak, dan Indragiri Hulu (Statistik Kementerian Lingkungan Hidup Dan Kehutanan, 2023).

Orientasi pengembangan pabrik bio-oil ini ditujukan untuk pasar internasional, mengingat tingginya komitmen dekarbonisasi di Eropa dan Amerika Utara yang memicu permintaan besar dari perusahaan global seperti Alterra Energy, Arcelor Mittal, dan Total Energies. Di sisi lain, konsumsi domestik masih terbatas karena pemanfaatan limbah internal industri lain. Sejarah bio-oil sendiri telah



berkembang sejak krisis energi 1970-an (Mohan et al., 2006) dan mulai mencapai kematangan komersial pada era 2015-an melalui fasilitas skala besar seperti Empyro Plant di Belanda, Green Fuel Nordic di Finlandia, dan Pyrocell di Swedia (IEA Bioenergy, 2021; Muggen, 2019; Richters, 2021). Dengan ketersediaan bahan baku yang melimpah dan potensi ekspor yang prospektif, pendirian pabrik bio-oil berbasis serbuk gergaji kayu di Indonesia menjadi langkah strategis dalam mendukung transisi energi global dan memberikan nilai tambah pada limbah biomassa lokal.

2. Uraian Proses

Pemilihan proses pada prarancangan pabrik bio-oil ini dilakukan untuk memperoleh proses yang paling efisien dan sesuai dengan tujuan utama, yaitu memaksimalkan produksi bio-oil dari biomassa serbuk kayu. Secara umum, konversi biomassa lignoselulosa dapat dilakukan melalui pirolisis lambat, pirolisis cepat, dan gasifikasi, yang masing-masing memiliki karakteristik kondisi operasi dan distribusi produk yang berbeda.

Tabel 1. Parameter Operasi Berbagai Proses Produksi Bio-Oil

Proses	Parameter		
	T(°C)	t	(T/t)
Pirolisis Lambat	300	60 min	0,8
Pirolisis Menengah	450	20 s	5
Pirolisis Cepat	500	4,3 s	100
Lambat-Torefaksi	300	30 min	0,8

Tabel 2. Distribusi Produk dari berbagai Proses Produksi Bio Oil

Proses	Parameter		
	Bio-oil	Bio-char	Bio-gas
Pirolisis Lambat	30	35	35
Pirolisis Menengah	40	35	25
Pirolisis Cepat	66	15	19
Lambat-Torefaksi	36	49	15

Berdasarkan perbandingan pada Tabel 1 dan Tabel 2, pirolisis cepat dipilih karena menghasilkan rendemen bio-oil paling tinggi serta dapat dioperasikan pada tekanan atmosfer, sehingga lebih sederhana dan ekonomis untuk diterapkan pada skala industri.

Proses produksi bio-oil dari serbuk kayu gergaji dibagi menjadi tiga tahap utama, yaitu persiapan bahan baku, reaksi pirolisis cepat, dan pemisahan produk, sebagai berikut:

a. Tahap Persiapan Bahan Baku (Pretreatment)

Serbuk kayu gergaji kering disimpan di gudang bahan baku (F-211) pada suhu 25°C dan tekanan 1 atm. Kondisi ini dipilih untuk mencegah degradasi awal biomassa dan oksidasi. Serbuk kayu berukuran besar dialirkan menuju hammer mill (C-213) menggunakan belt conveyor (J-212) untuk proses pengecilan ukuran. Hammer mill menghancurkan biomassa hingga lolos ayakan 60 mesh, menghasilkan ukuran partikel sekitar ± 250 mikrometer yang sesuai untuk proses fast pyrolysis. Material kemudian diseleksi menggunakan screening (A-214) untuk memastikan keseragaman ukuran. Serbuk kayu yang memenuhi spesifikasi dialirkan menuju reaktor menggunakan screw conveyor (J-215). Ukuran partikel yang seragam dipilih untuk menjamin kestabilan fluidisasi, perpindahan panas yang baik, serta mencegah aglomerasi dan penyumbatan di dalam reaktor.

