

No : TA/TK/2025/

**PRA RANCANGAN PABRIK KARBON AKTIF
DARI CANGKANG KELAPA SAWIT DENGAN AKTIVASI KIMIA (KOH)**

PADA KAPASITAS 12.000 METRIK TON/TAHUN

PRARANCANGAN PABRIK

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat Untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Kimia



Diajukan Oleh:

Nama : Fajaruddin Al Hafidh Eka P.

Nama : Bima Panjiwinata

Nim : 20521132

Nim : 20521136

**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

YOGYAKARTA

2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**PRA RANCANGAN PABRIK KARBON AKTIF
DARI CANGKANG KELAPA SAWIT DENGAN AKTIVASI KIMIA (KOH)
PADA KAPASITAS 12.000 METRIK TON/TAHUN**

PRARANCANGAN PABRIK

Nama : Fajaruddin Al Hafidh Eka P.

NIM : 20521132

Nama : Bima Panjiwinata

NIM : 20521136



Yogyakarta, 5 Mei 2025

Pembimbing

Dr. Ifa Puspasari, S.T., M.Eng.

NIP. 155210506

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN HASIL

PRA RANCANGAN PABRIK KARBON AKTIF

DARI CANGKANG KELAPA SAWIT DENGAN AKTIVASI KIMIA (KOH)

PADA KAPASITAS 12.000 METRIK TON/TAHUN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Fajaruddin Al Hafidh Eka P.

NIM : 20521132

Nama : Bima Panjiwinata

NIM : 20521136



Yogyakarta, 5 Mei 2025

Menyatakan bahwa seluruh hasil Prarancangan Pabrik ini adalah hasil karya sendiri. Apabila kemudian hari terbukti bahwa ada beberapa bagian dari karya ini adalah bukan hasil karya sendiri, maka saya siap menanggung resiko dan konsekuensi apapun.

Demikian surat pernyataan ini saya buat, semoga dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.



Fajaruddin Al Hafidh Eka P.

NIM. 20521132



Bima Panjiwinata

NIM. 20521136

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI
PRA RANCANGAN PABRIK KARBON AKTIF
DARI CANGKANG KELAPA SAWIT DENGAN AKTIVASI KIMIA (KOH)
PADA KAPASITAS 12.000 METRIK TON/TAHUN
PRARANCANGAN PABRIK

Oleh :

Nama : Fajaruddin Al Hafidh Eka P.

Nama : Bima Panjiwinata

Nim : 20521132

Nim : 20521136

Telah Dipertahankan di Depan Sidang Penguji sebagai Salah Satu Syarat untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Kimia Konsentrasi Teknik Kimia Program
Studi Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 21 Mei 2025

Tim Penguji,

Dr. Ifa Puspasari, S.T., M.Eng.

Ketua



19 - 06 - 2025

Dr. Khamdan Cahyari, S.T., M.Sc.

Penguji I



Muflih Arisa Adnan, S.T., M.Sc., Ph.D

Penguji II



Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Kimia

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia



Prof. Dr. Sholeh Ma'mun, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 995200445

KATA PENGANTAR



Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan kesehatan dan keimanan, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir berjudul “Pra-Rancangan Pabrik Karbon Aktif dari Cangkang Teraktivasi KOH dengan Kapasitas 12.000 Ton/Tahun.”

Penyusunan laporan ini bertujuan untuk memenuhi salah satu persyaratan akademik guna meraih gelar Sarjana Teknik Kimia. Tugas Akhir ini merupakan bagian dari rangkaian kegiatan akademik yang wajib ditempuh oleh setiap mahasiswa Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dalam proses penyusunan laporan ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT, atas rahmat dan karunia-Nya sehingga laporan ini dapat terselesaikan.
2. Kedua orang tua serta seluruh keluarga tercinta yang selalu memberikan dukungan, baik secara finansial, motivasi, maupun semangat dalam menyelesaikan laporan ini.
3. Ibu Dr. Ifa Puspasari, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir Prodi Teknik Kimia Universitas Islam Indonesia Yogyakarta, atas bimbingan, arahan, dan masukan yang telah diberikan.
4. Teman-teman dari Program Studi Teknik Kimia UII 2020 yang selalu memberikan support mental, pikiran, dan materi.

5. Dan untuk semua pihak yang telah membantu dan tidak kami sebutkan satu persatu yang telah membantu selama melakukan penyusunan laporan ini kami mengucapkan terima kasih.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat berbagai kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan masukan dan saran dari berbagai pihak guna mendukung perbaikan dan perkembangan ke arah yang lebih baik. Demikianlah laporan Tugas Akhir ini disusun, semoga dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang membacanya. Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Yogyakarta, 5 Mei 2025

Fajaruddin Al Hafidh Eka Pribadi

Bima Panjiwinata

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING.....	ii
LEMBAR KEASLIAN HASIL	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
ABSTRAK.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	
1. 1 Latar Belakang	1
1. 2 Kapasitas Pabrik.....	3
1. 3 Tinjauan Pustaka.....	14
1. 4 Tinjauan Kinetika dan Termodinamika	23
BAB II PERANCANGAN PRODUK	
2. 1 Spesifikasi Produk	31
2. 2 Spesifikasi Bahan Baku dan Pendukung.....	33
2. 3 Pengendalian Kualitas.....	37
BAB III PERANCANGAN PROSES	
3. 1 Diagram Alir Kualitatif.....	43
3. 2 Diagram Alir Kuantitatif.....	44
3. 3 Uraian Proses	45
3. 4 Spesifikasi Alat	48
3. 5 Neraca Massa	80
BAB IV PERANCANGAN PABRIK	
4. 1 Lokasi Pabrik	86
4. 2 Tata Letak Pabrik.....	90
4. 3 Tata Letak Mesin	96
4. 4 Jarak Aman dari Reaktor	99
4. 5 Organisasi Perusahaan	100
BAB V UTILITAS	
5. 1 Utilitas.....	119
BAB VI EVALUASI EKONOMI	
6. 1 Evaluasi Ekonomi	127
BAB VII PENUTUP	
7. 1 Kesimpulan	154
7. 2 Saran	155
 DAFTAR PUSTAKA	 157
LAMPIRAN	165

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Data Impor Karbon Aktif di Indonesia Periode 2010-2021	4
Tabel 1.2 Data Ekspor Karbon Aktif di Indonesia Periode 2010-2021.....	5
Tabel 1.3 Data Penyedia karbon Aktif di Indonesia.....	6
Tabel 1.4 Data Konsumsi Karbon Aktif di Indonesia Periode 2009-2014.....	7
Tabel 1.5 Daftar Perusahaan Kelapa Sawit di Provinsi Kalimantan Parat.....	10
Tabel 1.6 Ketersediaan Palm Oil Shell / Cangkang Kelapa Sawit.....	11
Tabel 1.7 Data Kapasitas Terpasang Pabrik Karbon Aktif di.....	12
Tabel 1.8 Aplikasi Karbon AKtif di Berbagai Bidang	18
Tabel 1.9 Kondisi Operasi dan Variasi Proses Karbonisasi	20
Tabel 1.10 Perbandingan Aktivasi Fisika dan Kimia	22
Tabel 2.1 Sifat Fisik, Kimia dan Informasi Keselamatan Produk.....	31
Tabel 2.2 Sifat Fisik, Kimia dan Informasi Keselamatan Bahan Baku.....	33
Tabel 2.3 Sifat Fisik, Kimia dan Informasi Keselamatan Bahan Pendukung	34
Tabel 2.4 Sifat Fisik, Kimia dan Informasi Keselamatan Bahan KOH	35
Tabel 3.1 Spesifikasi Tempat Penyimpanan Bahan Baku	48
Tabel 3.2 Spesifikasi Rotary Dryer	49
Tabel 3.3 Spesifikasi Jaw Crusher	51
Tabel 3.4 Spesifikasi Rotary Kiln	52
Tabel 3.5 Spesifikasi Mixer.....	54
Tabel 3.6 Spesifikasi Rotary Kiln (2).....	56
Tabel 3.7 Spesifikasi Rotary Cooler.....	58
Tabel 3.8 Spesifikasi Horizontal Belt Filter	60
Tabel 3.9 Spesifikasi Rotary Dryer (2)	62
Tabel 3.10 Spesifikasi Hammer Mill	64
Tabel 3.11 Spesifikasi Screener	65
Tabel 3.12 Spesifikasi Silo	66
Tabel 3.13 Spesifikasi Heat Exchanger.....	67
Tabel 3.14 Spesifikasi Heat Exchanger (2)	68
Tabel 3.15 Spesifikasi Bucket Elevator	69

Tabel 3.16 Spesifikasi Alat Transportasi Padatan	70
Tabel 3.17 Spesifikasi Alat Transportasi Padatan (2).....	71
Tabel 3.18 Spesifikasi Alat Transportasi Padatan (3).....	72
Tabel 3.19 Spesifikasi Alat Transportasi Padatan (4).....	73
Tabel 3.20 Spesifikasi Alat Transportasi Padatan (5).....	74
Tabel 3.21 Spesifikasi Alat Transportasi Cairan	75
Tabel 3.22 Spesifikasi Alat Transportasi Cairan (2).....	76
Tabel 3.23 Spesifikasi Alat Penyimpanan Padatan	77
Tabel 3.24 Spesifikasi Alat Penyimpanan Padatan (2).....	78
Tabel 3.25 Spesifikasi Alat Penyimpanan Padatan (3).....	79
Tabel 3.26 Neraca Massa Total	80
Tabel 3.27 Neraca Massa di Rotary Dryer (RD-101)	81
Tabel 3.28 Neraca Massa di Jaw Crusher (C-101).....	81
Tabel 3.29 Neraca Massa di Rotary Kiln (R-101).....	82
Tabel 3.30 Neraca Massa di Belt Conveyor + Screener (BC Scr-101).....	83
Tabel 3.31 Neraca Massa di Mixer (M-101)	83
Tabel 3.32 Neraca Massa di Rotary Kiln (R-102).....	83
Tabel 3.33 Neraca Massa di Rotary Cooler (RC-101)	84
Tabel 3.34 Neraca Massa di Horizontal Belt Filter (HBF-101)	84
Tabel 3.35 Neraca Massa di Rotary Dryer (RD-102)	84
Tabel 3.36 Neraca Massa di Hammer Mill (C-102).....	85
Tabel 3.37 Neraca Massa di Screener (VS-101)	85
Tabel 4.1 Rincian Luas Tanah Pabrik.....	93
Tabel 4.2 Jadwal Pembagian Shift Karyawan.....	111
Tabel 4.3 Penggolongan Jabatan, Jumlah Karyawan dan Besaran Gaji	114
Tabel 5.1 Jumlah Kebutuhan Air Domestik	121
Tabel 5.2 Jumlah Kebutuhan Air Proses	122
Tabel 5.3 Total Kebutuhan Air	122
Tabel 6.1 Indeks Harga Dari Tahun 1996 Hingga 2023	130
Tabel 6.2 Estimasi Harga Alat Proses	132
Tabel 6.3 Estimasi Harga Alat Utilitas	133

Tabel 6.4 Physical Plant Cost (PPC)	134
Tabel 6.5 Direct Plant Cost (DPC)	134
Tabel 6.6 Fixed Capital Investment (FCI).....	134
Tabel 6.7 Working Capital Investment.....	136
Tabel 6.8 Direct Manufacturing Cost.....	137
Tabel 6.9 Indirect Manufacturing Cost	137
Tabel 6.10 Fixed Manufacturing Cost.....	138
Tabel 6.11 Total Manufacturing Cost.....	138
Tabel 6.12 General Expenses	140
Tabel 6.13 Total Production Cost.....	140
Tabel 6.14 Annual Fixed Cost.....	144
Tabel 6.15 Annual Variable Cost.....	144
Tabel 6.16 Annual Regulated Expenses Cost.....	145
Tabel 6.17 Annual Sales Cost.....	145
Tabel 6.18 Risiko Pabrik.....	151

DAFTAR GAMBAR

Gambar 4.1 Peta Pemilihan Lokasi Pabrik di Kab. Landak.....	86
Gambar 4.2 Tata Letak Pabrik.....	95
Gambar 4.3 Tata Letak Mesin Proses.....	98
Gambar 4.4 Jarak Aman Dari Jangkauan Ledakan	99
Gambar 4.5 Struktur Organisasi Perusahaan	104
Gambar 6.1 Proyeksi Indeks Harga	131
Gambar 6.2 Grafik Evaluasi Ekonomi	150

ABSTRAK

Pra rancangan pabrik karbon aktif ini memiliki kapasitas produksi sebesar 12.000 metrik ton per tahun dengan waktu operasi 330 hari per tahun dan beroperasi selama 24 jam per hari. Bahan baku utama yang digunakan adalah cangkang kelapa sawit. Lokasi pendirian pabrik direncanakan di Kecamatan Ngabang, Kabupaten Landak, Provinsi Kalimantan Barat dengan luas lahan 17.545 m². Proses produksi dilakukan dalam reaktor tipe *Rotary Kiln* pada suhu 927°C dan tekanan atmosferik. Untuk mendukung proses operasional, dibutuhkan listrik sebesar 31.635 kW/bulan yang dipasok dari PLN serta didukung oleh generator cadangan. Analisis kelayakan ekonomi dilakukan dengan memperhitungkan total investasi tetap sebesar Rp789.314.336.849,00 dan modal kerja sebesar Rp431.136.396.954,00, dengan estimasi pendapatan tahunan mencapai Rp706.104.000.000,00. Dari hasil analisis diperoleh keuntungan sebelum pajak sebesar Rp338.210.172.799 dan setelah pajak sebesar Rp253.657.629.599. Parameter ekonomi menunjukkan nilai *Return on Investment (ROI)* sebelum pajak sebesar 42,85%, *Pay Out Time (POT)* selama 2,4 tahun, *Discounted Cash Flow Rate of Return (DCFRR)* sebesar 6,8%, *Break Even Point (BEP)* sebesar 32,42%, dan *Shut Down Point (SDP)* sebesar 13,85%. Berdasarkan hasil analisis tersebut, maka pabrik karbon aktif ini dinyatakan layak untuk didirikan dan dioperasikan.

Kata kunci: karbon aktif, cangkang kelapa sawit, KOH

ABSTRACT

Design of this activated carbon plant has a production capacity of 12.000 metric ton per year, operating 330 days annually and 24 hours per day. The main raw material used is palm shell. The plant is planned to be established in Ngabang District, Landak Regency, West Borneo Province, covering an area of 17.545 m². The production process is carried out in a Rotary Kiln reactor at a temperature of 927°C and atmospheric pressure. To support the operational process, an electricity supply of 31.635 kW per month is required, provided by PLN, and supported by a backup generator. An economic feasibility analysis was conducted by calculating a total fixed investment of Rp789.314.336.849.00 and working capital of Rp431,136,396,954.00, with estimated annual revenue reaching Rp706.104.000.000.00. The analysis resulted in a pre-tax profit of Rp338.210.172.799 and an after-tax profit of Rp253.657.629.599. Economic indicators show a Return on Investment (ROI) before tax of 42.85%, Pay Out Time (POT) of 2,4 years, Discounted Cash Flow Rate of Return (DCFRR) of 6,8%, Break Even Point (BEP) of 32,42%, and Shut Down Point (SDP) of 13,85%. Based on this analysis, the activated carbon plant is declared feasible to be established and operated.

Keywords: activated carbon, palm shell, KOH

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia dikenal sebagai negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia dengan kapasitas produksi mencapai 45 juta metrik ton di tahun 2022[1]. Pada tahun 2023, luas areal perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai 16,38 juta Ha yang tersebar di sebagian besar wilayah Indonesia. Tidak hanya itu, Indonesia juga merupakan negara dengan produksi *Crude Palm Oil* (CPO) terbesar di dunia. Pada periode 2022/2023, proyeksi CPO Indonesia bisa mencapai 45,5 juta metrik ton atau sekitar 58,93% dari produksi CPO global[2]. Besarnya angka produksi CPO di Indonesia juga diiringi dengan besarnya limbah yang dihasilkan dari proses produksi tersebut, seperti *Fibre*, *Empty Fruit Bunch*, *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dan cangkang kelapa sawit atau *shell*.

Cangkang kelapa sawit merupakan salah satu limbah dari proses produksi CPO yang jumlahnya cukup besar dengan ketersediaan yang berkelanjutan. Menurut Pardamean (2008), basis satu metrik ton tandan buah segar kelapa sawit akan menghasilkan 20–23% CPO, 5–7% *Palm Kernel Oil* (PKO) dan sisanya adalah limbah padat berupa tandan kosong 20–23%, serat kelapa sawit 10–12% dan cangkang kelapa sawit 7–9%[3]. Artinya, terdapat minimal 3,15 juta metrik ton cangkang kelapa sawit yang dihasilkan setiap tahunnya.

Melimpahnya ketersediaan cangkang kelapa sawit tersebut belum dapat di manfaatkan secara optimal. Hal ini terbukti dengan diekspornya 3 juta metrik ton cangkang kelapa sawit per tahun[4]. Data terbaru juga menunjukkan ekspor cangkang kelapa sawit sebesar 10 ribu metrik ton ke Jepang pada tanggal 3 September 2023[5]. Selain dimanfaatkan untuk ekspor, cangkang kelapa sawit umumnya dibakar secara terbuka untuk menghasilkan abu, meskipun produk tersebut memiliki nilai guna yang sangat terbatas. Proses pembakaran terbuka juga menimbulkan dampak terhadap lingkungan yang signifikan, terutama pada aspek pencemaran udara akibat emisi partikulat dan gas berbahaya[6]. Oleh karena itu, pengolahan limbah cangkang kelapa sawit memerlukan pendekatan yang lebih terintegrasi dan berkelanjutan. Salah satu solusi yang dinilai efektif untuk mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan nilai ekonomisnya adalah mengolah cangkang kelapa sawit menjadi karbon aktif.

Karbon aktif adalah material padat berstruktur pori dengan kandungan karbon yang sangat tinggi (berkisar antara 85–95%), yang telah melalui proses aktivasi. Proses aktivasi meningkatkan luas permukaan karbon aktif secara signifikan melalui pembentukan dan pengembangan pori-pori mikro, meso maupun makro sehingga menjadikannya sangat efektif sebagai adsorben dalam berbagai aplikasi industri[7]. Luas permukaan karbon aktif berkisar antara 300 hingga 3.500 m²/gram[8]. Semakin tinggi luas permukaan yang dimiliki oleh karbon aktif, maka kemampuannya sebagai adsorben akan semakin unggul. Dalam industri pangan, karbon aktif dapat berperan sebagai agen dekolorisasi,

penghilang rasa dan bau yang tidak diinginkan. Karbon aktif juga dapat berperan dalam sistem pemurnian air, baik untuk produksi air bersih atau air minum, hingga dalam proses pengolahan limbah untuk menghilangkan kontaminan organik dan anorganik[7].

Melihat tingginya peran karbon aktif dalam berbagai sektor industri, permintaan konsumen terhadap produk ini terus mengalami peningkatan. Berdasarkan data statistik, kebutuhan impor karbon aktif menunjukkan *trend* positif pada tiap tahunnya. Tercatat untuk tahun 2010-2021, rata-rata kebutuhan impor mencapai 19.616,0300 metrik ton/tahun dengan tingkat pertumbuhan tahunan rata-rata sebesar 10,33%[9]. Kondisi ini menunjukkan bahwa pembangunan pabrik karbon aktif, khususnya berbasis bahan baku cangkang kelapa sawit, memiliki peluang yang sangat prospektif. Selain dapat meningkatkan nilai jual dari limbah cangkang kelapa sawit, pendirian pabrik karbon aktif juga dapat mengurangi ketergantungan impor karbon aktif di Indonesia.