b. Tahap Fast Pyrolysis

Serbuk kayu dari screw conveyor (J-215) diumpukan ke reaktor fluidized bed (R-210). Proses pirolisis dilakukan pada suhu operasi sekitar 500°C dan tekanan 1 atm. Reaktor difluidisasi menggunakan gas nitrogen panas yang berasal dari tangki nitrogen (F-111), dipanaskan di furnace (Q-110), dan dialirkan dengan bantuan blower (L-112). Nitrogen berfungsi sebagai media penghantar panas sekaligus gas inert untuk mencegah reaksi oksidasi. Pada kondisi ini, biomassa mengalami dekomposisi termal cepat menjadi uap organik, gas non-kondensabel, dan padatan berupa char. Padatan berat (char kasar) dikeluarkan dari reaktor dan didinginkan menggunakan cooling screw conveyor (J-219) sebelum ditampung pada tangki penyimpanan char (F-220). Sementara itu, campuran uap dan partikel halus dialirkan menuju tahap pemisahan.

c. Tahap Pemisahan dan Pemurnian Produk

Produk keluaran reaktor dialirkan ke expansion valve (K-216) untuk menurunkan tekanan dari sekitar 3 atm menjadi 1 atm. Penurunan tekanan ini bertujuan meningkatkan efisiensi pemisahan padatan serta mencegah kondensasi dini uap organik. Campuran kemudian masuk ke cyclone separator (H-217) untuk memisahkan char halus dari fase gas. Gas hasil pemisahan selanjutnya dialirkan ke bag filter (H-218) sebagai pemisahan lanjutan partikel padat berukuran sangat halus. Uap organik bersih kemudian dikondensasikan secara bertahap menggunakan dua unit kondensor seri (E-311A dan E-311B). Sistem kondensasi bertingkat ini bertujuan mengendalikan fraksinasi senyawa bio-oil, mencegah pembentukan emulsi, serta meningkatkan rendemen cairan. Produk



cair hasil kondensasi dialirkan ke flash drum (H-310) untuk memisahkan bio-oil dari gas non-kondensabel seperti CO, CO₂, H₂, CH₄, dan N₂. Gas dialirkan ke unit pengolahan limbah, sedangkan bio-oil cair didinginkan menggunakan cooler (E-312) hingga suhu sekitar 30°C sebelum diproses lebih lanjut. Bio-oil kemudian dialirkan ke decanter (H-313) untuk pemisahan fase berdasarkan perbedaan densitas, menghasilkan fase organik (bio-oil) dan fase akuatik. Fase bio-oil dipompa menggunakan pompa sentrifugal (L-314) menuju tangki penyimpanan bio-oil (F-315), sementara fase akuatik dan pengotor dialirkan ke unit pengolahan limbah.

3. Neraca Massa & Neraca Energi

Pabrik dirancang beroperasi selama 330 hari per tahun dengan waktu operasi 24 jam per hari. Berdasarkan perhitungan neraca massa, kebutuhan bahan baku serbuk kayu sebesar 5396,88 kg/jam dan menghasilkan produk bio-oil sebesar 2525,2525 kg/jam. Neraca energi menunjukkan bahwa kebutuhan panas utama berasal dari reaktor pirolisis dan sistem utilitas, yang sebagian dapat dipenuhi dari pembakaran gas pirolisis.

4. Utilitas

Keberhasilan operasi pabrik bio-oil dari serbuk kayu gergaji sangat ditentukan oleh ketersediaan sistem utilitas yang andal. Utilitas berperan sebagai penyedia energi, media perpindahan panas, serta sarana pendukung operasi yang memungkinkan unit proses utama bekerja secara kontinu dan terkendali. Oleh karena itu, perancangan utilitas dilakukan dengan mempertimbangkan kebutuhan proses fast pyrolysis yang melibatkan suhu tinggi, sistem pendinginan bertahap, serta pemisahan produk secara efisien.

Berdasarkan karakteristik unit proses yang digunakan, sistem utilitas pada pabrik ini meliputi pengolahan air, penyediaan nitrogen, pasokan tenaga listrik, penyediaan bahan bakar, dan pengolahan limbah

- Unit Pengolahan Air
- Unit Pengadaan Tenaga Listrik
- Unit Penyediaan Bahan Bakar
- Unit Pengolahan Limbah

Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa dan energi, kebutuhan utilitas pada pabrik bio-oil dari serbuk kayu gergaji meliputi air, tenaga listrik, dan bahan bakar. Kebutuhan air sanitasi sebesar 10,58 m³/hari atau 0,441 m³/jam, sedangkan kebutuhan air pendingin sebesar 331,38 m³/hari atau 13,81 m³/jam. Dengan demikian, total kebutuhan air pabrik adalah 341,97 m³/hari atau sekitar 14,25 m³/jam. Untuk mengantisipasi kehilangan air selama distribusi, digunakan faktor keamanan sebesar 20%, sehingga kebutuhan air sungai direncanakan sebesar 410,36

m³/hari.

Total kebutuhan daya listrik untuk unit proses sebesar 92,58 hp atau sekitar 69,0 kWh, sementara kebutuhan listrik untuk penerangan dan pendingin ruangan sebesar 70,88 kWh. Dengan penambahan faktor keamanan sebesar 20%, kebutuhan listrik total menjadi sekitar 85,05 kWh. Oleh karena itu, direncanakan penggunaan generator set dengan kapasitas 86,3 kWh untuk menjamin kontinuitas operasi pabrik.

Bahan bakar digunakan untuk mendukung operasi generator set. Jenis bahan bakar yang digunakan adalah minyak diesel, dengan kebutuhan sebesar 8,15 liter/jam. Untuk menjamin ketersediaan bahan bakar, disediakan tangki penyimpanan dengan kapasitas setara 750 barrel, yang mampu mencukupi kebutuhan operasi selama 15 hari.

5. Evaluasi Ekonomi

Evaluasi ekonomi dilakukan untuk menilai kelayakan finansial pendirian pabrik berdasarkan hasil perancangan yang telah disusun. Penilaian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan pabrik dalam menutup investasi awal, membiayai operasional, serta menghasilkan keuntungan yang layak. Parameter yang digunakan meliputi Total Capital Investment (TCI), Total Production Cost (TPC), Pay Out Time (POT), Rate of Investment (ROI), dan Break Even Point (BEP).

Total Capital Investment (TCI) menunjukkan total dana yang diperlukan untuk membangun dan menjalankan pabrik pada tahap awal, yang terdiri dari modal tetap dan modal kerja. Selama operasi, beban biaya yang dikeluarkan dirangkum dalam Total Production Cost (TPC), yang mencakup seluruh biaya produksi dan biaya penunjang.