1.2 Penentuan Kapasitas Pabrik

Untuk menentukan kapasitas pabrik yang akan didirikan, ada beberapa hal penting yang harus dipertimbangkan, yaitu:

- a. Proyeksi kebutuhan karbon aktif di Indonesia
 - i. Impor

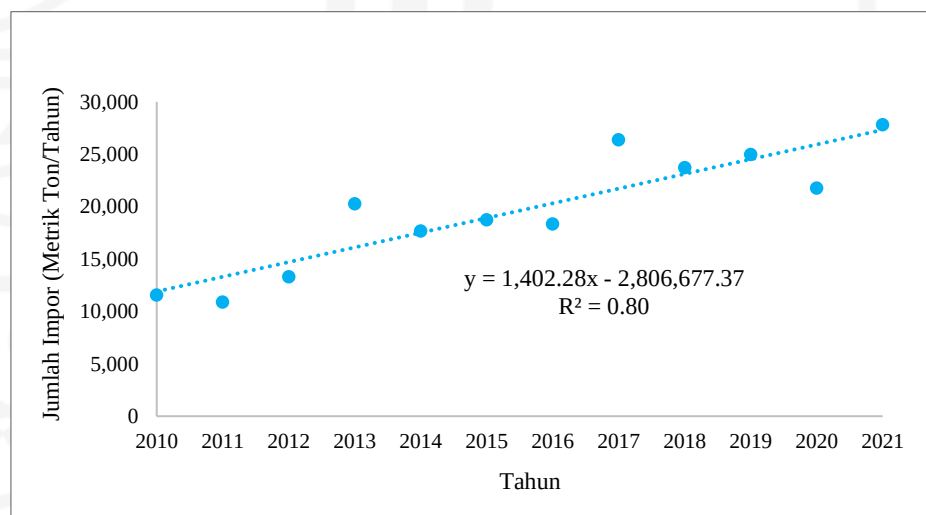
Data impor karbon aktif di Indonesia pada periode 2010-2021 dapat dilihat pada Tabel 1.1 berikut:

Tabel 1.1 Data Impor Karbon Aktif di Indonesia Periode 2010-2021

Tahun	Jumlah Impor (Metrik Ton/Tahun)
2010	11.555,11
2011	10.889,67
2012	13.300,77
2013	20.271,35
2014	17.684,50
2015	18.732,83
2016	18.352,66
2017	26.362,42
2018	23.721,70
2019	24.961,91
2020	21.761,02
2021	27.798,41

(UN Comtrade, 2023)[10]

Berdasarkan data pada Tabel 1.1, dilakukan metode regresi linear sehingga diperoleh sebuah persamaan, sebagaimana tertera pada Gambar 1.1 berikut:



Gambar 1. 1 Grafik Impor Karbon Aktif di Indonesia Periode 2010-2021

Dari Gambar 1.1 diperoleh persamaan linear:

$$y = 1.402,28x - 2.806.677,37$$

Proyeksi kebutuhan impor karbon aktif di Indonesia pada tahun 2033 adalah:

$$y = 1.402,28(2033) - 2.806.677,37$$

$$y = 44.157,87 \text{ metrik ton/tahun}$$

ii. Ekspor

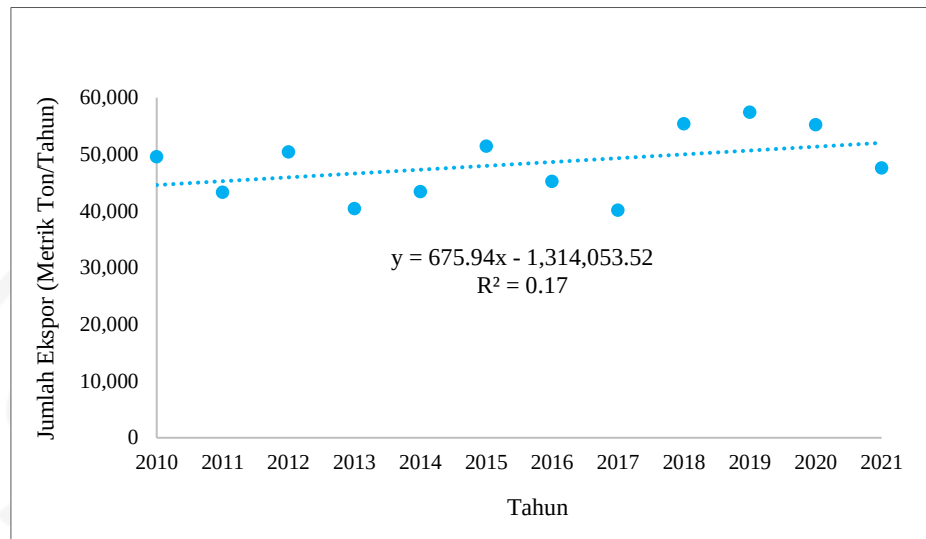
Data ekspor karbon aktif di Indonesia pada periode 2010-2021 dapat dilihat pada Tabel 1.2 berikut:

Tabel 1.2 Data Ekspor Karbon Aktif di Indonesia Periode 2010-2021

Tahun	Jumlah Ekspor (Metrik Ton/Tahun)
2010	49.582,79
2011	43.304,54
2012	50.450,42
2013	40.416,27
2014	43.447,77
2015	51.425,78
2016	45.267,83
2017	40.152,50
2018	55.385,31
2019	57.416,14
2020	55.227,87
2021	47.623,53

(UN Comtrade, 2023)[10]

Berdasarkan data pada Tabel 1.2, dilakukan metode regresi linear sehingga diperoleh sebuah persamaan sebagaimana tertera pada Gambar 1.2 berikut:



Gambar 1.2 Grafik Ekspor Karbon Aktif di Indonesia Periode 2010-2021

Dari Gambar 1.2 diperoleh persamaan linear:

$$y = 675,94x - 1.314.053,52$$

Proyeksi kebutuhan ekspor karbon aktif di Indonesia pada tahun 2033 adalah

$$y = 675,94(2033) - 1.314.053,52$$

$$y = 60.132,50 \text{ metrik ton/tahun}$$

iii. Produksi

Data produksi karbon aktif diperkirakan sesuai dengan kapasitas pabrik karbon aktif yang telah berdiri di Indonesia.

Tabel 1.3 Data Penyedia karbon Aktif di Indonesia

No	Penyedia	Kapasitas (Metrik Ton/Tahun)	Status
1	PT Intan Prima Grup[11]	12.000	Beroperasi
2	PT Bukit Asam[12]	12.000	<i>Coming soon</i>

3	PT Ikaindo Industri Karbonik Indonesia[13]	3.000	Beroperasi
4	PT Nawa Perkasa[14]	1.200	Beroperasi
5	PT Inzan Permata (<i>MiniPlant</i>)[15]	365	Beroperasi
6	PT Indo Karbon Primajaya[16]	3.000	Beroperasi
7	PT Swing Indonesia[17]	1.000	Beroperasi
8	PT Maplus Makawanua Charcoal Industry[18]	5.000	Beroperasi
Total		37.565	

Proyeksi produksi karbon aktif di Indonesia pada tahun 2033 adalah 37.565 metrik ton/tahun (dengan asumsi belum ada pabrik lain yang dibangun dalam rentang waktu tersebut).

iv. Konsumsi

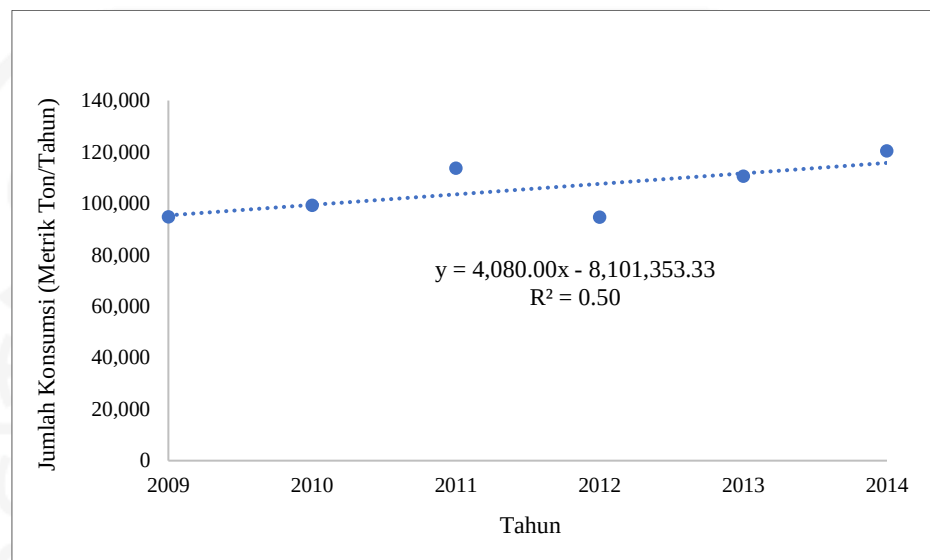
Data konsumsi karbon aktif di Indonesia pada periode 2009-2014 dapat dilihat pada Tabel 1.4 berikut:

Tabel 1.4 Data Konsumsi Karbon Aktif di Indonesia Periode 2009-2014

Tahun	Jumlah Impor (Metrik Ton/Tahun)
2009	94.800
2010	99.300
2011	113.700
2012	94.600
2013	110.600
2014	120.400

(Indexbox.io, 2023)[19]

Berdasarkan data pada Tabel 1.4, dilakukan metode regresi linear sehingga diperoleh sebuah persamaan sebagaimana tertera pada Gambar 1.3 berikut:



Gambar 1.3 Grafik Konsumsi Karbon Aktif di Indonesia Periode 2009-2014

Dari Gambar 1.3 diperoleh persamaan linear:

$$y = 4,08x - 8.101.353,33$$

Proyeksi kebutuhan konsumsi karbon aktif di Indonesia pada tahun 2033 adalah

$$y = 4,08(2033) - 8,101,353.33$$

$$y = 193.286,67 \text{ metrik ton/tahun}$$

Dari data proyeksi impor dan produksi yang telah diperoleh, maka dapat ditentukan nilai *supply* karbon aktif di Indonesia, yaitu:

$$\text{supply} = \text{impor} + \text{produksi}$$

$$= (44.157,87 + 37.565,00) \text{ metrik ton/tahun}$$

$$= 81.722,87 \text{ metrik ton/tahun}$$

Dari data proyeksi ekspor dan konsumsi yang telah diperoleh, maka dapat ditentukan nilai *demand* karbon aktif di Indonesia, yaitu:

$$\begin{aligned} demand &= \text{ekspor} + \text{konsumsi} \\ &= (60.132,50 + 193.286,67) \text{ metrik ton/tahun} \\ &= 253.419,17 \text{ metrik ton/tahun} \end{aligned}$$

Proyeksi kebutuhan karbon aktif di tahun 2033 adalah *demand* – *supply*
= 171.696,30 metrik ton/tahun.

b. Ketersediaan bahan baku

Dalam menentukan lokasi yang potensial sebagai basis pasokan bahan baku, salah satu indikator utama yang digunakan adalah luas areal perkebunan kelapa sawit di suatu provinsi. Semakin luas lahan kelapa sawit yang dimiliki, maka semakin besar pula tandan buah segar (TBS) yang dihasilkan, yang secara langsung berdampak pada meningkatnya jumlah cangkang kelapa sawit. Oleh karena itu, provinsi-provinsi dengan kontribusi signifikan terhadap total luas perkebunan kelapa sawit nasional, seperti Riau, Kalimantan Barat dan Kalimantan Tengah menjadi kandidat utama untuk dijadikan sebagai tempat pendirian pabrik karbon aktif[20]. Pendekatan ini tidak hanya menjamin ketersediaan bahan baku yang berkelanjutan, tetapi juga mendukung efisiensi logistik dan pengolahan limbah lokal daerah tersebut.

Meskipun Provinsi Riau tercatat sebagai wilayah dengan luas lahan kelapa sawit terbesar di Indonesia, Provinsi Kalimantan Barat yang dipilih sebagai lokasi pendirian pabrik karbon aktif karena lebih strategis

berdasarkan pertimbangan teknis dan logistik. Salah satu alasan utamanya adalah Provinsi Kalimantan Barat memiliki ketersediaan lahan Perkebunan yang masih terus berkembang dan belum dimanfaatkan secara optimal. Selain itu, Tingkat kepadatan industri di Provinsi Riau sudah cukup tinggi, dapat memicu potensi persaingan dan tekanan terhadap sumber daya operasional yang lebih besar. Dari segi logistik dan distribusi, Kalimantan Barat kini memiliki akses ke Pelabuhan Kijing yang mendukung pengangkutan karbon aktif ke pasar domestik hingga internasional.

Untuk mendukung kelayakan pendirian pabrik karbon aktif di Provinsi Kalimantan Barat, sebaran dan estimasi jumlah cangkang kelapa sawit harus diketahui secara pasti. Oleh karena itu, pada Tabel 1.5 berikut, disajikan data Perusahaan Pengelola Kelapa Sawit di Provinsi Kalimantan Barat.

Tabel 1.5 Daftar Perusahaan Kelapa Sawit di Provinsi Kalimantan Barat

No	Nama Perusahaan	Alamat	Produk	Kapasitas (Metrik Ton/Tahun)
1	PT Agro Sukses Lestari	Kab. Sintang	CPO	125.000
2	PT Wahana Plantation and Products	Kab. Sintang	CPO	153.000
3	PT Permata Subur Lestari	Kab. Sintang	CPO	72.000
4	PT Perdana Sawit Plantation	Kab. Sintang	TBS	115.200
5	PT Sumatera Makmur Lestari	Kab. Sekadau	CPO	96.000
6	PT Kalimantan Sanggar Pusaka	Kab. Sekadau	TBS	115.200
7	PTPN XIII Kembayan	Kab. Sanggau	TBS	86.400

8	PTPN XIII Kebun Gunung Meliau	Kab. Sanggau	TBS	115.200
9	PTPN XIII Kebun Rimba Belian	Kab. Sanggau	TBS	115.200
10	PT Sumatera Jaya Agro Lestari	Kab. Sanggau	CPO	90.000
11	PT Sarana Esa Cita	Kab. Sambas	CPO	89.100
12	PT Mulia Indah	Kab. Sambas	CPO	55.000
13	PT Peniti Sungai Purun	Kab. Mempawah	TBS	115.200
14	PT Mustika Agung Sentosa	Kab. Ketapang	CPO	216.000
15	PT Lestari Abadi Perkasa	Kab. Ketapang	CPO	61.380
16	PT Mentari Pratama	Kab. Ketapang	CPO	111.200
17	PT Buana Tunas Sejahtera	Kab. Kapuas Hulu	CPO	66.000
18	PT Anugerah Makmur Sejati	Kab. Kapuas Hulu	CPO	175.000
19	PT Sentosa Bumi Wijaya	Kab. Bengkayang	CPO	52.785
20	PTPN XIII Ngabang	Kab. Landak	CPO	350.000

(Opendata Kalbar)[21]

Data yang disajikan hanya mencakup pabrik kelapa sawit berskala besar. Adapun estimasi ketersediaan cangkang kelapa sawit di Provinsi Kalimantan Barat dapat dihitung sebagai berikut:

Tabel 1.6 Ketersediaan *Palm Oil Shell* / Cangkang Kelapa Sawit

	Jumlah	Keterangan
<i>CPO</i>	1.836.217.000	<i>CPO</i> = 20–23% <i>TBS</i> [3]
<i>TBS</i>	9.181.085.000	

<i>Palm Oil Shell</i>	642.675,95	<i>POS = 7–9% TBS [3]</i>
<i>Ketersediaan Palm Oil Shell</i>	642.675,95	
Satuan dalam Metrik Ton/Tahun		

c. Kapasitas Terpasang Pabrik Karbon Aktif di Indonesia dan Dunia

Pabrik karbon aktif yang sudah beroperasi di Indonesia dan Dunia beserta kapasitasnya dapat dilihat pada Tabel 1.7 berikut:

Tabel 1.7 Data Kapasitas Terpasang Pabrik Karbon Aktif di Indonesia dan Dunia

No	Nama Perusahaan	Lokasi	Kapasitas Produksi (Metrik Ton/Tahun)	Bahan Baku
1	PT Intan Prima Group[11]	Jakarta	12.000	<i>Coconut shell</i>
2	PT Bukit Asam[12]	Tanjung Enim, Sumsel	12.000	<i>Coal</i>
3	PT Ikaindo Industri Karbonik Indonesia[13]	Medan, Sumut	3.000	<i>Coconut shell</i>
4	PT Nawa Perkasa[14]	Wajok, Kalbar	1.200	<i>Coconut shell</i>
5	PT Inzan Permata (<i>Mini Plant</i>)[15]	Samarinda, Kaltim	365	<i>Coal</i>
6	PT Indo Karbon Primajaya[16]	Serang, Banten	3.000	<i>Coconut shell</i>
7	PT Swing Indonesia[17]	Serang, Banten	1.000	<i>Coconut shell & coal</i>
8	PT Maplus Makawanua Charcoal Industry[18]	Bitung, Sulut	5.000	<i>Coconut shell</i>
9	Shanxi Xinhua Chemical Co., Ltd.[22]	Shanxi, China	20.000	<i>Coal</i>
10	Activated Carbon Technologies Pty Ltd.[23]	Perth, Australia	12.000	<i>Coconut shell & coal</i>
11	Cabot Norit Activated Carbon[24]	USA, Singapura dan Belanda	45.000	<i>Biomass & coal</i>
12	Kalpaka Chemicals[25]	Tamil Nadu, India	10.000	<i>Coconut shell & coal</i>

Berdasarkan ketiga parameter yang telah diuraikan sebelumnya, rentang kapasitas produksi pabrik karbon aktif yang dapat dirancang adalah sebagai berikut:

Proyeksi kebutuhan karbon aktif	: 171.696,30 metrik ton/tahun
Bahan baku yang tersedia	: 642.675,95 metrik ton/tahun
Kapasitas terpasang minimal	: 365,00 metrik ton/tahun
Kapasitas terpasang maksimal	: 45.000,00 metrik ton/tahun

Range kapasitas pabrik karbon aktif adalah 365 hingga 45.000 metrik ton/tahun. Dipilih kapasitas pabrik karbon aktif sebesar **12.000 metrik ton/tahun** dengan pertimbangan sebagai berikut:

- i. *Palm oil shell* dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku arang, uap boiler, campuran pakan ternak dan bahan pengeras jalan. Asumsi *palm oil shell* yang diperoleh dari *supplier* untuk produksi karbon aktif hanya 20%[26].
- ii. *Yield* produk tergolong rendah. Hanya sekitar 15% dari jumlah *feed* yang keluar sebagai produk[27].
- iii. Kadar air pada *palm oil shell* di Indonesia tergolong tinggi (bisa mencapai 25%), sedangkan kadar air yang baik bernilai <10%[26].
- iv. Fluktuasi pada ketersediaan *palm oil shell* (akibat wabah/kebakaran hutan/bencana alam) sebesar 5%.
- v. Idealnya, kapasitas pabrik dibuat 85% dari ketersediaan bahan baku[28].

1.3 Tinjauan Pustaka

a. Kelapa Sawit

Kelapa sawit merupakan salah satu komoditas perkebunan strategis di Indonesia yang menghasilkan berbagai jenis minyak, seperti minyak nabati, minyak bahan bakar dan keperluan industri. Tanaman ini berasal dari daerah tropis seperti Afrika Barat dan Amerika Tengah, dengan dua spesies utama yang umum dibudidayakan, yakni *Elaeis guineensis* dan *Elaeis oleifera*. Spesies *Elaeis guineensis* lebih banyak digunakan dalam industri karena memiliki Tingkat produktivitas yang tinggi, sedangkan *Elaeis oleifera* digunakan dalam program pemuliaan untuk memperbaiki kualitas minyak[29].

Kelapa sawit dalam proses pengolahannya menghasilkan dua produk utama, yaitu *crude palm oil* (CPO) yang diperoleh dari *mesocarp* (daging buah) dan *palm kernel oil* (PKO) yang berasal dari inti biji. Selain dua produk utama tersebut, pengolahan kelapa sawit juga turut menghasilkan limbah dalam bentuk padat, cair dan gas. Limbah padat seperti tandan kosong, cangkang dan serabut berpotensi diolah menjadi pupuk organik, bahan bakar biomassa atau bahan baku industri ringan. Di sisi lain, limbah cair atau *palm oil mill effluent* (POME) merupakan tantangan lingkungan terbesar dalam industri kelapa sawit karena kandungan bahan organiknya tinggi, yang dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola secara memadai[30].

Untuk setiap satu metrik ton tandan buah segar (TBS) yang diolah, akan menghasilkan 20–23% *crude palm oil* (CPO), 5–7% *palm kernel oil* (PKO) dan sisanya berupa limbah, yaitu 20–23% tandan kosong kelapa sawit, 10–12% serat buah kelapa sawit dan 7–9% cangkang kelapa sawit[3]. Sumber lain menyatakan untuk setiap satu metrik ton tandan buah segar (TBS) yang diolah, akan menghasilkan 22% *crude palm oil* (CPO), 5% *kernel*, 22% tandan kosong, 6% cangkang kelapa sawit, 13% serabut dan 28% limbah cair[31]. Oleh karena itu, pengolahan limbah menjadi komponen krusial dalam upaya mewujudkan sistem pengolahan kelapa sawit yang berkelanjutan.

b. Cangkang Kelapa Sawit

Cangkang kelapa sawit merupakan bagian terkeras dari buah sawit sebagai residu dari proses ekstraksi minyak. Dalam industri pengolahan kelapa sawit, cangkang kelapa sawit digolongkan sebagai limbah padat dengan potensi sebagai sumber energi alternatif. Hal ini disebabkan oleh karakteristiknya berupa bahan bakar padat yang terbarukan dan memiliki nilai kalor tinggi. Cangkang kelapa sawit sangat cocok digunakan sebagai sumber energi termal, baik dalam bentuk pembakaran langsung pada sistem pembangkit biomassa maupun sebagai bahan campuran bersama batu bara untuk *co-firing*. Pemanfaatan energi dari limbah ini mendukung pengembangan sistem energi berkelanjutan sekaligus berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan dari sektor industri sawit[32].

Dari sisi komposisi kimia, cangkang kelapa sawit mengandung sekitar 6,92% selulosa, 26,17% hemiselulosa, 53,85% lignin, 4,43% air dan 8,68% abu[33]. Kandungan lignoselulosa yang tinggi menjadikan cangkang kelapa sawit sangat potensial sebagai bahan baku untuk berbagai produk turunan seperti karbon aktif, briket biomassa dan media tanam. Sebagai pembanding limbah padat lainnya, tandan kosong kelapa sawit memiliki komposisi 33,25% selulosa, 23,24% hemiselulosa, 25,83% lignin, 6,95% kadar air dan 4,19% ekstrak[34].

Optimalisasi pemanfaatan limbah cangkang kelapa sawit memiliki peran penting dalam mendukung transisi menuju ekonomi sirkular di sektor perkebunan. Dengan pengelolaan yang tepat, cangkang sawit dapat menjadi bagian dari rantai pasok biomassa berkelanjutan yang tidak hanya memberikan nilai ekonomi, tetapi juga mendukung pencapaian target-target lingkungan, termasuk efisiensi sumber daya dan pengurangan limbah industri.

c. Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan material berpori dengan luas permukaan tinggi yang diperoleh melalui proses aktivasi arang, baik secara fisika maupun kimia. Material ini memiliki kemampuan adsorpsi yang sangat baik terhadap berbagai jenis senyawa gas maupun cair, sehingga banyak digunakan dalam proses pemurnian air, pengolahan limbah, industri makanan, farmasi hingga pemurnian udara. Luas permukaan karbon aktif dapat mencapai 2000 m²/g, menjadikannya sebagai salah satu adsorben

multifungsi yang unggul[35]. Luas permukaan dan distribusi pori yang optimal berperan penting dalam menentukan kapasitas adsorpsi karbon aktif terhadap senyawa-senyawa tertentu[36].

Karbon aktif diproduksi dengan dua tahapan proses, yaitu proses karbonisasi yang menghasilkan arang dan proses aktivasi yang menghasilkan karbon aktif. Arang merupakan material padat berpori yang dihasilkan melalui proses pirolisis atau karbonisasi bahan organik pada suhu tinggi. Proses ini menghasilkan arang yang bersifat stabil secara kimia dan memiliki struktur pori awal. Selanjutnya, tahap aktivasi dilakukan untuk memperbesar ukuran pori atau membuka pori-pori yang tersembunyi guna meningkatkan luas permukaan karbon aktif. Aktivasi ini dapat dilakukan secara fisik (menggunakan uap air atau gas CO_2 pada suhu tinggi) maupun kimia (menggunakan katalis seperti H_3PO_4 , ZnCl_2 atau KOH). Karbon aktif yang dihasilkan umumnya mampu menyerap senyawa polutan sebesar 25 hingga 1000% dari beratnya, tergantung pada struktur dan luas permukaan yang dihasilkan[37].

Bahan baku karbon aktif dapat diperoleh dari berbagai material yang memiliki kandungan karbon tinggi. Sumber-sumber alami yang umum digunakan meliputi cangkang kelapa sawit, tempurung kelapa, kulit biji kopi, sekam padi, kayu keras, batu bara serta tulang hewan. Selain bahan alami, karbon aktif juga dapat disintesis dari bahan berbasis polimer seperti rayon, poliakrilonitril dan resin fenol-formaldehida [38]. Di antara bahan-bahan tersebut, limbah pertanian seperti cangkang kelapa sawit menjadi

pilihan yang menjanjikan karena ketersediaannya yang melimpah, biaya rendah dan dampak lingkungan yang lebih kecil, menjadikannya solusi berkelanjutan dalam pengembangan karbon aktif.

Karbon aktif memiliki aplikasi yang sangat luas dalam berbagai sektor industri berkat sifatnya yang tidak toksik, stabil, dan memiliki afinitas tinggi terhadap beragam kontaminan. Penggunaan utamanya meliputi penyaringan dan pemurnian air, pengolahan limbah cair industri, pemurnian udara, penghilangan bau dan warna dalam industri makanan dan minuman, serta sebagai agen adsorben dalam formulasi farmasi dan bahan kimia halus. Sifat permukaan yang dapat dimodifikasi juga membuka peluang pemanfaatan karbon aktif dalam teknologi pemisahan lanjutan dan sistem pemrosesan berbasis nanomaterial. Aplikasi karbon aktif di berbagai bidang, seperti industri, kesehatan, lingkungan dan pertanian secara umum dapat dilihat lebih jelas pada Tabel 1.8 berikut:

Tabel 1.8 Aplikasi Karbon AKtif di Berbagai Bidang

Bidang	Kegunaan
Industri	Pemurnian larutan, seperti pada industri gula dan air minum
	Penyerap gas beracun pada masker
	Penghilang bau pada sistem alat pendingin
	Penyerap emisi bahan bakar pada otomotif
Kesehatan	Bahan tambahan dalam pembuatan sabun, lulur dan sampo
	Penanganan keracunan eksternal dan terapi diare sekretonik

Lingkungan	Adsorben logam Hg, Pb, Cd, Ni dan Cu dalam limbah cair
	Penjernihan air
	Penyerap residu pestisida
	Penyerap gas beracun dan mereduksi emisi formaldehida
Pertanian	Pupuk tambahan pada anakan <i>Eucalyptus urophylla</i>
	Media tumbuh semai melina
	Perangsang pertumbuhan akar pada tanaman pule landak
	Media kultur <i>in vitro</i>

(Mody, 2014)[39]

d. Proses Karbonisasi

Karbonisasi merupakan tahapan krusial dalam pembuatan karbon aktif, bertujuan mengonversi bahan organik menjadi arang melalui pemanasan dalam kondisi oksigen terbatas. Secara terminologis, karbonisasi dan pirolisis sering digunakan secara bergantian, namun keduanya memiliki perbedaan fokus dalam konteks termokimia. Karbonisasi merujuk secara spesifik pada proses konversi bahan organik menjadi arang padat dengan kandungan karbon tinggi melalui pemanasan dalam kondisi terbatas oksigen. Tujuan utama karbonisasi adalah menghasilkan residu padat (*char*) yang stabil dan berpori. Sedangkan pirolisis merupakan istilah yang lebih luas, mencakup seluruh proses pemecahan termal bahan organik tanpa oksigen, yang dapat menghasilkan tiga fraksi utama: gas, cairan (*tar* atau *bio-oil*), dan padatan. Dengan kata lain, karbonisasi merupakan bagian dari pirolisis yang difokuskan pada

optimasi produk padat, sedangkan pirolisis lebih berfokus pada produk gas atau cair, tergantung pada kondisi proses dan tujuan aplikasinya[40].

Dalam studi ini, proses karbonisasi dilakukan menggunakan udara panas dari pembakaran batu bara. Batu bara dipilih karena kemampuannya menghasilkan suhu tinggi secara konsisten dan merata, sehingga sangat sesuai untuk dekomposisi termal bahan tanpa terjadinya pembakaran sempurna. Penggunaan batu bara sebagai sumber panas dalam proses karbonisasi telah banyak diterapkan, baik pada skala laboratorium maupun industri, karena bersifat ekonomis, mudah diperoleh dan mampu menghasilkan suhu antara 400°C hingga 800°C[41].

Parameter proses seperti suhu, waktu karbonisasi dan laju pemanasan sangat memengaruhi kualitas akhir produk. Pemanasan yang terlalu cepat dapat menyebabkan pembentukan *tar* berlebih yang menyumbat pori-pori karbon, sedangkan durasi pemanasan yang terlalu lama dapat menurunkan rendemen akibat kehilangan massa yang berlebihan. Oleh karena itu, pengendalian distribusi panas dan waktu proses menjadi kunci dalam menghasilkan arang berkualitas tinggi, dengan karakteristik kadar karbon tetap tinggi, kadar air rendah dan struktur pori yang terbentuk optimal[42].

Tabel 1.9 Kondisi Operasi dan Variasi Proses Karbonisasi

No	Kondisi Operasi	Tipe Karbonisasi	Waktu Proses	Referensi
1	290°C	<i>Low</i>	30 menit	[43]
2	450°C	<i>Intermediate</i>	10–15 menit	[44]
3	500–600°C	<i>Fast</i>	<10 menit	[45]

e. Proses Aktivasi

Aktivasi merupakan tahap esensial dalam proses pembuatan karbon aktif yang bertujuan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi dengan membuka, membersihkan dan memperluas pori-pori arang yang terbentuk selama proses karbonisasi. Pada tahap ini, produk hasil karbonisasi masih mengandung senyawa volatil dan residu yang dapat menyumbat pori-pori serta menurunkan luas permukaan karbon aktif, sehingga efektivitas adsorpsinya belum optimal. Oleh karena itu, proses aktivasi diperlukan untuk menghilangkan zat pengotor, memperbesar diameter pori dan meningkatkan luas permukaan spesifik karbon aktif[46].

Secara umum terdapat dua metode utama dalam proses aktivasi, yaitu aktivasi fisika dan aktivasi kimia. Kedua pendekatan ini memiliki karakteristik, mekanisme reaksi, serta keunggulan dan keterbatasan yang berbeda-beda.

Aktivasi fisika dilakukan dengan memanaskan arang hasil karbonisasi dengan gas seperti uap air (*steam*) atau karbon dioksida (CO_2) pada suhu tinggi, berkisar antara 600–1000°C. Gas tersebut bertindak sebagai oksidan ringan yang bereaksi dengan arang, mengikis permukaan dan membuka pori-pori secara bertahap sehingga dapat meningkatkan luas permukaan spesifik. Proses ini dilakukan setelah karbonisasi dan tidak memerlukan bahan kimia tambahan, menjadikannya metode yang lebih ramah lingkungan dan sesuai untuk implementasi skala besar dengan sistem kendali suhu dan tekanan yang baik (Marsh & Francisco, 2006).

Beberapa parameter penting dalam aktivasi fisika meliputi suhu aktivasi, waktu kontak, jenis dan laju aliran gas, jenis bahan baku serta desain sistem pemanasan[47].

Aktivasi kimia dilakukan dengan merendam arang hasil karbonisasi dalam larutan bahan kimia yang berfungsi sebagai agen aktivasi (*activator*). Aktivator yang umum digunakan meliputi asam kuat (H_3PO_4 , H_2SO_4), basa kuat (KOH, NaOH), atau garam logam seperti $ZnCl_2$ dan $CaCl_2$. Aktivator memecah ikatan internal dalam struktur lignoselulosa arang, sehingga memungkinkan pembentukan sistem pori yang lebih terbuka saat proses pemanasan berlangsung. Proses aktivasi kimia umumnya berlangsung pada suhu yang lebih rendah dibanding aktivasi fisika, yakni sekitar $500^{\circ}C$ – $950^{\circ}C$. Metode ini dikenal lebih efisien dalam menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan dan volume pori yang lebih tinggi, karena agen kimia mempercepat pembentukan pori secara agresif. Namun, proses ini memerlukan tahap pencucian intensif untuk menghilangkan sisa bahan kimia yang tersisa pada karbon aktif[48][49].

Tabel 1.10 Perbandingan Aktivasi Fisika dan Kimia

Parameter	Aktivasi Fisika[45]	Aktivasi Kimia[44]
Suhu Operasi	600–1.000°C	500–950°C
Waktu Aktivasi	1,5–6 jam	14,9–23,9 menit
Yield Produk	40%	40–55%
Surface Area (m^2/g)	452–528	1.151–1.223
Kelemahan	Surface area rendah	Perlu pencucian intensif

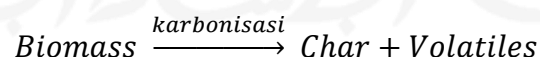
Berdasarkan Tabel 1.9 dan Tabel 1.10, dipilih proses karbonisasi pada suhu 500°C dan proses aktivasi kimia dengan pertimbangan sebagai berikut:

- i. Suhu paling baik untuk proses karbonisasi cangkang kelapa sawit adalah 500°C[42].
- ii. Proses aktivasi kimia menghasilkan produk karbon aktif yang lebih unggul berdasarkan *yield* produk dan *surface area*.
- iii. Kelemahan proses aktivasi kimia bukan suatu hal yang krusial, masih bisa diupayakan dengan proses pencucian yang intensif.

1.4 Tinjauan Kinetika dan Termodinamika

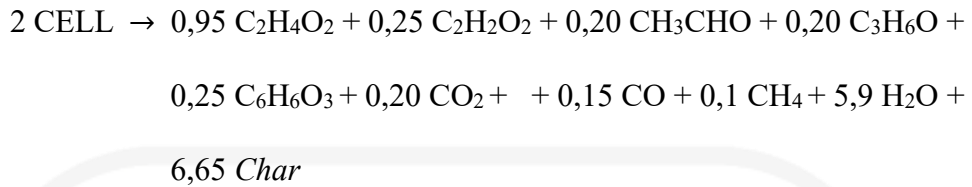
a. Dasar Reaksi

Proses produksi karbon aktif berbasis biomassa, khususnya dari cangkang kelapa sawit, secara umum terdiri atas dua tahapan utama. Tahap pertama adalah proses karbonisasi, yaitu proses dekomposisi termal terhadap komponen utama biomassa (selulosa, hemiselulosa dan lignin) yang berlangsung dalam kondisi minim atau tanpa oksigen. Pada tahap ini, struktur lignoselulosa dalam biomassa mengalami penguraian secara bertahap akibat pemanasan, menghasilkan arang padat dan residu senyawa volatil. Reaksi-reaksi penguraian termal selama karbonisasi terjadi melalui mekanisme kimia tertentu, yang dijelaskan sebagai berikut:

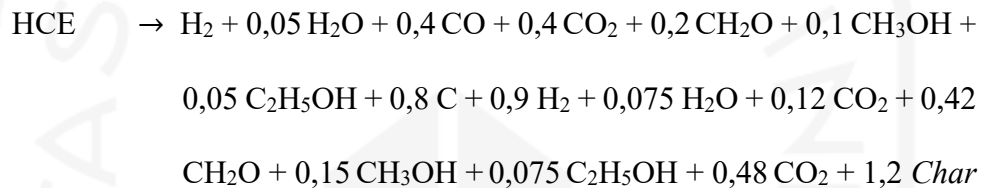


Penguraian lignoselulosa secara lebih rinci dijabarkan sebagai berikut[50]:

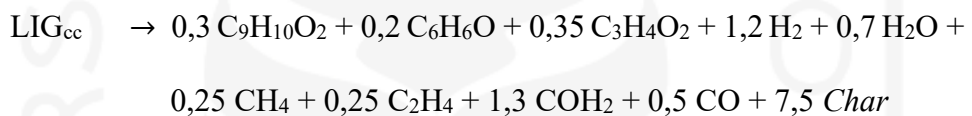
Reaksi Penguraian Selulosa ($C_6H_{10}O_5$):



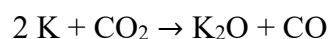
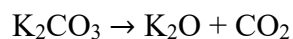
Reaksi Penguraian Hemiselulosa ($C_5H_8O_4$):



Reaksi Penguraian Lignin ($C_{15}H_{14}O_4$):



Tahap selanjutnya dalam pembuatan karbon aktif adalah proses aktivasi menggunakan larutan kalium hidroksida (KOH). Aktivasi kimia ini melibatkan reaksi antara arang hasil karbonisasi, air dan agen pengaktivasi/*activating agent*, yaitu larutan KOH dengan konsentrasi 50%. Dalam proses ini, larutan KOH berperan sebagai agen kimia yang menembus struktur karbon untuk pembentukan pori, sehingga meningkatkan luas permukaan spesifik dan volume pori dari arang. Secara umum, reaksi kimia yang terjadi selama aktivasi dengan KOH dapat dinyatakan sebagai berikut[51]:



Proses aktivasi berlangsung di dalam *rotary kiln* pada suhu operasi 871°C dengan rasio KOH terhadap *char* adalah 2:1 [52], [53].

b. Tinjauan Kinetika

Persamaan kinetika reaksi untuk proses dekomposisi temal yang terjadi selama proses karbonisasi dapat dinyatakan sebagai berikut[50]:

$$k_{\text{selulosa}} = 0,0117 \text{ min}^{-1}$$

$$k_{\text{hemiselulosa}} = 0,0161 \text{ min}^{-1}$$

$$k_{\text{lignin}} = 0,0037 \text{ min}^{-1}$$

$$k_{\text{dekomposisi}} = 0,0316 \text{ min}^{-1}$$

Sementara itu, kinetika reaksi pada proses aktivasi mengikuti persamaan Arrhenius berikut[54]:

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$$

Keterangan:

k = konstanta laju reaksi [min^{-1}]

A = faktor frekuensi; 531,9 [mg/g min]

$-E_a$ = energi aktivasi; 36,51 [kJ/mol]

R = tetapan gas ideal; 8,314 [J/mol K]

T = suhu reaksi; 1200 [K]

c. Tinjauan Termodinamika

Tinjauan termodinamika dilakukan untuk mengevaluasi sifat dasar reaksi kimia yang terjadi pada proses, khususnya dalam menentukan apakah reaksi bersifat endotermis atau eksotermis, serta apakah arah reaksi bersifat *reversible* atau *irreversible*. Pada proses karbonisasi, secara teoritis

reaksi yang terjadi merupakan reaksi dekomposisi termal yang bersifat **endotermis** dan berlangsung secara **searah** (*irreversible*)[55]. Untuk memastikan karakteristik tersebut secara kuantitatif, dilakukan perhitungan perubahan entalpi pembentukan standar (ΔH_f°) untuk menentukan sifat kalor reaksi, dan perubahan energi bebas Gibbs (ΔG_f°) untuk mengidentifikasi arah jalan reaksi.

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{C}_{(s)} = 10,37 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_{5(s)} = -889,14 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{C}_5\text{H}_8\text{O}_{4(s)} = -395,97 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{C}_{15}\text{H}_{14}\text{O}_{4(s)} = -547,13 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{C}_2\text{H}_4\text{O}_{2(v)} = -309,90 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{C}_2\text{H}_2\text{O}_{2(v)} = -164,03 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{CH}_3\text{CHO}_{(v)} = -76,81 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_{(v)} = -149,57 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{C}_6\text{H}_6\text{O}_{3(v)} = -212,05 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{CO}_{2(v)} = -473,84 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{CO}_{(v)} = 91,52 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{CH}_{4(v)} = -44,56 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{H}_2\text{O}_{(v)} = -224,44 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{H}_{2(v)} = 13,47 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{CH}_2\text{O}_{(v)} = -82,50 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{CH}_3\text{OH}_{(v)} = -163,87 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{f,773,15}^\circ \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(v)} = -175,20 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{COH}_2(\text{v}) = - 82,50\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{C}_9\text{H}_{10}\text{O}_2(\text{v}) = - 240,50\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{C}_6\text{H}_6\text{O}(\text{v}) = 2,67\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2(\text{v}) = - 227,98\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{C}_2\text{H}_4(\text{v}) = 91,43\ \text{kJ/mol}$$

([56], [57][58], [59])

$$\begin{aligned}\Delta H^{\circ}_{f\ \text{reaksi}} &= \Sigma \Delta H^{\circ}_{f\ \text{produk}} - \Sigma \Delta H^{\circ}_{f\ \text{reaktan}} \\ &= - 1.489,08 - (- 2.721,38) \\ &= 1.232,30\ \text{kJ/mol}\end{aligned}$$

Nilai $\Delta H^{\circ}_{f\ \text{reaksi}} > 0$, maka reaksi karbonisasi bersifat **endotermis**[60].

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{C}(\text{s}) = - 9,34\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5(\text{s}) = - 1210,54\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4(\text{s}) = - 722,52\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{C}_{15}\text{H}_{14}\text{O}_4(\text{s}) = - 989,64\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2(\text{v}) = - 602,76\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2(\text{v}) = - 449,11\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{CH}_3\text{CHO}(\text{v}) = - 353,84\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{C}_3\text{H}_6\text{O}(\text{v}) = - 482,62\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{C}_6\text{H}_6\text{O}_3(\text{v}) = - 99,49\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{CO}_2(\text{v}) = - 676,69\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{CO}(\text{v}) = - 84,67\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{CH}_4(\text{v}) = - 234,73\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ \text{H}_2\text{O}(\text{v}) = - 398,70\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ H_{2(v)} = - 108,04\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ CH_2O_{(v)} = - 292,15\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ CH_3OH_{(v)} = - 406,94\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ C_2H_5OH_{(v)} = - 485,36\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ COH_2_{(v)} = - 292,15\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ C_9H_{10}O_{2(v)} = - 21,84\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ C_6H_6O_{(v)} = 14,27\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ C_3H_4O_{2(v)} = - 160,73\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 773,15}\ C_2H_4_{(v)} = - 138,66\ \text{kJ/mol}$$

([56], [57], [58], [59])

$$\begin{aligned}\Delta G^{\circ}_{f\ \text{reaksi}} &= \Sigma \Delta G^{\circ}_{f\ \text{produk}} - \Sigma \Delta G^{\circ}_{f\ \text{reaktan}} \\ &= - 4.301,82 - (-4.133,23) \\ &= - 168,59\ \text{kJ/mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta G^{\circ}_{f\ \text{reaksi}} &= - R T \ln K \\ K &= \exp (\Delta G^{\circ}_{f\ \text{reaksi}} / -RT) \\ &= 2,46 \times 10^{11}\end{aligned}$$

Nilai $\Delta G^{\circ}_{f\ \text{reaksi}} < 0$ dengan nilai $K \gg 1$, maka arah jalan reaksi karbonisasi adalah *irreversible* dan berlangsung secara *spontan*[60], [61].

Perhitungan serupa dilakukan kembali untuk proses aktivasi kimia, sehingga sifat kalor reaksi dan arah jalan reaksi dapat ditentukan.

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 1199,82}\ KOH = - 349,66\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 1199,82}\ C = 18,72\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 1199,82}\ K = 107,74\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 1199,82}\ H_2 = 31,07\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 1199,82}\ KCO_3 = - 962,37\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 1199,82}\ K_2O = - 253,54\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 1199,82}\ CO_2 = - 342,70\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{f\ 1199,82}\ CO = - 79,67\ \text{kJ/mol}$$

$$\begin{aligned}\Delta H^{\circ}_{f\ \text{reaksi}} &= \Sigma \Delta H^{\circ}_{f\ \text{produk}} - \Sigma \Delta H^{\circ}_{f\ \text{reaktan}} \\ &= - 1.616,04 - (- 2.060,55) \\ &= 444.51\ \text{kJ/mol}\end{aligned}$$

Nilai $\Delta H^{\circ}_{f\ \text{reaksi}} > 0$, maka reaksi aktivasi bersifat **endotermis**[60].