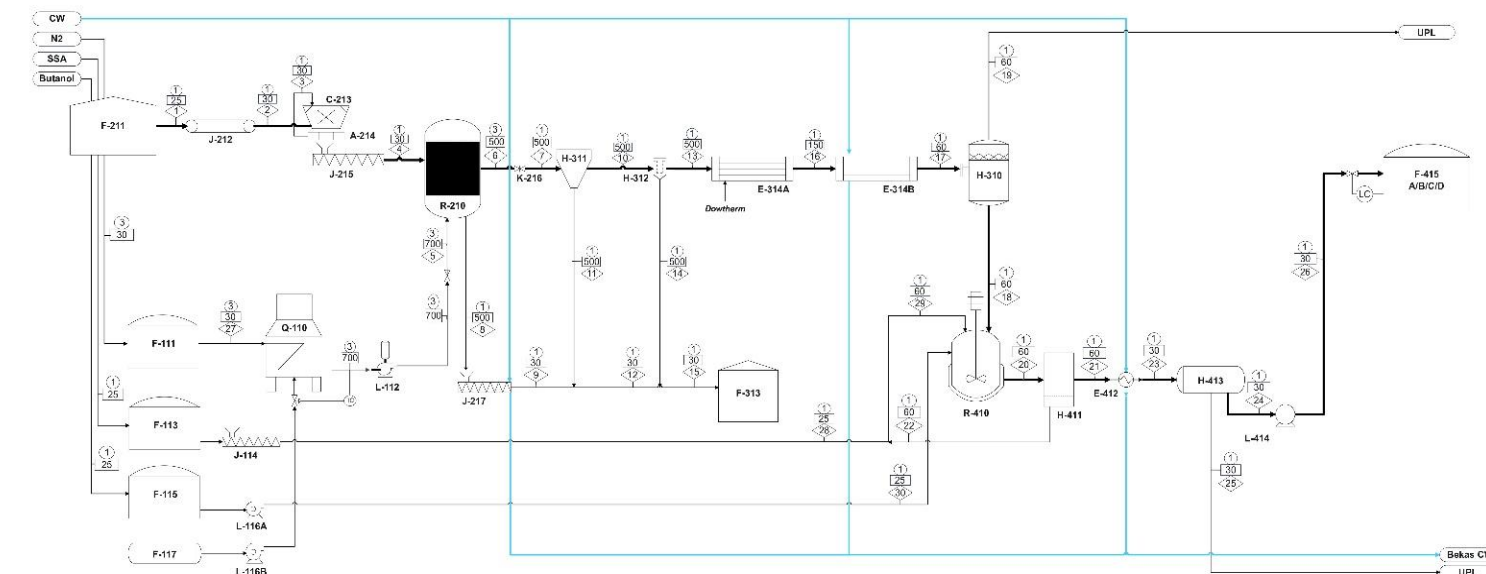
Kelayakan investasi selanjutnya dianalisis melalui Pay Out Time (POT), yaitu waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan investasi dari laba bersih yang dihasilkan. Tingkat keuntungan investasi dinyatakan dengan Rate of Investment (ROI), yang dibandingkan dengan suku bunga bank sebagai tolak ukur kelayakan. Dalam studi ini digunakan suku bunga Bank BRI sebesar 8,4%, sehingga investasi dinilai layak apabila nilai ROI lebih tinggi dari nilai tersebut.

Selain itu, Break Even Point (BEP) digunakan untuk menunjukkan tingkat produksi saat pendapatan sama dengan biaya total. Pabrik dinyatakan layak secara ekonomi apabila BEP berada pada kisaran 40–50% dari kapasitas produksi maksimum. Hasil perhitungan evaluasi ekonomi selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel sebagai dasar penarikan kesimpulan kelayakan pabrik.





PROCESS FLOW ENGINEERING DIAGRAM
PRA-RANCANGAN PABRIK *BIO-OIL* DARI SERBUK KAYU MELALUI PROSES PIROLISIS CEPAT
KAPASITAS 20000 TON/TAHUN



KETERANGAN ALAT	
KODE	NAMA ALAT
Q-10	<i>Burner</i>
F-11	Tangki Penyimpanan Nitrogen
L-112	<i>Blower</i>
F-113	Tangki Penyimpanan SSA
J-114	<i>Screw Conveyor</i>
F-115	Tangki Penyimpanan Beizindol
L-116	<i>Pompa Centrifugal</i>
F-117	Tangki Bahan Bakar
R-210	Reaktor Pirlisis
F-211	Gudang Penyimpanan Bahan Bakar
J-212	<i>Belt Conveyor</i>
C-213	<i>Hammer Mill</i>
A-214	<i>Screenner</i>
J-215	<i>Screw Conveyor</i>
K-216	<i>Expander Valve</i>
J-217	<i>Cooling Screw Conveyor</i>
H-310	<i>Flash Drum</i>
H-311	<i>Cyclone</i>
H-312	<i>Bag Filter</i>
F-313	Tangki Penyimpanan Char
F-314	Kondensor
R-410	Reaktor Esterifikasi
H-412	<i>Filter Press</i>
H-413	<i>Cooler</i>
L-414	<i>Pompa Centrifugal</i>
F-415	Tangki Penyimpanan Produk