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 1199,82}\ KOH = - 585,92\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 1199,82}\ C = - 22,80\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 1199,82}\ K = - 119,31\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 1199,82}\ H_2 = - 183,31\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 1199,82}\ KCO_3 = - 1498,42\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 1199,82}\ K_2O = - 291,45\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 1199,82}\ CO_2 = - 693,34\ \text{kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ 1199,82}\ CO = - 374,00\ \text{kJ/mol}$$

$$\begin{aligned}\Delta G^{\circ}_{f\ \text{reaksi}} &= \Sigma \Delta G^{\circ}_{f\ \text{produk}} - \Sigma \Delta G^{\circ}_{f\ \text{reaktan}} \\ &= - 3.785,40 - (-3.561,15) \\ &= - 224,25\ \text{kJ/mol}\end{aligned}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f\ \text{reaksi}} = - R T \ln K$$

$$K = \exp (\Delta G^{\circ}_{f\ \text{reaksi}} / -RT)$$

$$= 5,80 \times 10^9$$

Nilai $\Delta G^{\circ}_{\text{reaksi}} < 0$ dengan nilai $K \gg 1$, maka arah jalan reaksi aktivasi adalah *irreversible* dan berlangsung secara **spontan**[60], [61].



BAB II

PERANCANGAN PRODUK

2.1 Spesifikasi Produk

Tabel 2.1 Sifat Fisik, Kimia dan Informasi Keselamatan Produk

Identifikasi Produk	
Nama Produk	Karbon Aktif / <i>Activated Carbon</i>
Rumus Molekul	C
<i>CAS Number</i>	64365-11-3
Sifat Fisik	
Deskripsi Fisik	Butiran hitam dengan daya serap yang tinggi
Warna	Hitam
Bentuk	<i>Granular</i>
Bau	Tidak berbau
Rasa	Hambar
Kelarutan	Tidak larut dalam pelarut organik
Densitas	0,08–0,5 gr/cm ³
Ukuran Partikel	1–3 mm
Luas Permukaan	1.151–1.223 m ² /gr
Kadar Air	≤ 10%
Kadar Abu	≤ 1%
Sifat Kimia	
Tingkat Keasaman (pH)	Bersifat basa karena <i>activating agent</i> berupa basa kuat
Stabilitas	Relatif tinggi
Kandungan Gugus Fungsi	Mengandung sejumlah kecil gugus hidroksil
Reaktivitas	Reaktif terhadap air, mampu menetralkan klorin dan menyerap beberapa jenis logam

Informasi Keselamatan Produk	
Klasifikasi GHS	
Sinyal	<i>Warning!</i>
Piktogram	
Pernyataan Bahaya GHS	H252; Pemanasan sendiri dalam jumlah besar, berpotensi kebakaran
Kode Pernyataan Kehati-hatian	P235, P280, P407, P410, P413 dan P420
Keamanan, Sifat Bahaya dan Penyimpanan	
Bahaya Kesehatan	Kebakaran dapat menghasilkan gas yang mengiritasi dan/atau beracun
Batas dan Potensi Ledakan	Ringan, ketika terkena panas atau api
Peringatan Reaktivitas	Reaktif terhadap air
Toksisitas	Tidak ada toksisitas signifikan
Kondisi Penyimpanan	Disimpan dalam wadah kaca atau logam yang tertutup rapat

([62], [63])

2.2 Spesifikasi Bahan Baku dan Bahan Pendukung

a. Cangkang Kelapa Sawit

Tabel 2.2 Sifat Fisik, Kimia dan Informasi Keselamatan Bahan Baku

Identifikasi Bahan Baku	
Nama Bahan Baku	Cangkang Kelapa Sawit/ <i>Palm Kernel Shell</i>
Komponen Penyusun Utama	Selulosa, Hemiselulosa dan Lignin
Sifat Fisik	
Deskripsi Fisik	Cangkang keras dan kaku
Warna	Cokelat tua hingga hitam
Bentuk	<i>Irregular</i> (setengah bola/melengkung/serpihan)
Bau	Tidak berbau
Densitas	1,15 kg/L
Ukuran Partikel	± 10 cm
Analisis Proksimat (%wt):	
<i>Fixed Carbon</i>	18,8
<i>Volatile</i>	71,1
<i>Ash</i>	4,7
Analisis Ultimat (%wt):	
Karbon	48,06
Hidrogen	6,38
Nitrogen	1,27
Oksigen	34,10
Sulfur	0,09
Sifat Kimia	
Stabilitas	Stabilitas termal tinggi, mudah ter-dekomposisi
Reaktivitas	Tidak reaktif

Informasi Keselamatan Produk	
Klasifikasi GHS	
Sinyal	<i>Warning!</i>
Piktogram	
Sifat	<i>Flammable</i>
Keamanan, Sifat Bahaya dan Penyimpanan	
Bahaya Kesehatan	Kebakaran dapat menghasilkan gas yang mengiritasi dan/atau beracun
Batas dan Potensi Ledakan	Ringan, ketika terkena panas atau api
Peringatan Reaktivitas	Tidak reaktif
Toksisitas	Tidak ada toksisitas signifikan
Kondisi Penyimpanan	Hindari terkena cahaya matahari langsung
([64], [65])	

b. Air (H₂O)

Tabel 2.3 Sifat Fisik, Kimia dan Informasi Keselamatan Bahan Pendukung

Identifikasi Bahan Pendukung	
Nama Bahan Pendukung	<i>Air / Water</i>
Rumus Molekul	H ₂ O
<i>CAS Number</i>	7732-18-5
Sifat Fisik	
Deskripsi Fisik	Cairan bening yang tidak beracun
Warna	Tidak berwarna
Bentuk	Cair, menyesuaikan dengan wadah
Bau	Tidak berbau

Rasa	Hambar
Kelarutan	Bisa bercampur dengan sebagian besar zat
Densitas	1 gr/cm ³
Titik Beku	0°C
Titik Didih	100°C

Sifat Kimia

Tingkat Keasaman (pH)	Netral, pH = 7
Sifat Pelarut	Sangat baik untuk garam ionik dan molekul polar
Amfoter	Ya
Reaktivitas	Reaktif terhadap logam alkali membentuk basa dan gas hidrogen

Informasi Keselamatan Produk

Klasifikasi GHS

Sinyal	-
Piktogram	-
Pernyataan Bahaya GHS	Tidak diklasifikasikan, dinyatakan tidak memenuhi klasifikasi bahaya GHS

[[66], [67]]

c. Kalium Hidroksida (KOH)

Tabel 2.4 Sifat Fisik, Kimia dan Informasi Keselamatan Bahan KOH

Identifikasi Bahan Pendukung	
Nama Bahan Pendukung	Kalium Hidroksida / <i>Potassium Hydroxide</i>
Rumus Molekul	KOH
<i>CAS Number</i>	1310-58-3
Sifat Fisik	

Deskripsi Fisik	Kristal berwarna putih
Warna	Putih atau tidak berwarna
Bentuk	Padat atau kristal (pada suhu ruang)
Bau	Tidak berbau
Kelarutan	Sangat larut dalam air
Densitas	2,04 gr/cm ³
Titik Leleh	380°C
Titik Didih	1.320°C
Sifat Kimia	
Tingkat Keasaman (pH)	Basa kuat, pH = 13,5
Korosifitas	Korosif
Reaktivitas	Reaktif terhadap air, asam dan logam tertentu
Dekomposisi	Bila dipanaskan hingga terurai, akan mengeluarkan asap beracun K ₂ O
Informasi Keselamatan Produk	
Klasifikasi GHS	
Sinyal	<i>Danger!</i>
Piktogram	 
Pernyataan Bahaya GHS	H290; Bersifat korosif terhadap logam H302; Berbahaya jika tertelan (toksik) H314; Menyebabkan luka bakar kulit H318; Menyebabkan kerusakan mata serius
Kode Pernyataan Kehati-hatian	P234, P260, P264, P264 + P265, P270, P280, P301 + P317, P301 + P330 + P331, P302+ P361 + P354, P304 + P340, P305 + P354 + P338, P316, P317, P321, P330, P363, P390, P405, P406 dan P501

Keamanan, Sifat Bahaya dan Penyimpanan	
Kelas dan Kategori Bahaya	Toksisitas akut kategori 4 Korosi kulit kategori 1A
Bahaya Kesehatan	Menyebabkan luka bakar parah pada mata, kulit dan selaput lendir
Bahaya Kebakaran	Tidak mudah terbakar, namun jika terbakar menghasilkan asap korosif dan beracun
Peringatan Reaktivitas	Reaktif terhadap air
Toksisitas	Toksik
Kondisi Penyimpanan	Disimpan dalam wadah asli, kering dan tertutup rapat

([66], [68])

2.3 Pengendalian Kualitas

Pengendalian kualitas atau mutu dalam proses produksi karbon aktif mencakup tiga tahapan utama, yaitu *Quality Control of Raw Materials*, *Quality Control During Processing*, dan *Quality Control of Final Product*. Setiap tahap bertujuan untuk memastikan bahwa produk akhir memenuhi spesifikasi teknis yang telah ditetapkan. Pemantauan secara berkala terhadap mutu bahan baku diperlukan untuk mengidentifikasi potensi degradasi material sejak awal, yang dapat memengaruhi performa produk akhir. Proses pengendalian ini dilakukan secara sistematis dan terintegrasi agar produksi berlangsung sesuai dengan standar operasional yang telah dirancang. Pemeriksaan secara rutin juga memungkinkan deteksi dini terhadap ketidaksesuaian dalam parameter proses, sehingga koreksi dapat segera dilakukan. Dengan demikian, pengendalian mutu yang ketat merupakan elemen krusial untuk menjamin konsistensi

kualitas produk karbon aktif serta efisiensi proses produksi secara keseluruhan[69].

a. *Quality Control of Raw Material* (Pengendalian Kualitas Bahan Baku)

Tahap awal pengendalian mutu difokuskan pada evaluasi bahan baku, guna memastikan kesesuaiannya dengan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan sebelum digunakan dalam proses produksi karbon aktif. Pengujian ini bertujuan untuk menilai sejauh mana karakteristik bahan baku dapat menunjang kualitas produk akhir. Oleh karena itu, analisis menyeluruh terhadap cangkang kelapa sawit dilakukan secara proaktif sebelum proses produksi dimulai. Pengendalian kualitas pada tahap input produksi ini menjadi esensial, karena mutu bahan baku memiliki pengaruh langsung terhadap stabilitas dan performa proses, serta kualitas produk karbon aktif yang dihasilkan. Uji mutu yang diterapkan mengacu pada parameter standar pabrik, meliputi analisis proksimat (kandungan air, abu, zat mudah menguap (*volatile matter*) dan karbon (*fixed carbon*)) dan analisis ultimat (penentuan kadar unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N) dan sulfur (S) pada sampel). Hasil evaluasi ini menjadi dasar dalam menentukan kelayakan bahan baku untuk diproses lebih lanjut.

b. *Quality Control During Processing* (Pengendalian Kualitas Proses)

Sistem pengendalian proses merupakan bagian integral dari operasi industri yang bertujuan untuk mempertahankan parameter proses (seperti tekanan, suhu dan laju alir) dalam rentang yang telah ditentukan. Pada pabrik karbon aktif, pengendalian proses dilakukan terhadap parameter-

parameter utama yang terkait dengan laju aliran fluida masuk dan keluar dari unit proses, serta terhadap kondisi operasional peralatan melalui sistem kendali terotomatisasi (*automatic control system*). Proses pengawasan umumnya dijalankan melalui ruang kendali (*control room*), di mana sinyal dari berbagai instrumen pengukur/indikator dikirim ke sistem kendali pusat untuk dilakukan aksi korektif. Sistem ini memanfaatkan pengendali otomatis yang mengatur variabel proses berdasarkan sinyal kesalahan (*error signal*) terhadap nilai referensi atau *set point*. Beberapa peralatan pengendali yang digunakan antara lain[70]:

i. *Flow Rate Controller*

Merupakan alat yang mengatur laju aliran fluida di dalam pipa, baik untuk aliran masuk maupun keluar dari suatu unit operasi. Kontrol dilakukan dengan menyesuaikan bukaan *valve* berdasarkan sinyal perbandingan antara nilai aktual dan *set point* laju alir.

ii. *Temperature Controller*

Alat ini mengendalikan suhu operasi berdasarkan nilai *set point* tertentu. Jika suhu aktual menyimpang dari nilai yang ditentukan, sistem akan melakukan penyesuaian, misalnya terhadap aliran *steam* untuk menjaga kestabilan suhu proses.

iii. *Level Controller*

Dipasang pada dinding tangki, alat ini bertugas mengendalikan tinggi permukaan cairan. Bila level tidak sesuai dengan batas yang telah ditentukan, sistem akan memberikan peringatan melalui

indikator visual (lampu) atau alarm suara. Sinyal dari alat ini juga dapat digunakan untuk mengaktifkan *flow rate controller* guna melakukan tindakan korektif terhadap aliran masuk atau keluar tangki.

iv. *Pressure Controller*

Digunakan untuk mengatur tekanan di dalam sistem proses. Ketika tekanan naik atau turun melewati batas aman, *controller* akan mengaktifkan mekanisme pengatur tekanan seperti *pressure relief valve* atau *control valve* untuk menjaga kestabilan tekanan sistem.

v. *Weight Controller*

Digunakan untuk memantau berat bahan dalam unit penampung. Alat ini bekerja berdasarkan nilai *set point* maksimum kapasitas tangki atau *hopper*. Ketika berat mendekati atau melebihi batas, sistem secara otomatis mengirimkan sinyal ke *flow controller* untuk mengatur laju pasokan bahan.

c. *Quality Control of Final Product* (Pengendalian Kualitas Produk)

Tujuan utama dari pengendalian mutu produk adalah untuk memastikan bahwa karbon aktif yang dihasilkan memenuhi spesifikasi teknis **minimal** yang telah ditetapkan oleh standar nasional Indonesia (SNI). Untuk mencapai tingkat kualitas tersebut, diperlukan pengendalian yang ketat terhadap setiap variabel proses dan pemantauan berkelanjutan menggunakan sistem kontrol yang terotomatisasi agar seluruh parameter tetap berada pada nilai *set point* yang diinginkan. Evaluasi akhir produk dilakukan melalui pengujian laboratorium guna menjamin kesesuaian mutu

terhadap spesifikasi pabrik. Parameter yang dianalisis meliputi kadar air, kadar abu, luas permukaan, ukuran granular serta kapasitas adsorpsi karbon aktif yang menjadi indikator penting efisiensi produk dalam aplikasi adsorpsi.

Sistem instrumentasi memainkan peran kunci sebagai elemen pengontrol, pemantau, pencatat data proses dan pendeteksi kondisi abnormal. Instrumen ini dapat bekerja secara mekanik maupun elektrik, serta dapat dioperasikan secara manual atau otomatis tergantung pada kompleksitas sistem. Umumnya, peralatan instrumentasi dipasang baik di sekitar unit proses atau terpusat di ruang kendali untuk efisiensi operasional dan keandalan kontrol. sistem pengendalian proses secara umum terdiri dari empat elemen utama, yaitu[71]:

i. *Primary Sensing Element* (Elemen Sensor Primer)

Elemen ini berfungsi mendeteksi perubahan langsung dari variabel proses, seperti suhu, tekanan atau laju aliran.

ii. *Measurement Element* (Elemen Pengukur)

Merupakan komponen yang menerima sinyal dari sensor dan mengubahnya menjadi sinyal terukur yang dapat dikirim ke sistem kontrol. Elemen ini sangat sensitif terhadap perubahan nilai variabel proses.

iii. *Controlling Element* (Elemen Pengontrol)

Bagian dari sistem yang menerima sinyal dari elemen pengukur dan membandingkannya dengan *set point*. Bila terjadi

penyimpangan, elemen ini akan menghasilkan sinyal koreksi untuk mengembalikan sistem ke kondisi yang diinginkan.

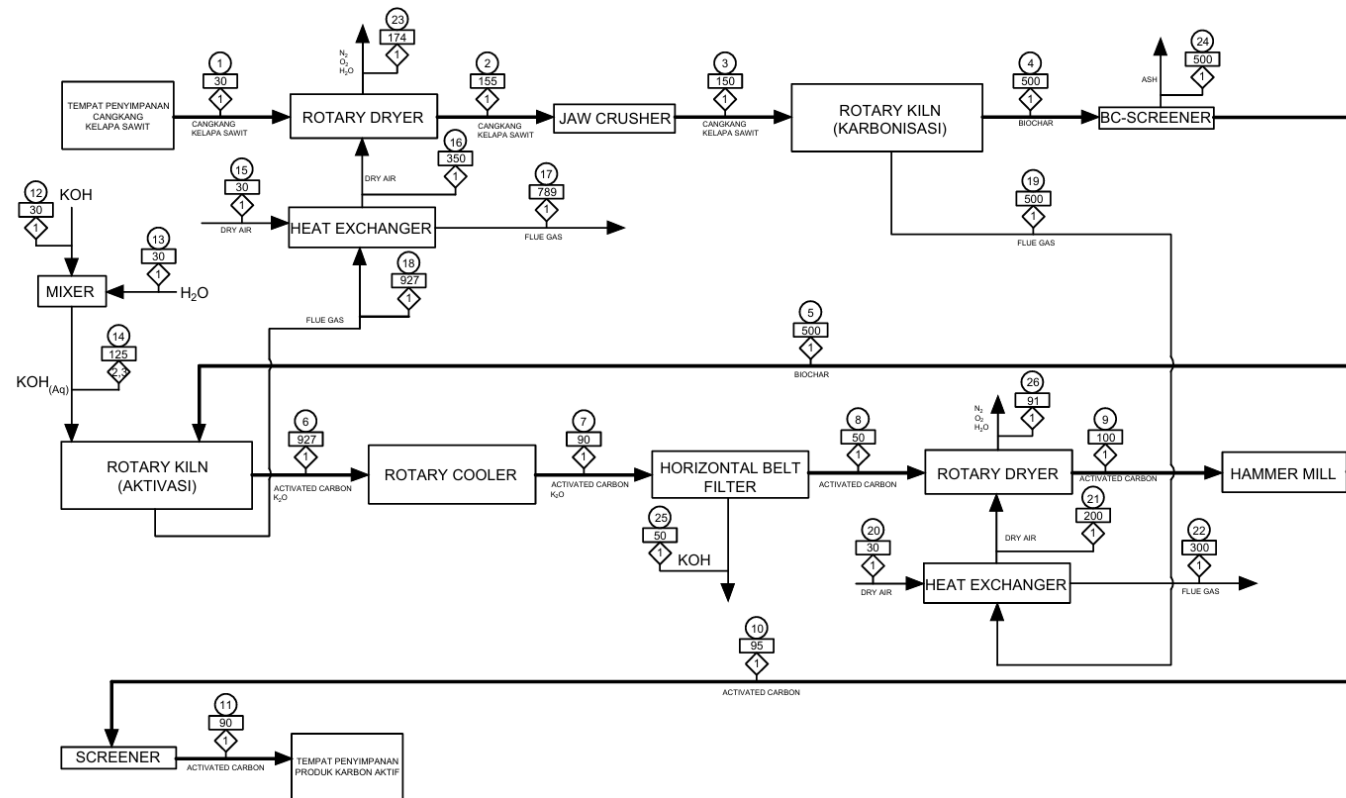
iv. *Final Control Element* (Elemen Pengontrol Akhir)

Komponen ini bertugas mengimplementasikan aksi koreksi berdasarkan sinyal dari elemen pengontrol, misalnya dengan membuka atau menutup katup, untuk menjaga variabel proses tetap dalam batas toleransi yang ditetapkan.

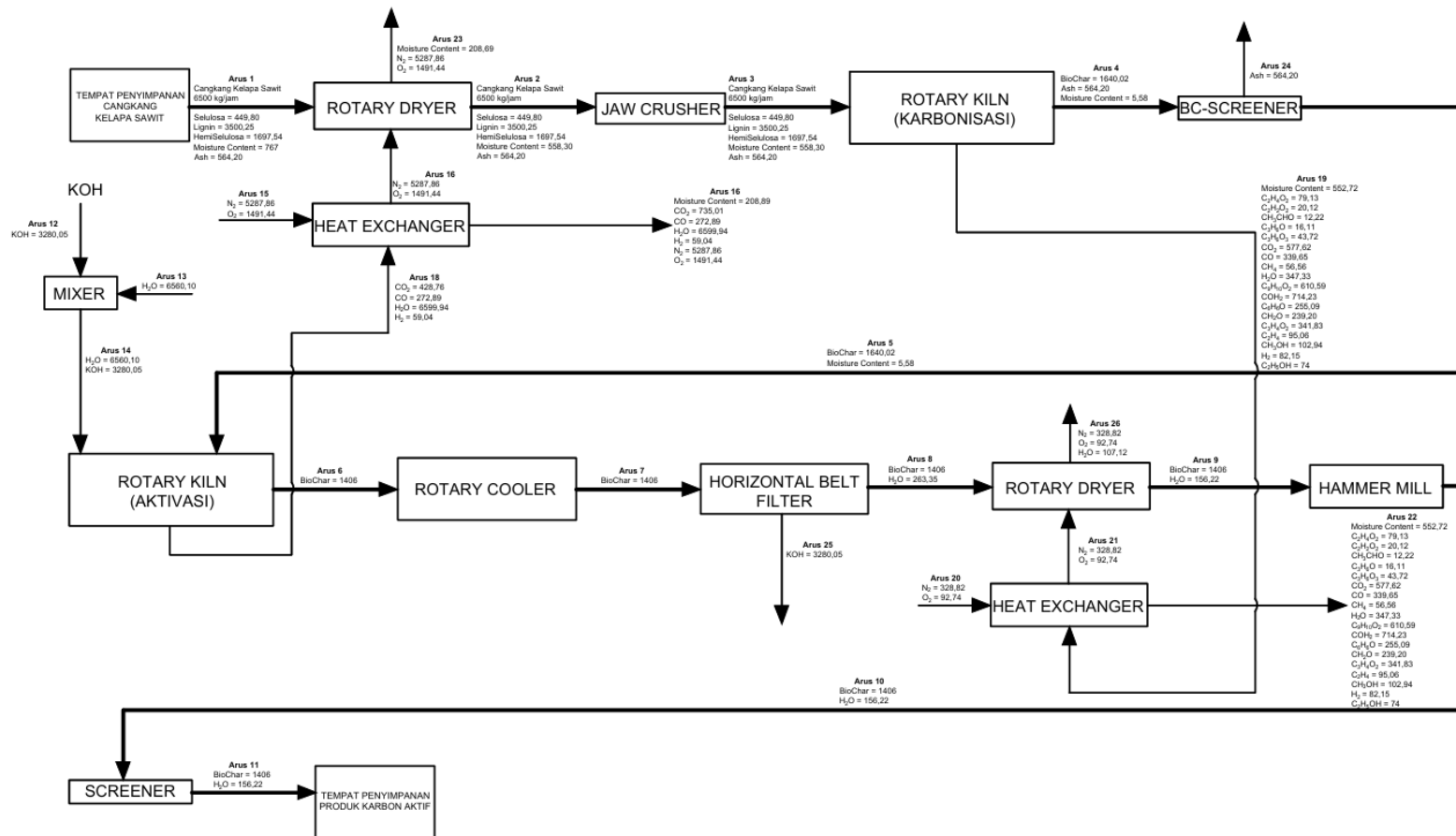
BAB III

PERANCANGAN PROSES

3.1 Diagram Alir Kualitatif



3.2 Diagram Alir Kuantitatif



3.3 Uraian Proses

a. Tahap Persiapan Bahan Baku

Proses diawali dari tempat penyimpanan cangkang kelapa sawit, *Coned Pile Stockpile*, yang memiliki luas 1.368 m² (P = 38 m, L = 36 m). Bahan baku dialirkan menuju *Rotary Dryer* (RD-101) menggunakan *Belt Conveyor* (BC-101). Di dalam RD-101, cangkang kelapa sawit mengalami proses pengeringan menggunakan udara panas bersuhu 350°C, dengan waktu tinggal sekitar 12,73 menit dan aliran udara sebesar 6.780 kg/jam. Pengeringan bertujuan untuk menurunkan kadar air awal agar memenuhi spesifikasi karbonisasi. Selanjutnya, bahan baku kering diarahkan ke unit *Jaw Crusher* (C-101), di mana cangkang kelapa sawit dihancurkan menjadi ukuran partikel 40–50 mm. Ukuran ini dianggap paling optimal untuk proses karbonisasi karena mengonsumsi energi paling rendah pada rentang ukuran tersebut.

b. Tahap Karbonisasi dan Aktivasi

Material hasil *output Jaw Crusher* kemudian ditransportasikan menuju alat *Rotary Kiln* (R-101). Pada alat tersebut, terjadi proses karbonisasi dengan suhu 500°C dan waktu tinggal selama 2,55 menit. Proses ini bertujuan untuk mengubah kandungan organik dalam cangkang kelapa sawit (selulosa, hemiselulosa dan lignin) menjadi karbon padat atau arang (*char*), sambil melepaskan zat volatil. *Rotary Kiln* dipilih karena kemampuannya memberikan pemanasan seragam dengan rotasi dan atmosfer terbatas yang sesuai untuk proses karbonisasi.

Char hasil karbonisasi selanjutnya dikontakkan dengan larutan KOH pada unit *Rotary Kiln* (RK-102) yang berfungsi sebagai reaktor aktivasi. Sebelum masuk RK-102, KOH (3280 kg/jam) dan air (6560 kg/jam) dicampurkan secara kontinu dalam sistem pencampuran terintegrasi (*Mixer* M-101). Aktivasi berlangsung pada suhu tinggi, yakni 927°C. Rasio aktivator terhadap *char* adalah 2:1 (berbasis massa), yang didesain untuk menghasilkan pori mikro dan luas permukaan tinggi pada karbon. *Rotary Kiln* kembali dipilih karena cocok untuk aktivasi kimia bersuhu tinggi dengan pencampuran dinamis, mencegah aglomerasi padatan.

Produk keluaran dari RK-102 berupa karbon aktif panas. Suhu karbon aktif diturunkan dengan cara memasukkan karbon aktif ke unit *Rotary Cooler* (RC-101) untuk menurunkan suhu dari 927°C menjadi sekitar 90°C menggunakan aliran udara pendingin. Proses ini bertujuan menghindari degradasi termal lebih lanjut, memanfaatkan energi panas serta mempersiapkan material untuk tahap pencucian.

c. Tahap Pencucian dan Pengeringan

Setelah pendinginan, karbon aktif dikirim ke unit *Horizontal Belt Filter* (HBF-101), tempat proses pencucian berlangsung. Larutan pencuci berupa air bersuhu 30°C disemprotkan ke karbon aktif pada suhu 90°C. Pencucian dilakukan dengan debit 790 kg/jam, menurunkan suhu karbon aktif hingga sekitar 40 °C. Tujuan pencucian adalah untuk menghilangkan residu K₂O yang tertinggal setelah aktivasi. *Horizontal Belt Filter* dipilih karena memungkinkan pencucian kontinu dan seragam pada permukaan

padatan serta meningkatkan efisiensi pencucian. Produk yang telah dicuci selanjutnya dikeringkan kembali di *Rotary Dryer* (RD-102) menggunakan udara panas bersuhu 200 °C. Produk mengalami waktu tinggal selama 3,77 menit, dengan aliran udara panas sebesar 421 kg/jam. Proses ini mengurangi kadar air akhir agar sesuai dengan spesifikasi produk granular kering ($\leq 10\%$).

d. Tahap Penghalusan dan Sortasi

Karbon aktif kering dihancurkan lebih lanjut di *Hammer Mill* (C-102) untuk mencapai ukuran produk akhir sebesar 1–3 mm. Setelah itu, produk dialirkan menuju *Electrically Vibrated Screen* (VS-101), yang berfungsi menyortir partikel berdasarkan ukuran untuk menghasilkan produk granular dengan distribusi ukuran partikel yang seragam sesuai spesifikasi produk.

3.4 Spesifikasi Alat

Tabel 3.1 Spesifikasi Tempat Penyimpanan Bahan Baku

Spesifikasi Umum	
Nama	Tempat Penyimpanan Bahan Baku
Kode	TP-101
Tipe	<i>Coned Pile Stockpile</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat
Metode Penimbunan	<i>Open Stockpile</i>
Fungsi	Menyimpan cangkang kelapa sawit sebelum dialirkan menuju RD-101
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	25–30°C
Tekanan	1 atm
Laju Alir <i>Feed</i> Keluar	6.978,79 kg/jam
Lama Penyimpanan	14 hari
Aspek Perancangan	
<i>Angle of Repose</i>	35 degree
Tinggi Tumpukan (<i>h</i>)	9,80 m
Diameter Bawah Tumpukan (<i>R</i>)	14 m
Diameter Atas Tumpukan (<i>r</i>)	7 m
Panjang Lahan	38 m
Lebar Lahan	36 m
Luas Lahan	1.386 m ²

Tabel 3.2 Spesifikasi *Rotary Dryer*

Spesifikasi Umum	
Nama	<i>Rotary Dryer</i>
Kode	RD-101
Tipe	<i>Rotating Cylinder/Drum (Single Shell)</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat
Media Pengering	Udara Panas
<i>Contacting Method</i>	<i>Direct Contact</i>
<i>Air Flow Option</i>	<i>Counter-Current</i>
Jumlah	1 buah
Fungsi	Menghilangkan kadar air pada cangkang kelapa sawit hingga tersisa 8%
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	30°C
Suhu Produk	155,58°C
Suhu Masuk Udara Panas	350°C
Suhu Keluar Udara Panas	175,13°C
Kecepatan <i>Superficial</i> Udara Panas	0,5 kg.m ² s
Jumlah Udara Panas	6.779,32 kg/jam
Laju Alir <i>Feed</i>	6.978,79 kg/jam
Tekanan	1,1 atm
Aspek Perancangan	
Diameter	2,19 m
Panjang	13,85 m
Kecepatan Putar	5 rpm
<i>Residence Time</i>	12,74 menit
Jenis <i>Flight</i>	<i>Radial Flight</i>
Jumlah <i>Flight</i> per Circle	18 buah
Tinggi <i>Flight</i>	0,27 m
Jarak Antar <i>Flight</i>	0,38 m

Jumlah <i>Flight</i>	2 buah
Tebal <i>Rotary Dryer</i>	0,19 in
Daya yang Dibutuhkan	20,63 kW
Bahan Konstruksi	<i>Stainless Steel AISI-304 (UNS-S30400)</i>



Tabel 3.3 Spesifikasi *Jaw Crusher*

Spesifikasi Umum	
Nama	<i>Jaw Crusher</i>
Kode	C-101
Tipe	<i>Rotating Cylinder/Drum (Single Shell)</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat
Jumlah	1 buah
Fungsi	Menghancurkan cangkang kelapa sawit hingga berukuran 40–50 mm.
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	153°C
Tekanan	1 atm
Aspek Perancangan	
Kapasitas	7,46 ton/jam
<i>RPM</i>	400 rpm
<i>Feed Opening</i>	8 x 24 in
<i>Closed Setting</i>	1,5 in
<i>Crushing Angles</i>	27 degree
Daya yang Dibutuhkan	4,55 kW
Bahan <i>Jaw Plates</i>	<i>High Manganese Steel ASTM A128 Grade A with Epoxy Coating</i>

Tabel 3.4 Spesifikasi *Rotary Kiln*

Spesifikasi Umum	
Nama	<i>Rotary Kiln</i>
Kode	R-101
Tipe	<i>Horizontal Rotating Cylinder</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat
Media Pemanas	Gas Panas dari Pembakaran Batu Bara
<i>Contacting Method</i>	<i>Indirect Fired</i>
<i>Air Flow Option</i>	<i>Cross Flow</i>
Jumlah	1 buah
Fungsi	Mengkarbonisasi cangkang kelapa sawit menjadi karbon/ <i>char</i>
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	150°C
Suhu Produk	500°C
Suhu Masuk Udara Panas	783,32°C
Suhu Keluar Udara Panas	256,45°C
Kecepatan Gas Panas	20 m/s
Laju Alir <i>Feed</i>	6.770,09 kg/jam
Tekanan	1,33 atm
Aspek Perancangan	
Jenis Reaktor	<i>Indirect Heat Rotary Kiln</i>
Diameter	1,52 m
Panjang	18,28 m
Luas Penampang	1,82 m ²
Kecepatan Putar	2,3 rpm
Diameter Pipa Gas	0,03 m
<i>Residence Time</i>	2,56 menit
<i>Degrees Inclination to Horizontal</i>	33 degree
Tebal <i>Shell</i>	12,00 mm

Jenis <i>Seal</i>	<i>Leaf Seal</i>
Jenis <i>Refractory</i>	<i>Castable Refractory</i>
Tebal <i>Refractory</i>	150,04 mm
Jumlah <i>Flight</i>	2 buah
Tinggi <i>Flight</i>	0,1524 m
<i>Overall Heat Transfer</i>	37,65 kcal/m ² hr °C
Suhu Keluar Gas Panas	256,45°C
Daya yang Dibutuhkan	10,3 kW
Bahan Konstruksi	<i>Stainless Steel ASTM A240 Grade 304</i>

Tabel 3.5 Spesifikasi *Mixer*

Spesifikasi Umum	
Nama	<i>Mixer</i>
Kode	M-101
Jenis	<i>Agitator Tank Mixer</i>
Tipe	<i>Closed-Loop Mixer with Top Entry Agitator</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat dan Cair
Tipe <i>Mixing Flow</i>	<i>Axial Flow</i>
Jumlah	1 buah
Fungsi	Mencampur KOH padat dengan H ₂ O sehingga membentuk larutan KOH
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	30°C
Suhu Produk	95°C
Laju Alir KOH Padat	3.280,05 kg/jam
Laju Alir H ₂ O	6560,11 kg/jam
Tekanan	2,36 atm
Aspek Perancangan	
Bentuk Dasar Tangki	<i>Dished Bottom</i>
Bentuk Tutup Tangki	<i>Dished Cover</i>
Volume	6.390 L
Diameter	2,01 m
Tinggi	2,41 m
Tipe <i>Impeller</i>	<i>Pitched Blade Turbine</i>
Kecepatan Putar <i>Impeller</i>	120 rpm
Diameter <i>Impeller</i>	0,67 m
Tinggi <i>Impeller</i> dari Dasar	0,67 m
Lebar <i>Blade Impeller</i>	0,13 m
Jumlah <i>Baffle</i>	4 <i>baffle</i> , simetris 90°
Panjang <i>Baffle</i>	1,91 m

Lebar <i>Baffle</i>	0,20 m
Tebal <i>Baffle</i>	0,02 m
Besar <i>Torque</i> di <i>Shaft</i>	1.193,75 Nm
Diameter <i>Shaft</i>	55 mm
Daya yang Dibutuhkan	15 kW
Bahan Konstruksi	<i>Stainless Steel SS 316 L</i>



Tabel 3.6 Spesifikasi *Rotary Kiln* (2)

Spesifikasi Umum	
Nama	<i>Rotary Kiln</i>
Kode	R-102
Tipe	<i>Horizontal Rotating Cylinder</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat
Media Pemanas	Gas Panas dari Pembakaran Batu Bara
<i>Contacting Method</i>	<i>Indirect Fired</i>
<i>Air Flow Option</i>	<i>Cross Flow</i>
Jumlah	1 buah
Fungsi	Mengaktivasi <i>char</i> menjadi karbon aktif dengan bantuan katalis KOH
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	500°C
Suhu Produk	927°C
Suhu Masuk Udara Panas	1.100°C
Suhu Keluar Udara Panas	783,33°C
Kecepatan Gas Panas	20 m/s
Laju Alir <i>Feed</i>	11.485,77 kg/jam
Tekanan	1,49 atm
Aspek Perancangan	
Jenis Reaktor	<i>Indirect Heat Rotary Kiln</i>
Diameter	2,13 m
Panjang	21,33 m
Luas Penampang	3,57 m ²
Kecepatan Putar	2,3 rpm
Diameter Pipa Gas	0,03 m
<i>Residence Time</i>	2,13 menit
<i>Degrees Inclination to Horizontal</i>	33 degree
Tebal <i>Shell</i>	10,80 mm

<i>Jenis Seal</i>	<i>Leaf Seal</i>
<i>Jenis Refractory</i>	<i>Castable Refractory</i>
<i>Tebal Refractory</i>	182,45 mm
<i>Jumlah Flight</i>	3 buah
<i>Tinggi Flight</i>	0,2133 m
<i>Overall Heat Transfer</i>	44,67 kcal/m ² hr °C
<i>Suhu Keluar Gas Panas</i>	783,33°C
<i>Daya yang Dibutuhkan</i>	23,9 kW
<i>Bahan Konstruksi</i>	<i>Alloy C-276 UNS N10276</i>

Tabel 3.7 Spesifikasi *Rotary Cooler*

Spesifikasi Umum	
Nama	<i>Rotary Cooler</i>
Kode	RC-101
Tipe	<i>Direct Rotary Cooler</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat
Media Pendingin	Udara
<i>Contacting Method</i>	<i>Direct Contact</i>
<i>Air Flow Option</i>	<i>Counter-Current</i>
Jumlah	1 buah
Fungsi	Mendinginkan karbon aktif keluaran <i>Rotary Kiln</i> (R-102)
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	927°C
Suhu Produk	90°C
Suhu Masuk Udara Pendingin	30°C
Suhu Keluar Udara Pendingin	500°C
Kecepatan <i>Superficial</i> Udara Pendingin	0,5 kg.m ² s
Jumlah Udara Pendingin	6.380,13 kg/jam
Laju Alir <i>Feed</i>	4.159,35 kg/jam
Tekanan	1,1 atm
Aspek Perancangan	
Diameter	2,12 m
Panjang	16,91 m
Kecepatan Putar	4 rpm
<i>Residence Time</i>	31,44 menit
Jenis <i>Flight</i>	<i>Radial Flight</i>
Jumlah <i>Flight</i> per Circle	17 buah
Tinggi <i>Flight</i>	0,27 m
Jarak Antar <i>Flight</i>	0,39 m

Jumlah <i>Flight</i>	2 buah
Tebal <i>Rotary Cooler</i>	0,25 in
Daya yang Dibutuhkan	19,43 kW
Bahan Konstruksi	<i>Carbon Steel SA 387 Grade 11</i>



Tabel 3.8 Spesifikasi *Horizontal Belt Filter*

Spesifikasi Umum	
Nama	<i>Horizontal Belt Filter</i>
Kode	HBF-101
Tipe	<i>Vacuum Horizontal Belt Filter</i>
Fase <i>Feed</i>	<i>Slurry</i>
Zat Pencuci	Air
Metode Pencucian	<i>Spray Nozzle</i>
Jumlah	1 buah
Fungsi	Membersihkan karbon aktif dari K_2O dan me-recycle K_2O menjadi KOH
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	90°C
Suhu Produk	50°C
Jumlah Air Pencuci	790,05 kg/jam
Laju Alir <i>Feed</i>	4159,35 kg/jam
Tekanan	1 atm
Aspek Perancangan	
Jenis <i>Belt</i>	<i>Hot Bonded Belt</i>
Luas Area Filtrasi	32,13 m ²
Panjang HBF	12 m
Panjang <i>Belt</i>	25,2 m
Lebar <i>Belt</i>	4 m
Kecepatan <i>Belt</i>	0,0188 m/s
Panjang Zona Filtrasi	8,03 m
Panjang Zona Pengeringan	3,97 m
Waktu Filtrasi	3 menit
Jumlah <i>Stages</i> Pencucian	6 <i>stages</i>
Jarak Antar <i>Stages</i> Pencucian	1,34 m
Jenis <i>Nozzle</i>	<i>Flat Fan Nozzle, Full Cone Nozzle, Hollow Cone Nozzle dan Mist Spray</i>

Jumlah <i>Nozzle</i>	11 buah
Jarak Antar <i>Nozzle</i>	2 m
Jarak <i>Nozzle</i> Terhadap Padatan	0,58 m
Diameter Pipa Pencucian	1 in
Material Rangka Utama	<i>Stainless Steel 304/316</i>
Material <i>Belt</i>	<i>Polyester</i>
Material Pipa Pencucian	<i>Polyvinyl Chloride</i>
Material <i>Nozzle</i>	<i>Stainless Steel</i>



Tabel 3.9 Spesifikasi *Rotary Dryer* (2)

Spesifikasi Umum	
Nama	<i>Rotary Dryer</i>
Kode	RD-102
Tipe	<i>Rotating Cylinder/Drum (Single Shell)</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat
Media Pengering	Udara Panas
<i>Contacting Method</i>	<i>Direct Contact</i>
<i>Air Flow Option</i>	<i>Counter-Current</i>
Jumlah	1 buah
Fungsi	Menghilangkan kadar air pada karbon aktif hingga tersisa $\leq 10\%$
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	50°C
Suhu Produk	100°C
Suhu Masuk Udara Panas	200°C
Suhu Keluar Udara Panas	91,91°C
Kecepatan <i>Superficial</i> Udara Panas	0,5 kg.m ² s
Jumlah Udara Panas	421,57 kg/jam
Laju Alir <i>Feed</i>	1.669,35 kg/jam
Tekanan	1,1 atm
Aspek Perancangan	
Diameter	0,55 m
Panjang	3,45 m
Kecepatan Putar	14 rpm
<i>Residence Time</i>	3,77 menit
Jenis <i>Flight</i>	<i>Radial Flight</i>
Jumlah <i>Flight</i> per Circle	5 buah
Tinggi <i>Flight</i>	0,07 m
Jarak Antar <i>Flight</i>	0,34 m

Jumlah <i>Flight</i>	1 buah
Tebal <i>Rotary Dryer</i>	0,19 in
Daya yang Dibutuhkan	1,28 kW
Bahan Konstruksi	<i>Stainless Steel AISI-304</i> (UNS-S30400)



Tabel 3.10 Spesifikasi *Hammer Mill*

Spesifikasi Umum	
Nama	<i>Hammer Mill</i>
Kode	C-102
Tipe	<i>Mikro-Pulverizer</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat
Jumlah	1 buah
Fungsi	Menghancurkan cangkang kelapa sawit hingga berukuran 1–3 mm.
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	100°C
Tekanan	1 atm
Aspek Perancangan	
Kapasitas	4.133,78 lb/jam
<i>RPM</i>	4.600 rpm
<i>Feed Opening</i>	8 x 24 in
Diameter <i>Rotor</i>	18 in
Daya yang Dibutuhkan	7,2 kW
Bahan <i>Hammer</i>	<i>High Chromium Cast Iron</i>