KETERANGAN SIMBOL	
SIMBOL	KETERANGAN
	Tekanan (stm)
	Suhu (C)
	Nomor Arus
	Arus Utama
	Indikator Elektrik

INSTRUMEN KONTROL	
SIMBOL	KETERANGAN
TC	Kontrol Temperatur
PC	Kontrol Tekanan
LC	Kontrol Level Liquid

PRA-RANCANGAN FABRIK BIO-OIL DARl SERBUK KAYU MELALUI PROSES PIROLISIS CEPAT
KAPASITAS 20.000 TON/TAHUN

Jatna Permatasari 211910401008
Kamilia Firda Nisa* 211904001054
Mengku Alamsyah Widya 211910401082

 **PROGRAM STUDI S1 TEKNIK KIMIA**
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2025

Komponen	Nomer Arus (Kg/jam)																														
	Kecara Massa																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
CH ₄ 10H ₂ O 40	5396.8	5396.8	269.84	5396.8		8.7642	8.7642	867.64	867.64	0.0877	8.6765	876.31		0.0877	876.39																
N ₂					539.68	539.68	539.68						539.68			539.68	539.68		539.68								1025.4				
Char						1.3758	1.3758	136.20	136.20		0.0138	1.3620	137.56		0.0138	137.57															
C ₂ H ₄ O ₂						345.32	345.32					345.32				345.32	345.32	345.20	0.1231												
C ₂ H ₆ O						170.39	170.39					170.39	170.39			170.39	170.39	170.33	0.0606	170.33	170.33			170.33	17.033			17.033			
CH ₃ COOH						631.14	631.14					631.14	631.14			630.26	0.8857	29.263	29.263					29.263	29.263			29.263			
C ₂ H ₄ O						351.67	351.67					351.67	351.67			351.67	351.67	351.54	0.1258	351.54	351.54			351.54	351.54			351.54			
CH ₃ OH						187.67	187.67					187.67	187.67			187.67	0.0678	187.60	187.60					187.60	18.760		168.84	18.760			
C ₂ H ₄ O ₂						123.15	123.15					123.15	123.15			123.15	123.15	123.10	0.0440	123.10	123.10			123.10	123.10			123.10			
C ₂ H ₄ O ₂						95.588	95.588					95.58	95.588			95.588	95.588	95.554	0.0343	95.554	95.554			95.554	95.554			95.554			
C ₂ H ₄ O						46.682	46.682					46.682	46.682			46.682	46.682	46.665	0.0166	46.682	46.682			46.682	46.665			46.665			
CH ₄						71.645	71.645					71.645	71.645			71.645	71.645			71.641											
CO						336.41	336.41					336.41	336.41			336.41	336.41			336.64											
CO ₂						782.28	782.28					782.28	782.28			782.28	782.28			782.28											
H ₂ O						1246.6	1246.6					1246.6	1246.6			1246.6	1246.6	1246.1	0.4430		1530.0	1530.0			1530.0	153.00	1377.0	153.00			
C ₂ H ₅ OH																				430.20	430.20			430.20	43.020	387.18	43.020				
CH ₃ COOC ₂ H ₅																				1830.3	1530.3			1830.3	1647.2	183.03	1647.2				
BSA																				116.18		112.69									
Total	5396.8	5396.8	269.84	5396.8	539.68	4938.4	4938.4	1003.8	1003.8	4928.3	10.038	1013.8	4928.2	0.1014	1013.9	4928.2	4928.2	3196.4	1731.8	4910.84	4794.6	112.69	112.69	4794.6	2525.2	2269.4	2525.2	1025.4	116.18	116.18	1598.2

Gambar 1. PFD Pabrik Bio-Oil

Tabel 3. Evaluasi Ekonomi Pabrik

Parameter	Nilai
Total modal	Rp 515.991.040.292
Biaya produksi	Rp 301.759.445.113
POT	2,6 tahun
ROR	34,41%
BEP	45,0%