Tabel 3.11 Spesifikasi *Screener*

Spesifikasi Umum	
Nama	<i>Screener</i>
Kode	VS-101
Jenis	<i>Electrically Vibrated Screen</i>
Tipe	<i>Hum-mer Screen</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat
Jumlah	1 buah
Fungsi	Memisahkan karbon aktif ukuran >3 mm untuk di-recycle ke <i>Hammer Mill</i>
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	95°C
Tekanan	1 atm
Aspek Perancangan	
Kapasitas	49,61 tons/day
<i>Screen Area</i>	2,5 ft ²
<i>Inclination</i>	10°
<i>Vibrating Direction Angle</i>	60°
<i>Screen Amplitude</i>	3,5 mm
Kecepatan Getaran	80 vibrations/detik
Bahan Konstruksi	<i>Low Carbon Steel ASTM A36 with Epoxy Coating</i>

Tabel 3.12 Spesifikasi Silo

Spesifikasi Umum	
Nama	Silo
Kode	S-101
Tipe	<i>Vertical Cylinder with Conical Head</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat
Jumlah	1 buah
Fungsi	Tempat penyimpanan karbon aktif
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	90°C
Tekanan	1 atm
Tekanan Desain	1,1 atm
Lama Penyimpanan	7 hari
Aspek Perancangan	
Volume	157,47 m ³
Diameter <i>Shell</i>	4,52 m
Diameter <i>Conical</i>	0,75 m
Tinggi <i>Shell</i>	9,05 m
Tinggi <i>Conical</i>	1,89 m
Tebal <i>Shell</i>	0,25 in
Tebal <i>Conical</i>	0,3125 in
Bahan Konstruksi	<i>Low Alloy Steel ASTM A572 Grade 50</i>

Tabel 3.13 Spesifikasi *Heat Exchanger*

Spesifikasi Umum				
Nama	Heat Exchanger			
Kode	HE-101			
Jenis	Heater			
Tipe	Double-Pipe Exchanger			
Fase Feed	Gas			
Media Pemanas	Flue Gas			
Air Flow Option	Counter-Current			
Jumlah	1 buah			
Fungsi	Memanaskan udara sebelum dialirkan ke Rotary Dryer (RD-101)			
Kondisi Operasi				
Suhu Feed	30°C			
Suhu Produk	350°C			
Suhu Masuk Flue Gas	927°C			
Suhu Keluar Flue Gas	799,93°C			
Laju Alir Feed	6.779,32 kg/jam			
Laju Alir Flue Gas	7.326,42 kg/jam			
Aspek Perancangan				
Geometri Heat Exchanger	Annulus (Dry Air)		Inner Pipe (Flue Gas)	
	IPS	4	IPS	3
	Sch No.	80	Sch No.	80
	ID (in)	3,826	ID (in)	2,900
	OD (in)	4,500	OD (in)	3,500
	a_a (ft ²)	0,013	a_p (ft ²)	0,046
Pressure Drop	ΔP_a (psi)	6,476	ΔP_p (psi)	6,003
Spesifikasi Heat Exchanger	ΔT_{LMTD}		1.203,90	°F
	A		69,61	ft ²
	U_c		177,23	Btu/jam ft ² °F
	U_D		47,44	Btu/jam ft ² °F
	R_d		0,0154	ft ² jam °F/Btu
	Panjang Pipa		80	ft
	Jumlah Hairpin	2	buah	
Bahan Konstruksi	Stainless Steel AISI 316			

Tabel 3.14 Spesifikasi *Heat Exchanger* (2)

Spesifikasi Umum				
Nama	Heat Exchanger			
Kode	HE-102			
Jenis	Heater			
Tipe	Double-Pipe Exchanger			
Fase Feed	Gas			
Media Pemanas	Flue Gas			
Air Flow Option	Counter-Current			
Jumlah	1 buah			
Fungsi	Memanaskan udara sebelum dialirkan ke Rotary Dryer (RD-102)			
Kondisi Operasi				
Suhu Feed	30°C			
Suhu Produk	200°C			
Suhu Masuk Flue Gas	500°C			
Suhu Keluar Flue Gas	489,51°C			
Laju Alir Feed	421,57 kg/jam			
Laju Alir Flue Gas	3826,05 kg/jam			
Aspek Perancangan				
Geometri Heat Exchanger	Annulus (Dry Air)		Inner Pipe (Flue Gas)	
	IPS	3	IPS	2
	Sch No.	80	Sch No.	80
	ID (in)	2,900	ID (in)	1,939
	OD (in)	4,500	OD (in)	2,380
	a_a (ft ²)	0,015	a_p (ft ²)	0,021
Pressure Drop	ΔP_a (psi)	0,0453	ΔP_p (psi)	1,8033
Spesifikasi Heat Exchanger	ΔT_{LMTD}		673,38	°F
	A		64,09	ft ²
	U_c		101,10	Btu/jam ft ² °F
	U_D		42,93	Btu/jam ft ² °F
	R_d		0,0134	ft ² jam °F/Btu
	Panjang Pipa		120	ft
	Jumlah Hairpin		3	buah
Bahan Konstruksi	Stainless Steel AISI 316			

Tabel 3.15 Spesifikasi *Bucket Elevator*

Spesifikasi Umum	
Nama	<i>Bucket Elevator</i>
Kode	BE-101
Tipe	<i>Continuous-Bucket Elevator</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat
Jumlah	1 buah
Fungsi	Membawa karbon aktif secara vertikal menuju silo (S-101)
Kondisi Operasi	
Suhu <i>Feed</i>	90°C
Tekanan	1 atm
Aspek Perancangan	
Kapasitas	1.874,67 kg/jam
<i>Size of Bucket</i>	203 x 140 x 197 mm
<i>Bucket Spacing</i>	203 mm
<i>Elevator Centers</i>	7,62 m
<i>Head Shaft Speed</i>	28 rpm
<i>Power Required for Head Shaft</i>	1,32 kW
<i>Power Required for Inter. Length</i>	0,04 kW
Total Daya yang Dibutuhkan	1,37 kW

Tabel 3.16 Spesifikasi Alat Transportasi Padatan

Spesifikasi Umum		
Nama	<i>Belt Conveyor</i>	<i>Belt Conveyor with Screener</i>
Kode	BC-101	BC Scr-101
Tipe	<i>Throughed Belt on 20° Idlers</i>	<i>Throughed Belt on Continuous Plate</i>
Fase Feed	Padat	Padat
Jumlah	1 buah	3 buah
Fungsi	Membawa bahan baku dari <i>Stockpile</i> (TP-101) menuju <i>Hopper</i> (H-101)	Membawa <i>char</i> dari R-101 menuju R-102 dan memisahkan <i>Ash</i>
Kondisi Operasi		
Suhu Feed	30°C	500°C
Tekanan	1 atm	1 atm
Aspek Perancangan		
Kapasitas	6.978,79 kg/jam	2.651,77 kg/jam
Bahan Belt	<i>Rubber Belt</i>	<i>Kevlar-Reinforced Rubber Belt</i>
Lebar Belt	75 cm	75 cm
Kecepatan Belt	91 m/menit	91 m/menit
CSA of Load	0,049 m ²	0,049 m ²
Jumlah Belt Plies	4	4
Max. Lump Size	305 mm	305 mm
Slope	18,17°	1,90°
Panjang Belt Conv.	11,05 m	5,01 m
Screen Amplitude	-	5 mm
Kecepatan Getar	-	80 vibrations/detik
Inclination	-	10°
Vib. Direction Angle	-	30°
Power Required	12,80 kW	22,33 kW

Tabel 3.17 Spesifikasi Alat Transportasi Padatan (2)

Spesifikasi Umum		
Nama	<i>Screw Conveyor</i>	<i>Screw Conveyor</i>
Kode	SC-101	SC-102
Tipe	<i>Plain Spouts of Chutes</i>	<i>Plain Spouts of Chutes</i>
Fase Feed	Padat	Padat
Jumlah	1 buah	1 buah
Fungsi	Membawa cangkang kelapa sawit dari RD-101 menuju C-101	Membawa cangkang kelapa sawit dari C-101 menuju R-101
Kondisi Operasi		
Suhu Feed	155°C	150°C
Tekanan	1 atm	1 atm
Aspek Perancangan		
Kapasitas	8.124,11 kg/jam	8.124,11 kg/jam
Bahan Belt	<i>Special Rubber Belt</i>	<i>Special Rubber Belt</i>
Panjang Conveyor	3,16 m	6,29 m
Slope	18,43°	17,48°
Diameter of Flight	0,2540 m	0,2540 m
Diameter of Pipe	0,0635 m	0,0635 m
Diameter of Shafts	0,0508 m	0,0508 m
Hanger Centers	3,0479 m	3,0479 m
Speed	55 rpm	55 rpm
Power Required	0,6250 kW	1,2426 kW

Tabel 3.18 Spesifikasi Alat Transportasi Padatan (3)

Spesifikasi Umum		
Nama	<i>Screw Conveyor</i>	<i>Screw Conveyor</i>
Kode	SC-103	SC-104
Tipe	<i>Side Inlet Gate</i>	<i>Plain Spouts of Chutes</i>
Fase Feed	Padat	Padat
Jumlah	3 buah	1 buah
Fungsi	Membawa produk dari RC-101 menuju HBF-101	Membawa karbon aktif dari HBF-101 menuju RD-102
Kondisi Operasi		
Suhu Feed	90°C	50°C
Tekanan	1 atm	1 atm
Aspek Perancangan		
Kapasitas	4.991,22 kg/jam	2.003,22 kg/jam
Bahan Belt	<i>Special Rubber Belt</i>	<i>Rubber Belt</i>
Panjang Conveyor	3,0046 m	5,39 m
Slope	3,18°	21,80°
Diameter of Flight	0,2540 m	0,2286 m
Diameter of Pipe	0,0635 m	0,0635 m
Diameter of Shafts	0,0508 m	0,0508 m
Hanger Centers	3,0479 m	3,0479 m
Speed	55 rpm	40 rpm
Power Required	1,2426 kW	1,2426 kW

Tabel 3.19 Spesifikasi Alat Transportasi Padatan (4)

Spesifikasi Umum		
Nama	<i>Screw Conveyor</i>	<i>Screw Conveyor</i>
Kode	SC-105	SC-106
Tipe	<i>Plain Spouts of Chutes</i>	<i>Plain Spouts of Chutes</i>
Fase Feed	Padat	Padat
Jumlah	1 buah	1 buah
Fungsi	Membawa karbon aktif dari RD-102 menuju C-102	Membawa karbon aktif dari C-102 menuju VS-101
Kondisi Operasi		
Suhu Feed	100°C	95°C
Tekanan	1 atm	1 atm
Aspek Perancangan		
Kapasitas	1.874,67 kg/jam	1.874,67 kg/jam
Bahan Belt	<i>Special Rubber Belt</i>	<i>Special Rubber Belt</i>
Panjang Conveyor	5,3852 m	2,0025 m
Slope	21,80°	2,86°
Diameter of Flight	0,2286 m	0,2286 m
Diameter of Pipe	0,0635 m	0,0635 m
Diameter of Shafts	0,0508 m	0,0508 m
Hanger Centers	3,0479 m	3,0479 m
Speed	40 rpm	40 rpm
Power Required	1,2426 kW	0,3162 kW

Tabel 3.20 Spesifikasi Alat Transportasi Padatan (5)

Spesifikasi Umum		
Nama	<i>Screw Conveyor</i>	<i>Screw Conveyor</i>
Kode	SC-107	SC-108
Tipe	<i>Plain Spouts of Chutes</i>	<i>Plain Spouts of Chutes</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat	Padat
Jumlah	1 buah	1 buah
Fungsi	Membawa karbon aktif dari VS-101 menuju BE-101	Membawa KOH padat dari <i>Hopper</i> (H-105) menuju <i>Mixer</i> (M-101)
Kondisi Operasi		
Suhu <i>Feed</i>	90°C	50°C
Tekanan	1 atm	1 atm
Aspek Perancangan		
Kapasitas	1.874,67 kg/jam	3.936,06 kg/jam
Bahan <i>Belt</i>	<i>Special Rubber Belt</i>	<i>Rubber Belt</i>
Panjang <i>Conveyor</i>	3,00 m	3,1623 m
<i>Slope</i>	0°	18,43°
<i>Diameter of Flight</i>	0,2286 m	0,2286 m
<i>Diameter of Pipe</i>	0,0635 m	0,0635 m
<i>Diameter of Shafts</i>	0,0508 m	0,0508 m
<i>Hanger Centers</i>	3,0479 m	3,0479 m
<i>Speed</i>	40 rpm	40 rpm
<i>Power Required</i>	0,3162 kW	0,3162 kW

Tabel 3.21 Spesifikasi Alat Transportasi Cairan

Spesifikasi Umum		
Nama	Pompa	Pompa
Kode	P-101	P-102
Tipe	<i>Centrifugal Pump</i>	<i>Mini Centrifugal Pump</i>
Fase <i>Feed</i>	Cair	Cair
Jumlah	1 buah	1 buah
Fungsi	Mengalirkan KOH dari <i>Mixer</i> (M-101) menuju <i>Rotary Kiln</i> (R-102)	Mengalirkan air pencuci menuju HBF-101
Kondisi Operasi		
Suhu <i>Feed</i>	95°C	30°C
Tekanan	1 atm	1 atm
Aspek Perancangan		
Kapasitas	10,83 m ³ /jam	0,87 m ³ /jam
<i>NPS</i>	2 in	½ in
ID	2,067 in	0,622 in
OD	2,380 in	0,840 in
<i>Flow Area</i>	3,350 in ²	0,304 in ²
<i>Schedule No.</i>	40	40
<i>Efficiency</i>	61%	80%
<i>NPSH_R</i>	1,40 m	-
<i>Power Required</i>	1,12 kW (1,5 hp)	0,75 kW (1 hp)
Bahan Konstruksi	<i>Stainless Steel AISI 316L</i>	<i>Carbon Steel</i>

Tabel 3.22 Spesifikasi Alat Transportasi Cairan (2)

Spesifikasi Umum		
Nama	Pompa	Pompa
Kode	P-103	P-201
Tipe	<i>Hose Pump</i>	<i>Centrifugal Pump</i>
Fase Feed	<i>Slurry</i>	Cair
Jumlah	1 buah	1 buah
Fungsi	Mengalirkan larutan KOH menuju Hopper (H-105)	Mengalirkan air menuju Mixer (M-101)
Kondisi Operasi		
Suhu Feed	50°C	30°C
Tekanan	1 atm	1 atm
Aspek Perancangan		
Kapasitas	1,70 m ³ /jam	7,22 m ³ /jam
NPS	1 in	1,25
ID	1,049 in	1,380 in
OD	1,320 in	1,660 in
Flow Area	0,864 in ²	1,500 in ²
Schedule No.	40	40
Efficiency	40%	50%
NPSH _R	1,40 m	1,03 m
Power Required	1,12 kW (1,5 hp)	1,12 kW (1,5 hp)
Bahan Konstruksi	<i>Stainless Steel AISI 316L</i>	<i>Carbon Steel</i>

Tabel 3.23 Spesifikasi Alat Penyimpanan Padatan

Spesifikasi Umum		
Nama	<i>Hopper</i>	<i>Hopper</i>
Kode	H-101	H-102
Tipe	<i>Conical Hopper</i>	<i>Conical Hopper</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat	Padat
Jumlah	1 buah	1 buah
Fungsi	Menampung <i>feed</i> dari BC-101 dan dimasukkan ke RD-101	Menampung keluaran SC-101 dan dimasukkan ke C-101
Kondisi Operasi		
Suhu <i>Feed</i>	30°C	155°C
Tekanan	1 atm	1 atm
Aspek Perancangan		
Kapasitas	5,0042 m ³	2,6061 m ³
Tekanan Desain	1,1 atm	1,1 atm
Lama Penyimpanan	1 jam	1 jam
<i>Inlet Diameter</i>	2,8794 m	2,3166 m
<i>Outlet Diameter</i>	0,0566 m	0,0575 m
Tinggi <i>Hopper</i>	2,2582 m	1,8073 m
Tebal <i>Hopper</i>	0,2500 in	0,2500 in
<i>Wall Angle</i>	38,86°	38,86°
Bahan Konstruksi	<i>Carbon Steel ASTM A36</i>	<i>Low Alloy Steel ASTM A387 Grade 2</i>

Tabel 3.24 Spesifikasi Alat Penyimpanan Padatan (2)

Spesifikasi Umum		
Nama	<i>Hopper</i>	<i>Hopper</i>
Kode	H-103	H-104
Tipe	<i>Conical Hopper</i>	<i>Conical Hopper</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat	Padat
Jumlah	1 buah	1 buah
Fungsi	Menampung <i>feed</i> dari SC-102 dan dimasukkan ke R-101	Menampung keluaran BC Scr-101 dan diumpan ke R-102
Kondisi Operasi		
Suhu <i>Feed</i>	150°C	500°C
Tekanan	1 atm	1 atm
Aspek Perancangan		
Kapasitas	10,4242 m ³	2,1269 m ³
Tekanan Desain	1,1 atm	1,1 atm
Lama Penyimpanan	2 jam	1 jam
<i>Inlet Diameter</i>	3,6773 m	3,0034 m
<i>Outlet Diameter</i>	0,0575 m	0,0292 m
Tinggi <i>Hopper</i>	2,8959 m	0,8922 m
Tebal <i>Hopper</i>	0,3125 in	0,2500 in
<i>Wall Angle</i>	38,86°	29,00°
Bahan Konstruksi	<i>Carbon Steel ASTM A36</i>	<i>Low Alloy Steel ASTM A387 Grade 2</i>

Tabel 3.25 Spesifikasi Alat Penyimpanan Padatan (3)

Spesifikasi Umum		
Nama	<i>Hopper</i>	<i>Hopper</i>
Kode	H-105	H-106
Tipe	<i>Conical Hopper</i>	<i>Conical Hopper</i>
Fase <i>Feed</i>	Padat	Padat
Jumlah	1 buah	1 buah
Fungsi	Menampung KOH padat dan diumpankan ke <i>Mixer</i> (M-101)	Menampung keluaran HBF-101 dan diumpankan ke RD-102
Kondisi Operasi		
Suhu <i>Feed</i>	50°C	50°C
Tekanan	1 atm	1 atm
Aspek Perancangan		
Kapasitas	7,0746 m ³	0,9559 m ³
Tekanan Desain	1,1 atm	1,1 atm
Lama Penyimpanan	4 jam	1 jam
<i>Inlet Diameter</i>	3,7797 m	2,0922 m
<i>Outlet Diameter</i>	0,0463 m	0,0259 m
Tinggi <i>Hopper</i>	2,2400 m	0,8265 m
Tebal <i>Hopper</i>	0,3125 in	0,2500 in
<i>Wall Angle</i>	45,00°	20,00°
Bahan Konstruksi	<i>Carbon Steel ASTM A516 Grade 70</i>	<i>Carbon Steel ASTM SA36</i>

3.5 Neraca Massa

Tabel 3.26 Neraca Massa Total

Input (kg/jam)		Output (kg/jam)	
No Arus	Laju Alir	No Arus	Laju Alir
Arus 1	6.978,79	Arus 4.1	564,20
Arus 20	6.779,32	Arus 10	1.562,22
Arus 22	6.380,13	Arus 15	7.326,42
Arus 24	6.560,11	Arus 21	6.988,01
Arus 25	3280,05	Arus 23	6.380,13
Arus 31	421,57	Arus 27	4.560,25
Arus 33	790,05	Arus 32	528,74
		Arus 34	3.280,05
Total	31.190,02	Total	31.190,02

Tabel 3.27 Neraca Massa di *Rotary Dryer* (RD-101)

Komponen	Input (kg/jam)		Output (kg/jam)	
	Arus 1	Arus 20	Arus 2	Arus 21
Selulosa _(s)	449,80		449,80	
Hemiselulosa _(s)	1.697,54		1.697,54	
Lignin _(s)	3.500,25		3.500,25	
<i>Moisture content</i> _(l)	767,00		558,30	208,70
<i>Ash</i> _(s)	564,20		564,20	
N ₂ (v)		5.287,87		5.287,87
O ₂ (v)		1.491,45		1.491,45
Total	6.978,79	6.779,32	6.770,09	6.988,01
	13.758,11		13.758,11	

Tabel 3.28 Neraca Massa di *Jaw Crusher* (C-101)

Komponen	Input (kg/jam)		Output (kg/jam)	
	Arus 2		Arus 3	
Selulosa _(s)	449,80		449,80	
Hemiselulosa _(s)	1.697,54		1.697,54	
Lignin _(s)	3.500,25		3.500,25	
<i>Moisture content</i> _(l)	558,30		558,30	
<i>Ash</i> _(s)	564,20		564,20	
Total	6.770,09	-	6.770,09	-
	6.770,09		6.770,09	

Tabel 3.29 Neraca Massa di *Rotary Kiln* (R-101)

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	
	Arus 3	Arus 3.1	Arus 27
Selulosa _(s)	449,80		
Hemiselulosa _(s)	1.697,54		
Lignin _(s)	3.500,25		
<i>Moisture content</i> _(l)	558,30	5,58	552,72
<i>Ash</i> _(s)	564,20	564,20	
C _(s)		1.640,03	
C ₂ H ₄ O _{2(v)}			79,13
C ₂ H ₂ O _{2(v)}			20,12
CH ₃ CHO _(v)			12,22
C ₃ H ₆ O _(v)			16,11
C ₆ H ₆ O _{3(v)}			43,73
CO _{2(v)}			577,63
CO _(v)			339,57
CH _{4(v)}			56,57
H ₂ O _(v)			347,34
H _{2(v)}			82,16
CH ₂ O _(v)			239,20
CH ₃ OH _(v)			102,94
C ₂ H ₅ OH _(v)			74,01
COH _{2(v)}			714,23
C ₉ H ₁₀ O _{2(v)}			610,61
C ₆ H ₆ O _(v)			255,10
C ₃ H ₄ O _{2(v)}			341,83
C ₂ H _{4(v)}			95,06
Total	6.770,09	-	2.209,81
	6.770,09	6.770,09	4.560,28

Tabel 3.30 Neraca Massa di *Belt Conveyor* + *Screener* (BC Scr-101)

Komponen	Input (kg/jam)		Output (kg/jam)	
	Arus 3.1		Arus 4	Arus 4.1
$C_{(s)}$	1.640,03		1.640,03	
$Moisture\ content_{(l)}$	5,58		5,58	
$Ash_{(s)}$	564,20			564,20
Total	2.209,81	-	1.645,61	564,20
	2.209,81		2.209,81	

Tabel 3.31 Neraca Massa di *Mixer* (M-101)

Komponen	Input (kg/jam)		Output (kg/jam)	
	Arus 24	Arus 25		Arus 26
$H_2O_{(l)}$	6.560,11			6.560,11
$KOH_{(s)}$		3.280,05		3.280,05
Total	6.560,11	3.280,05	-	9.840,16
	9.840,16		9.840,16	

Tabel 3.32 Neraca Massa di *Rotary Kiln* (R-102)

Komponen	Input (kg/jam)		Output (kg/jam)	
	Arus 4	Arus 26	Arus 5	Arus 15
$C_{(s)}$	1.640,03		1.406,00	
$H_2O_{(l), (v)}$	5,58	6.560,11		6.565,69
$KOH_{(s)}$		3.280,05		
$K_2O_{(s)}$			2.753,35	
$H_{2(v)}$				59,04
$CO_{2(v)}$				428,79
$CO_{(v)}$				272,90
Total	1.645,61	9.840,16	4.159,35	7.326,42
	11.485,77		11.485,77	

Tabel 3.33 Neraca Massa di *Rotary Cooler* (RC-101)

Komponen	Input (kg/jam)		Output (kg/jam)	
	Arus 5	Arus 22	Arus 6	Arus 23
C _(s)	1.406,00		1.406,00	
K ₂ O _(s)	2.753,35		2.753,35	
N ₂ (v)		4.976,50		4.976,50
O ₂ (v)		1.403,63		1.403,63
Total	4.159,35	6.380,13	4.159,35	6.380,13
	10.539,48		10.539,48	

Tabel 3.34 Neraca Massa di *Horizontal Belt Filter* (HBF-101)

Komponen	Input (kg/jam)		Output (kg/jam)	
	Arus 6	Arus 33	Arus 7	Arus 34
C _(s)	1.406,00		1.406,00	
K ₂ O _(s)	2.753,35			
H ₂ O _(l)		790,05	263,35	
KOH _(aq)				3.280,05
Total	4.159,35	790,05	1.669,35	3.280,05
	4.949,40		4.949,40	

Tabel 3.35 Neraca Massa di *Rotary Dryer* (RD-102)

Komponen	Input (kg/jam)		Output (kg/jam)	
	Arus 7	Arus 31	Arus 8	Arus 32
C _(s)	1.406,00		1.406,00	
H ₂ O _(l)	263,35		156,22	107,13
N ₂ (v)		328,83		328,83
O ₂ (v)		92,75		92,75
Total	1.669,35	421,58	1.562,22	528,71
	2.090,93		2.090,93	

Tabel 3.36 Neraca Massa di *Hammer Mill* (C-102)

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	
	Arus 8	Arus 9	
C _(s)	1.406,00	1.406,00	
H ₂ O _(l)	156,22	156,22	
Total	1.562,22	-	1.562,22
	1.562,22	1.562,22	

Tabel 3.37 Neraca Massa di *Screener* (VS-101)

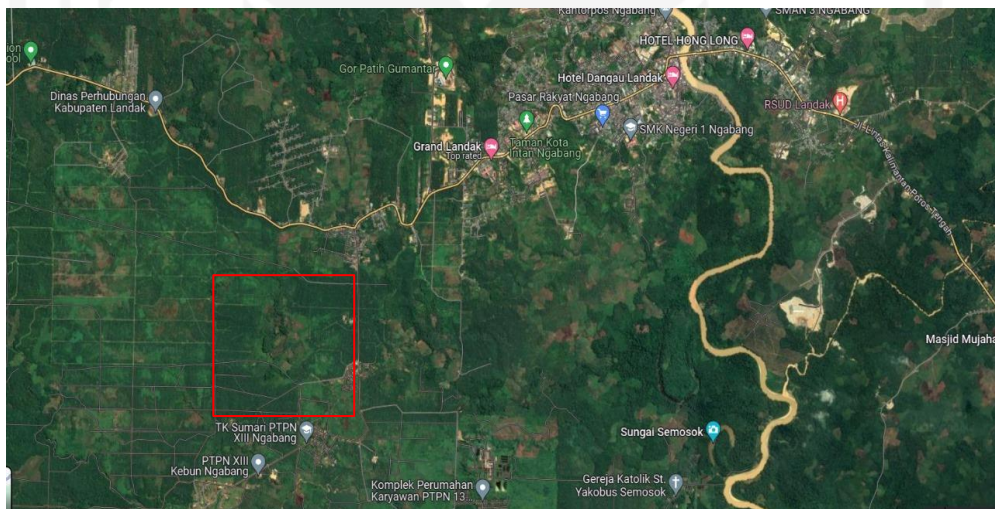
Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	
	Arus 9	Arus 10	
C _(s)	1.406,00	1.406,00	
H ₂ O _(l)	156,22	156,22	
Total	1.562,22	-	1.562,22
	1.562,22	1.562,22	

BAB IV

PERANCANGAN PABRIK

4.1 Lokasi Pabrik

Pemilihan lokasi pabrik merupakan aspek penting yang harus diperhatikan. Biasanya, lokasi pabrik dipilih berdasarkan kedekatannya dengan sumber bahan baku atau pasar produk. Pabrik karbon aktif dari cangkang kelapa sawit ini direncanakan akan didirikan di Kecamatan Ngabang, Kabupaten Landak, Provinsi Kalimantan Barat. Lokasi tersebut dipilih karena dekat dengan sumber bahan baku cangkang kelapa sawit serta memiliki ketersediaan air yang melimpah.



Gambar 4.1 Peta Pemilihan Lokasi Pabrik di Kab. Landak

a. Faktor Utama Penentuan Lokasi Pabrik

Penentuan lokasi pendirian pabrik karbon aktif berbasis cangkang kelapa sawit di Kecamatan Ngabang didasarkan pada analisis komprehensif terhadap faktor-faktor strategis yang berkaitan dengan

ketersediaan sumber daya, potensi pasar, infrastruktur pendukung dan aspek sosial ekonomi, yaitu:

- **Ketersediaan Bahan Baku**

Kecamatan Ngabang, Kabupaten Landak, memiliki potensi tinggi dalam penyediaan bahan baku cangkang kelapa sawit. Hal ini ditunjang oleh keberadaan kebun sawit rakyat yang telah diremajakan melalui skema Tanam Ulang Total (TUT) dengan biaya investasi rata-rata sebesar Rp33.490.088/ha[72]. Selain itu, keberadaan Pabrik Kelapa Sawit (PKS) Ngabang milik PT Perkebunan Nusantara IV dan PTPN XIII menjamin kontinuitas pasokan cangkang sawit. Luasnya areal perkebunan di wilayah ini menjadikan suplai bahan baku sangat memadai untuk mendukung operasi pabrik secara berkelanjutan.

- **Pemasaran**

Secara geografis, Kecamatan Ngabang memiliki posisi strategis di dekat industri hilir yang membutuhkan karbon aktif, termasuk industri pengolahan minyak sawit dan sektor kimia. Konektivitas ke pelabuhan dan wilayah lain difasilitasi oleh pembangunan infrastruktur jalan seperti ruas Mamek–Gombang yang dibiayai melalui APBD sebesar Rp20 miliar pada tahun 2022[73]. Selain itu, terdapat Pelabuhan Kijing sebagai pelabuhan internasional yang dapat mendistribusikan produk ke berbagai tempat. Ketersediaan jalur distribusi yang efisien menjadi nilai tambah dalam mendukung pemasaran domestik maupun ekspor produk karbon aktif.

- **Utilitas dan Energi**

Kebutuhan air untuk proses produksi dapat dipenuhi dari sumber daya air permukaan lokal. Pasokan listrik diperoleh dari jaringan PLN setempat dan didukung oleh genset sebagai sistem cadangan. Kebutuhan bahan bakar untuk proses termal dapat dipenuhi melalui kerja sama dengan pemasok energi lokal atau nasional yang beroperasi di Kalimantan Barat.

- **Tenaga Kerja**

Kecamatan Ngabang terdiri dari 19 desa dengan jumlah penduduk yang memadai untuk menunjang kebutuhan tenaga kerja industri[74]. Keberadaan pabrik diproyeksikan mampu menyerap tenaga kerja lokal, menurunkan angka pengangguran, serta memberikan dampak positif terhadap peningkatan ekonomi masyarakat.

- **Transportasi dan Telekomunikasi**

Peningkatan infrastruktur transportasi di Kabupaten Landak, termasuk jalan-jalan penghubung antar kecamatan, memberikan kemudahan logistik bahan baku dan produk. Di sisi lain, perkembangan jaringan telekomunikasi turut mendukung kegiatan operasional dan komunikasi bisnis pabrik secara efektif dan berkesinambungan.

b. Faktor Pendukung Penentuan Lokasi Pabrik

Selain faktor utama di atas, sejumlah pertimbangan sekunder turut menjadi penentu kelayakan lokasi pembangunan pabrik karbon aktif di wilayah ini:

- **Potensi Ekspansi**

Kecamatan Ngabang memiliki luas lahan bukan sawah sebesar 105.851 hektar, atau sekitar 15,27% dari total lahan bukan sawah di Kabupaten Landak[75]. Ketersediaan lahan ini memungkinkan perluasan fasilitas industri di masa depan, seiring dengan peningkatan permintaan karbon aktif secara global.

- **Aspek Perizinan**

Kepastian hukum dan kemudahan prosedural ditunjang oleh regulasi daerah, seperti Peraturan Daerah Kabupaten Landak No. 4 Tahun 2015[76] mengenai Kawasan Industri Mandor serta Peraturan Pemerintah No. 107 Tahun 2015 tentang Izin Usaha Industri[77]. Adanya kerangka regulasi ini mempermudah proses perizinan dan legalitas pendirian pabrik.

- **Penerimaan Sosial Masyarakat**

Masyarakat setempat menunjukkan sikap terbuka terhadap pengembangan industri, terutama yang mampu memberikan dampak langsung terhadap peningkatan kesejahteraan dan penyediaan lapangan kerja. Dukungan sosial ini menjadi faktor penting dalam keberlanjutan operasional pabrik.

- **Fasilitas Penunjang**

Kecamatan Ngabang memiliki infrastruktur penunjang seperti fasilitas kesehatan, pendidikan, tempat ibadah, perbankan dan perumahan yang memadai. Ketersediaan sarana ini mendukung ekosistem industri dan menjamin kenyamanan tenaga kerja serta kelangsungan hidup komunitas industri.

4.2 Tata Letak Pabrik

Penentuan tata letak fasilitas dan peralatan dalam pabrik merupakan salah satu aspek krusial dalam tahap perancangan pabrik karena secara langsung memengaruhi efisiensi operasional, keselamatan kerja, serta kesinambungan jalannya proses produksi. Penyusunan tata letak (*plant layout*) yang efektif akan memastikan bahwa seluruh unit peralatan tersusun mengikuti urutan proses produksi yang logis dan efisien.

Secara umum, tata letak pabrik mencakup pengorganisasian seluruh elemen fisik dalam area produksi, termasuk zona administrasi, unit proses utama, area penyimpanan bahan baku dan produk akhir, sistem utilitas pendukung, fasilitas bagi pekerja serta instalasi pengolahan limbah. Desain tata letak yang optimal dirancang untuk meminimalkan jarak perpindahan material (*material handling*), memfasilitasi pengawasan operasi, mempercepat aliran proses dan meningkatkan keselamatan operasional.

Menurut Peters dan Timmerhaus (2004)[78], tata letak pabrik yang dirancang dengan baik memberikan beberapa manfaat utama, yaitu:

- a. Penurunan biaya produksi melalui efisiensi logistic dan operasional
- b. Kemudahan dalam pengawasan kegiatan produksi dan operasi harian

- c. Peningkatan standar keselamatan kerja di area industry
- d. Efisiensi transportasi internal bahan baku dan produk, serta
- e. Keudahan dalam akses, perawatan dan pemeliharaan unit peralatan

Komponen utama tata letak pabrik[79]:

a. Area Administratif

Berfungsi sebagai pusat manajemen dan kegiatan administratif, umumnya ditempatkan di sisi depan pabrik untuk kemudahan akses dan kontrol.

b. Zona Produksi

Merupakan area inti di mana seluruh peralatan proses utama seperti *rotary dryer*, *rotary kiln*, *rotary cooler*, dan *horizontal belt filter* dioperasikan. Area ini juga mencakup ruang penyimpanan bahan baku dan produk, serta ruang kendali (*control room*) yang dilengkapi sistem kontrol otomatis.

c. Instalasi Utilitas

Menangani penyediaan sarana penunjang proses, termasuk sistem distribusi air, uap panas, udara tekan, pendingin, listrik dan bahan bakar. Instalasi ini harus dirancang agar distribusinya ekonomis dan tidak mengganggu area proses utama.

d. Fasilitas Umum Karyawan

Mencakup sarana pendukung seperti mess karyawan, ruang makan, tempat ibadah, fasilitas kesehatan, taman dan area rekreasi yang terintegrasi dengan kawasan industri.

e. Fasilitas Keamanan

Termasuk sistem proteksi kebakaran seperti *fire hydrant*, APAR serta ruang penyimpanan peralatan keselamatan yang terdistribusi secara strategis di seluruh area pabrik.

f. Instalasi Pengolahan Air dan Limbah (IPAL)

Berfungsi untuk mengolah limbah cair, padat dan gas hasil proses produksi agar memenuhi baku mutu lingkungan sebelum dibuang ke media lingkungan hidup. Sistem ini harus sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Dalam merancang tata letak pabrik, beberapa pertimbangan berikut perlu diperhatikan[79]:

- a. Kemungkinan ekspansi area produksi seiring peningkatan kapasitas di masa depan
- b. Susunan proses yang mengikuti urutan logis dari bahan baku hingga produk jadi
- c. Aksesibilitas untuk perawatan dan perbaikan peralatan agar tidak mengganggu proses
- d. Distribusi utilitas seperti air, uap, listrik, dan bahan bakar yang hemat dan efisien
- e. Kesesuaian luas dan spesifikasi bangunan dengan standar teknik dan regulasi
- f. Penerapan sistem keselamatan kerja yang mencegah kebakaran dan kecelakaan kerja
- g. Sistem pengolahan dan pembuangan limbah yang memenuhi ketentuan lingkungan
- h. Desain yang fleksibel untuk meminimalkan biaya jika terjadi perubahan layout

- i. Tersedianya fasilitas pendukung umum seperti area parkir, kantin, dan tempat ibadah

Spesifikasi luas tanah yang digunakan untuk tempat berdirinya pabrik dirincikan dalam tabel berikut:

Tabel 4.1 Rincian Luas Tanah Pabrik

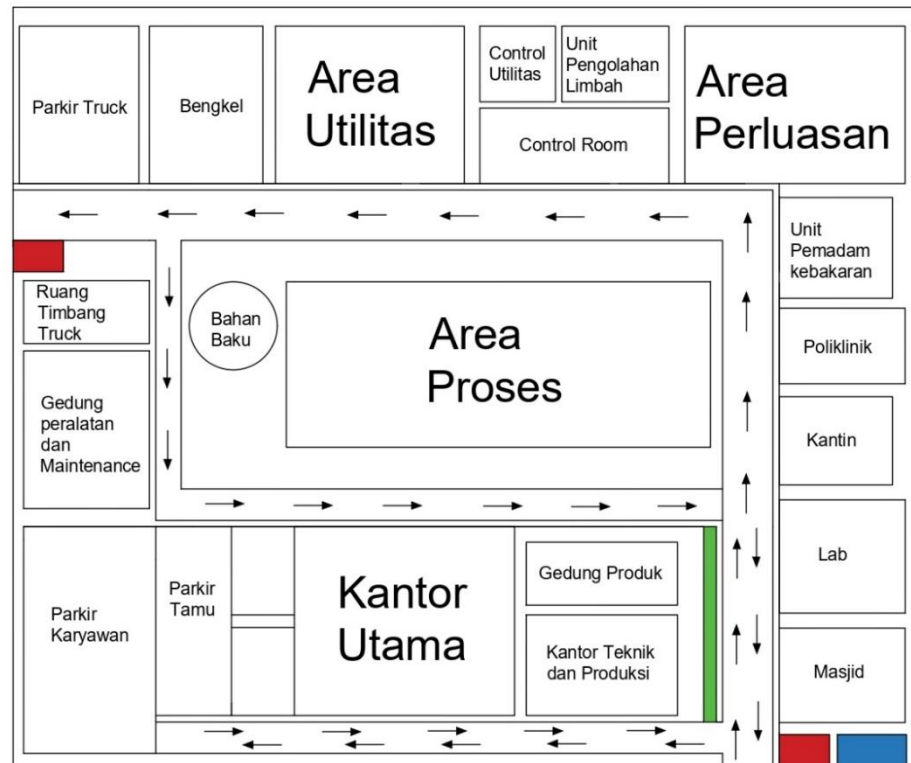
No	Area	Panjang	Lebar	Luas
		m	m	m ²
1	Area Proses	68	27	1.836
2	Kantor utama	35	30	1.050
3	Gedung Produk	24	10	240
4	Kantor Teknik dan Produk	24	16	384
5	Kantin	18	14	252
6	Parkir Tamu	30	12	360
7	Area Parkir 1	36	21	756
8	Masjid	20	15	300
9	Lab	20	18	360
10	Poliklinik	18	16	288
11	Gedung Peralatan dan <i>Maintenance</i>	20	12	240
12	<i>Control room</i>	25	20	500
13	<i>Control Utilities</i>	12	30	360
14	Unit Pengolahan Limbah	12	12	144
15	Area Utilitas	17	12	204
16	Parkir Truk	30	25	750
17	Ruang timbang truk	25	19	475
18	Bahan Baku	20	10	200
19	Bengkel (diam.)	14		154
20	Tempat Santai	25	18	450
21	Pos Satpam 1	11	5	55
22	Pos Satpam 2	8	5	40
23	Taman 1	8	5	40

24	Taman 2	14	10	140
25	Taman 3	14	10	140
26	Jalan 1	31	2	62
27	Jalan 2	120	8	960
28	Jalan 3	44	4	176
29	Jalan 4	86	5	430
30	Area Perluasan	83	8	664
31	Poliklinik	35	25	875
Total				10.174

U

 Skala 1:1000

- = Pos Keamanan
- = Taman
- = Tempat santai
- = Arus Jalan



Gambar 4.2 Tata Letak Pabrik

4.3 Tata Letak Mesin/Alat Proses

Perancangan tata letak peralatan proses dalam pabrik harus mempertimbangkan berbagai aspek teknis dan operasional guna memastikan efisiensi, keselamatan, dan keberlanjutan sistem produksi secara menyeluruh. Beberapa parameter utama yang menjadi acuan dalam perancangan tersebut:

a. Aliran Material Bahan Baku dan Produk

Susunan peralatan harus mengikuti urutan logis proses produksi untuk memastikan kontinuitas aliran material dari bahan baku hingga produk akhir. Tata letak yang mengalir secara linier dan minim persilangan aliran dapat menurunkan biaya *material handling*, mempercepat waktu produksi dan meningkatkan pengawasan operasi. Efisiensi aliran ini secara langsung berkorelasi dengan produktivitas dan keandalan sistem.

b. Distribusi Aliran Udara dan Gas Buang

Pengaturan aliran udara, khususnya untuk sistem ventilasi dan pembuangan gas proses, harus dirancang agar menghindari penumpukan gas berbahaya di area kerja. Selain itu, arah angin dominan di lokasi pabrik perlu diperhitungkan dalam penempatan cerobong atau unit emisi, untuk mencegah pengaruh negatif terhadap lingkungan dan masyarakat sekitar. Desain ini harus mengacu pada standar keselamatan lingkungan industri.

c. Pencahayaan Area Kerja

Ketersediaan pencahayaan yang memadai, terutama di zona dengan aktivitas kritis atau operasional 24 jam, merupakan hal esensial dalam menunjang keselamatan dan ketelitian kerja. Sistem pencahayaan buatan

harus memenuhi intensitas minimum sesuai standar industri agar mengurangi potensi kecelakaan akibat visibilitas yang rendah.

d. Lalu Lintas Internal (Manusia dan Kendaraan)

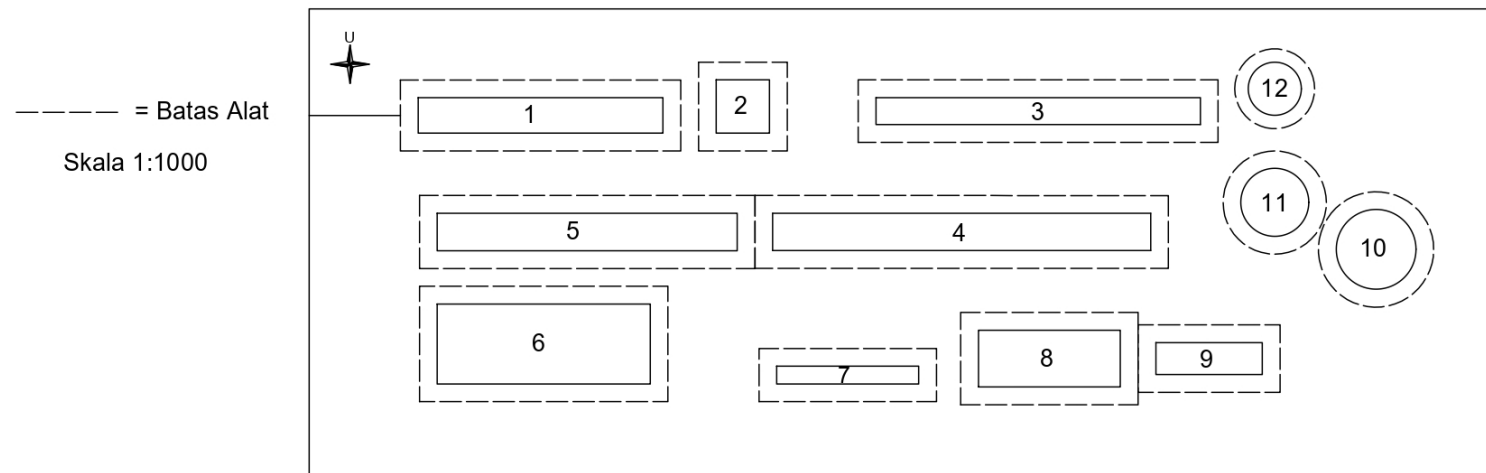
Desain jalur sirkulasi internal, baik untuk pekerja maupun kendaraan pengangkut material, harus mempertimbangkan kemudahan akses terhadap peralatan proses, serta kecepatan evakuasi saat kondisi darurat. Jalur evakuasi dan akses ke titik keselamatan (misalnya assembly point) harus ditata secara strategis dan bebas hambatan, sesuai dengan kaidah tata kelola keselamatan industri.

e. Aspek Ekonomi Tata Letak

Desain tata letak harus mampu mengoptimalkan biaya investasi awal dan biaya operasional jangka panjang. Penempatan alat yang efisien dapat mengurangi kebutuhan energi, panjang perpipaan, dan kompleksitas sistem kontrol, sehingga menghasilkan sistem produksi yang ekonomis dan mudah dipelihara.

f. Jarak Aman Antar Peralatan

Penentuan jarak antar alat proses harus mempertimbangkan potensi risiko seperti *heat radiation* , *high pressure* atau *explode possibility*. Peralatan yang beroperasi pada kondisi ekstrem harus ditempatkan secara terisolasi dari unit lain, minimal berjarak 20 meter dari sumber bahaya, sesuai rekomendasi dalam *Perry's Chemical Engineers' Handbook*[66]. Hal ini dilakukan untuk meminimalkan eskalasi kerusakan jika terjadi insiden.