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan pembahasan yang telah disajikan pada Bab I hingga Bab VI, maka dapat dirumuskan beberapa kesimpulan utama dari pra-rancangan pabrik bio-oil ini sebagai berikut:

- Pra-rancangan pabrik bio-oil direncanakan dengan kapasitas produksi sebesar 20.000 ton per tahun;
- Lokasi pendirian pabrik ditetapkan di Kabupaten Pelalawan, Provinsi Riau, dengan mempertimbangkan ketersediaan bahan baku, infrastruktur pendukung, dan kemudahan distribusi;
- Bahan baku utama berupa serbuk kayu dibutuhkan sebesar 42743,3 ton per tahun untuk memenuhi kapasitas produksi yang telah ditetapkan;
- Secara umum, rangkaian proses produksi terdiri atas tiga tahapan utama, yaitu tahap perlakuan awal bahan baku, tahap reaksi, serta tahap pemisahan dan pemurnian produk;
- Hasil evaluasi ekonomi menunjukkan bahwa pabrik layak untuk direalisasikan dengan indikator sebagai berikut:
 - Annual Cash Flow (ACF) sebesar 34,8%
 - Pay Out Time (POT) selama 2,6 tahun,
 - Rate of Return (ROR) sebesar 34,41%,
 - Break Event Point (BEP) sebesar 45,0%.

Berdasarkan tinjauan aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan, pra-rancangan pabrik bio-oil ini dinyatakan layak untuk didirikan.

Daftar Pustaka

- Amin, R. R., Sova, R. R., Laily, D. I., & Maharani, D. K. (2020). Studi Potensi Limbah Tembakau Menjadi Bio-Oil Menggunakan Metode Fast-Pyrolysis Sebagai Energi Terbarukan. *Jurnal Kimia Riset*, 5(2), 151–165. <https://doi.org/10.20473/jkr.v5i2.22513>
- Febriyanti, F., Fadila, N., Sanjaya, A. S., Bindar, Y., & Irawan, A. (2019). Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menjadi Bio-Char, Bio-Oil Dan Gas Dengan Metode Pirolisis Utilization of Empty Fruit Bunches Waste Into Bio-Char, Bio-Oil and

Gases With Pyrolysis Method. *Jurnal Chemurgy*, 3(2), 12–17.

Heo, H. S., Park, H. J., Park, Y. K., Ryu, C., Suh, D. J., Suh, Y. W., Yim, J. H., & Kim, S. S. (2010). Bio-oil production from fast pyrolysis of waste furniture sawdust in a fluidized bed. *Bioresource Technology*, 101(1), S91–S96. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.003>

IEA Bioenergy. (2021). Polar and Non-Polar Components in Fast Pyrolysis Bio-Oil in relation to REACH registration. In *Technology Collaboration Programme*.

Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-Oil: A Critical Review. *Energy and Fuels*, 20(3), 848–889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>

Muggen, G. (2019). *Fast Pyrolysis Bio-Oil: Commercial Production & Applications TC Biomass Chicago 2019*.

Nuraini, N., Osman, N. B., & Astuti, E. (2022). Bio-Oil Production Using Waste Biomass via Pyrolysis Process: Mini Review. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 11(1), 37–49. <https://doi.org/10.15294/jbat.v11i1.37171>

Richters, M. (2021). Advanced Biofuels from Refinery Processing of Fast Pyrolysis Bio-Oil. *13th Oil Forum of the Energy Community*.

Statistik, B. P. (2024). *Statistik Produksi Kehutanan 2023*. 12, 11. <https://www.bps.go.id/id/publication/2022/07/29/e6e4600abae56ef5d4507463/statistik-produksi-kehutanan-2021.html>

Statistik Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan: Vol. IX (p. Pusat Data dan Informasi Kementerian Lingkungan Hi). (2023).

Uzwatania, F. (2017). Teknologi Proses Bio Oil dari Mikroalga sebagai Energi Alternatif Process Technology of Microalgae Bio Oil as Alternatif Energy Source. *Jurnal Agroindustri Halal*, 3(1), 74–79.