Gambar 4.3 Tata Letak Mesin Proses

Keterangan:

1 = RD-101

2 = C-101

3 = R-101

4 = R-102

5 = RC-101

6 = HBF-101

7 = RD-102

8 = HM-101

9 = VS-101

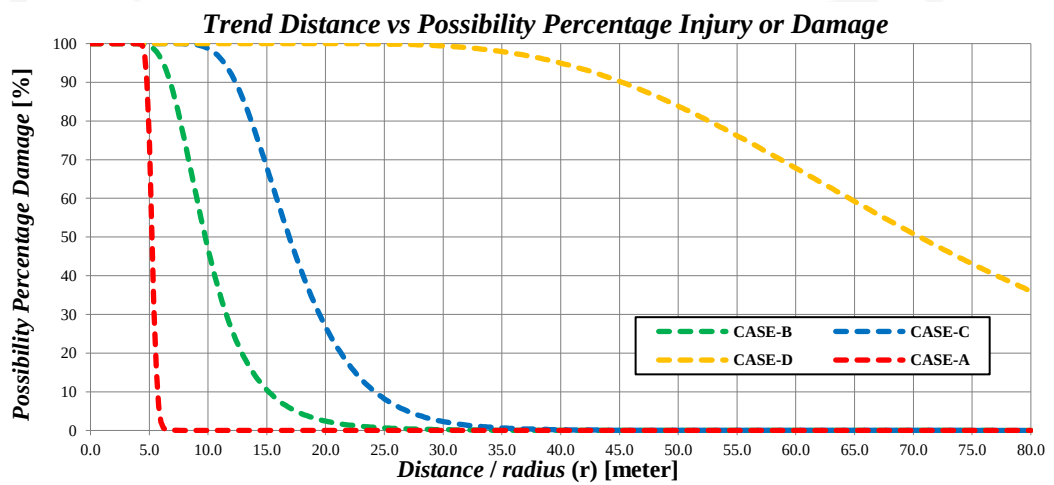
10 = S-101

11 = H-105

12 = M-101

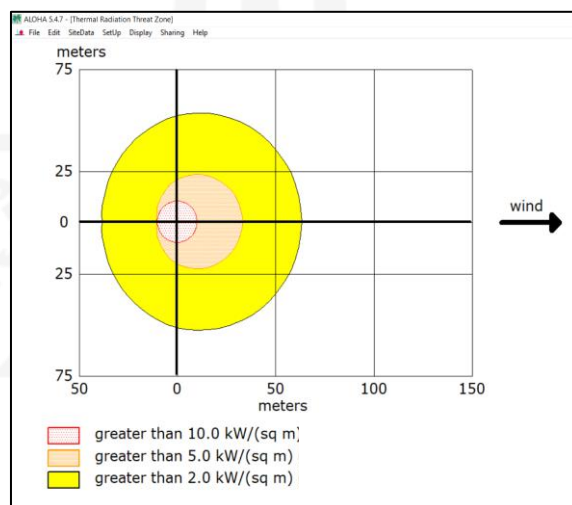
4.4 Jarak Aman Dari Reaktor

Pada bagian ini, dilakukan analisis secara kuantitatif untuk menghitung jangkauan kerusakan dan/atau tingkat keparahan yang ditimbulkan jika reaktor meledak. Tujuan dari perhitungan ini adalah untuk menghitung seberapa jauh kerusakan dan bahaya yang ditimbulkan, sehingga dapat ditentukan jarak aman dari bahaya tersebut (perhitungan terlampir).



CASE A = Deaths CASE C = Structural Damage
 CASE B = Eardrum Rupture CASE D = Glass Breakage

Perbandingan hasil menggunakan *software* ALOHA:



Gambar 4.4 Jarak Aman Dari Jangkauan Ledakan

4.5 Organisasi Perusahaan

a. Bentuk Perusahaan

Pabrik karbon aktif berbasis cangkang kelapa sawit ini direncanakan akan didirikan dalam bentuk badan hukum Perseroan Terbatas (PT). PT merupakan bentuk perusahaan yang kepemilikannya terbagi atas saham-saham, dan setiap pemegang saham memiliki hak sesuai dengan porsi kepemilikan modal yang ditanamkan. Saham tersebut merupakan bukti kepemilikan dan sekaligus sebagai representasi modal yang telah disetor oleh pemiliknya ke dalam perusahaan. Dengan demikian, pemegang saham memiliki bagian kepemilikan perusahaan, namun tidak secara langsung terlibat dalam operasional sehari-hari. Profil perusahaan yang direncanakan:

Bentuk Perusahaan	: Perseroan Terbatas (PT)
Jenis Industri	: Industri Kimia–Produksi Karbon Aktif
Kapasitas Produksi	: 12.000 Metrik Ton/Tahun
Lokasi Operasi	: Kec. Ngabang, Kab. Landak, Prov. Kalbar

Alasan pemilihan PT sebagai bentuk badan usaha:

- Aksesibilitas Modal yang Lebih Fleksibel

Struktur modal dalam bentuk PT memungkinkan pendanaan diperoleh dari penerbitan saham kepada publik atau pihak investor tertentu. Dengan sistem kepemilikan saham, perusahaan dapat menarik dana dalam jumlah besar sekaligus memberikan kesempatan kepada investor kecil untuk berpartisipasi. Hal ini menjadikan pengumpulan

modal lebih dinamis dan efisien dalam mendukung pengembangan usaha.

- Batasan Tanggung Jawab Pemilik Modal

Dalam sistem PT, tanggung jawab pemegang saham dibatasi hanya sebesar nilai nominal saham yang dimilikinya. Pemegang saham tidak turut menanggung risiko kerugian melebihi investasi yang telah disetorkan, sehingga aspek perlindungan terhadap investor lebih terjamin. Hal ini menciptakan rasa aman bagi calon pemodal.

- Pemisahan Fungsi Kepemilikan dan Pengelolaan

Struktur organisasi PT secara hukum memisahkan antara pemilik perusahaan (pemegang saham) dan pengelola (direksi). Manajemen operasional sepenuhnya dijalankan oleh jajaran direksi yang ditunjuk dan diawasi oleh dewan komisaris, memastikan adanya tata kelola perusahaan yang profesional dan terstruktur.

- Kontinuitas Operasional Terjamin

Perubahan komposisi pemegang saham tidak akan mengganggu kelangsungan operasional perusahaan karena pengelolaan tetap dilakukan oleh tim manajemen yang telah ada. Hal ini menjadikan PT sebagai bentuk usaha yang stabil dan berkelanjutan, cocok untuk investasi jangka panjang.

- Peluang Pengembangan Skala Usaha

Sebagai entitas hukum yang dapat menarik investor dalam skala besar, PT memiliki fleksibilitas dalam melakukan ekspansi bisnis,

pembukaan cabang, atau diversifikasi produk. Bentuk ini sangat sesuai untuk industri dengan potensi pasar luas seperti karbon aktif.

- Manajemen yang Efisien dan Profesional

Struktur PT memungkinkan pemegang saham untuk menunjuk individu dengan kompetensi tinggi sebagai anggota dewan direksi dan komisaris. Hal ini memungkinkan penerapan praktik manajemen modern dan efisiensi dalam pengambilan keputusan strategis.

b. Struktur Organisasi

Struktur organisasi yang terstruktur secara sistematis memainkan peran vital dalam menjamin keberlanjutan operasional dan pertumbuhan jangka panjang suatu perusahaan. Susunan organisasi yang efektif mendukung terciptanya koordinasi dan komunikasi yang efisien antar unit kerja, sehingga seluruh fungsi operasional dapat dijalankan secara sinergis dan produktif. Perlu dicatat bahwa setiap perusahaan dapat memiliki bentuk struktur organisasi yang berbeda-beda, tergantung pada kompleksitas proses dan kebutuhan operasional.

Untuk pabrik karbon aktif berbasis cangkang kelapa sawit ini, sistem organisasi yang diadopsi adalah struktur *Line and Staff*. Model ini menggabungkan prinsip jalur komando langsung (*line*) dengan dukungan fungsional dari tenaga ahli (*staff*), sehingga menghasilkan kombinasi yang seimbang antara otoritas komando dan fleksibilitas teknis. Kelebihan utama dari sistem ini adalah kesederhanaan rantai komando dan kejelasan pembagian tanggung jawab, di mana setiap karyawan melapor kepada satu

atasan langsung sesuai prinsip hierarki. Struktur ini terdiri atas dua entitas fungsional utama:

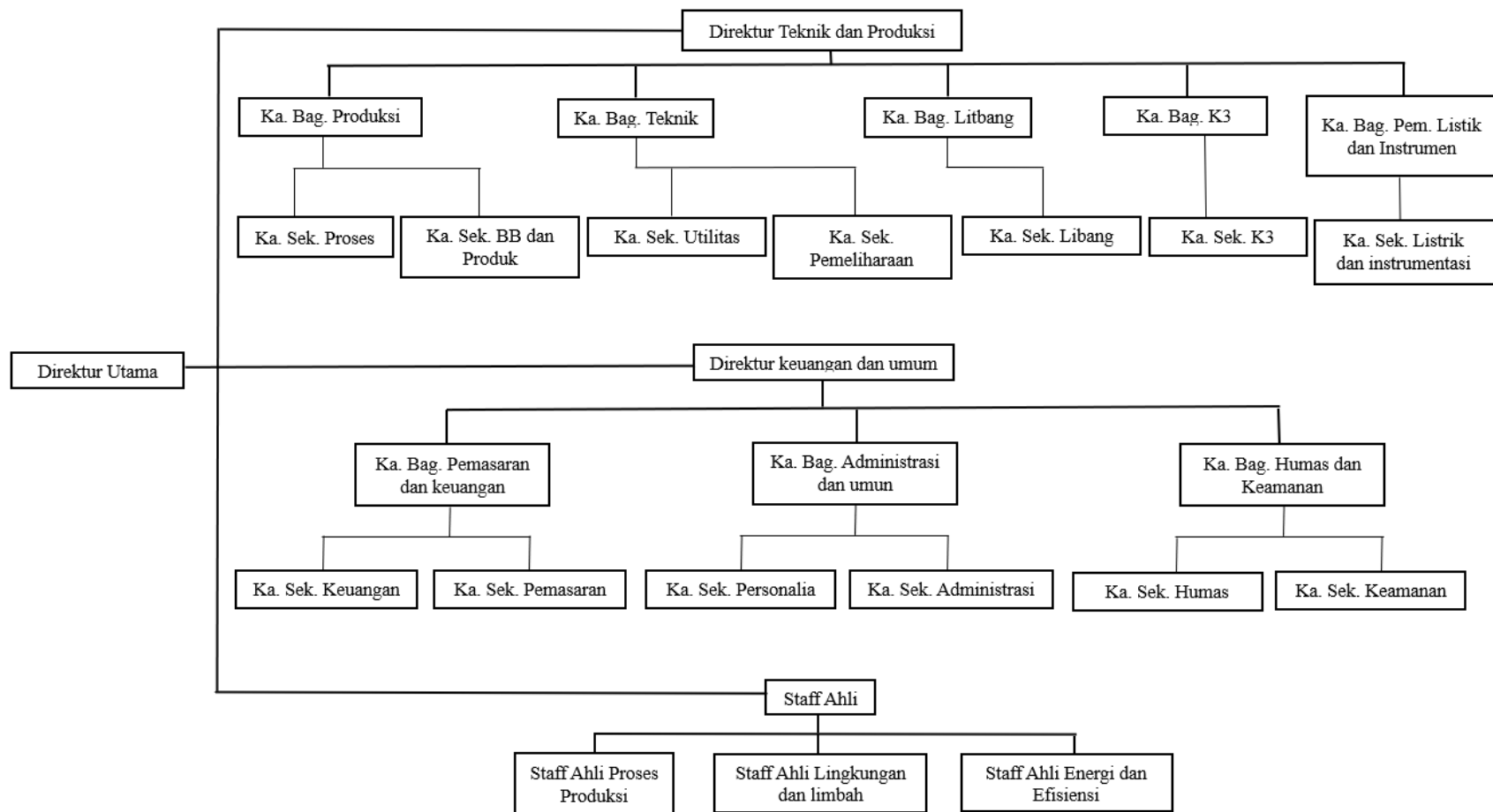
- Unit *Line*

Unit ini menjalankan fungsi inti dari organisasi, bertanggung jawab langsung terhadap pencapaian target produksi dan tujuan perusahaan. Mereka berada dalam jalur komando utama dan bertugas dalam pengambilan keputusan operasional.

- Unit *Staff*

Unit pendukung ini terdiri atas tenaga profesional yang memiliki kompetensi teknis atau administratif tertentu. Perannya adalah memberikan masukan, nasihat, dan dukungan fungsional kepada unit *line* tanpa kewenangan eksekusi langsung terhadap keputusan operasional.

Dalam implementasinya, pemegang saham sebagai entitas pemilik perusahaan diwakili oleh Dewan Komisaris, yang bertugas melakukan pengawasan strategis terhadap jalannya perusahaan. Sedangkan tanggung jawab pelaksanaan kegiatan operasional harian berada di tangan Direktur Utama, yang memimpin tim manajerial terdiri dari para Direktur di berbagai bidang fungsional seperti produksi, keuangan, pemasaran dan teknik. Proses pengangkatan Dewan Komisaris dan Direktur Utama dilakukan melalui Rapat Umum Pemegang Saham (RUPS), yang merupakan lembaga pengambil keputusan tertinggi dalam struktur perusahaan berbadan hukum Perseroan Terbatas.



Gambar 4.5 Struktur Organisasi Perusahaan

c. Tugas dan Wewenang

▪ Pemegang Saham

Pemegang saham merupakan entitas yang menanamkan modal ke dalam perusahaan melalui kepemilikan saham, sehingga berperan sebagai pemilik perusahaan secara hukum. Adapun wewenang dan tanggung jawab pemegang saham meliputi:

- Mengangkat dan memberhentikan anggota Dewan Komisaris dan Direksi.
- Menyetujui laporan tahunan perusahaan, termasuk neraca keuangan dan laporan laba rugi.
- Menyelenggarakan Rapat Umum Pemegang Saham (RUPS) sekurang-kurangnya sekali dalam satu tahun.

▪ Dewan Komisaris

Dewan Komisaris bertindak sebagai wakil pemegang saham dalam pengawasan manajemen perusahaan. Adapun lingkup tugas dan wewenangnya meliputi:

- Menilai dan menyetujui rencana strategis yang diajukan oleh Direksi.
- Melaksanakan pengawasan aktif atas pelaksanaan kebijakan dan kegiatan operasional perusahaan.
- Memberikan masukan dan arahan strategis kepada Direksi dalam isu-isu penting.

- **Direktur Utama**

Direktur Utama merupakan pimpinan eksekutif tertinggi yang bertanggung jawab atas keseluruhan operasional perusahaan.

Wewenang dan tanggung jawabnya mencakup:

- Mengimplementasikan kebijakan dan strategi perusahaan secara menyeluruh.
- Melaporkan hasil kerja kepada Dewan Komisaris dan pemegang saham.
- Menjaga stabilitas organisasi internal serta hubungan eksternal dengan *stakeholder*.
- Melakukan pengangkatan dan pemberhentian kepala bagian dengan persetujuan pemegang saham.
- Mengoordinasikan seluruh direktorat dan unit di bawah wewenangnya.

Dalam melaksanakan tugasnya, Direktur Utama dibantu oleh:

- Direktorat Teknik dan Produksi; Mengelola proses operasional, utilitas, pemeliharaan, instrumentasi serta pengembangan mutu.
- Direktorat Keuangan dan Pemasaran; Menangani perencanaan keuangan dan implementasi strategi pemasaran.
- Staff Ahli; Memberikan dukungan teknis dan strategis untuk menjamin efisiensi, mutu serta keberlanjutan operasi.

- **Kepala Bagian dan Staff Ahli**

Kepala bagian bertanggung jawab dalam menjalankan, mengawasi, dan mengevaluasi aktivitas di bawah unit kerja masing-masing. Mereka bertanggung jawab kepada direktorat terkait. Staff ahli bertindak sebagai penasihat teknis yang mendukung kebijakan strategis

dan operasional. Rincian tanggung jawab per bagian adalah sebagai berikut:

- Produksi
Mengelola kegiatan produksi, termasuk penyediaan bahan baku dan pengendalian produk.
- Pemeliharaan, Listrik dan Instrumentasi
Menyediakan dan menjaga kestabilan sarana penunjang pabrik.
- Penelitian dan Pengembangan
Menangani R&D serta memastikan mutu produk melalui evaluasi terorganisir.
- Teknik
Bertanggung jawab atas sistem utilitas, desain teknis, dan pemeliharaan infrastruktur.
- Keuangan dan Pemasaran
Mengelola keuangan perusahaan dan distribusi produk ke pasar.
- Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3)
Memastikan perlindungan terhadap tenaga kerja dan lingkungan.
- Administrasi dan Umum
Mengatur fungsi administratif serta pengelolaan sumber daya manusia.
- Humas dan Keamanan
Menjalin komunikasi eksternal dan menjaga ketertiban internal.

Staff ahli khusus:

- Proses
Mengoptimalkan efisiensi dan kualitas produksi.
- Lingkungan dan Limbah
Memastikan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan dan manajemen limbah.
- Energi dan Efisiensi

Merancang strategi efisiensi energi dan keberlanjutan energi industri.

▪ Kepala Seksi

Kepala seksi melaksanakan kegiatan operasional harian berdasarkan arahan dari Kepala Bagian masing-masing. Setiap seksi bertanggung jawab pada area tugas spesifik dengan tanggung jawab sebagai berikut:

- Seksi Proses
Menjalankan proses produksi secara teknis.
- Seksi Utilitas
Menyediakan kebutuhan energi dan media proses (air, uap, bahan bakar dan udara tekan).
- Seksi Pemeliharaan
Melakukan pemeliharaan preventif dan korektif terhadap alat dan fasilitas.
- Seksi Listrik & Instrumentasi
Memastikan kestabilan pasokan listrik dan kinerja sistem kontrol.
- Seksi Litbang
Melakukan inovasi produk dan proses melalui penelitian terapan.
- Seksi K3
Menjamin keselamatan kerja dan kesehatan karyawan serta keluarganya.
- Seksi Bahan Baku & Produk
Memastikan ketersediaan bahan dan distribusi produk.
- Seksi Keuangan
Menangani transaksi keuangan dan kestabilan finansial.
- Seksi Pemasaran
Mengelola pemasaran dan distribusi produk ke pasar.

- Seksi Personalia
Mengurus pengembangan SDM dan administrasi kepegawaian.
- Seksi Humas
Membangun relasi eksternal dengan masyarakat dan instansi pemerintah.
- Seksi Keamanan
Mengawasi dan menjaga keamanan fasilitas dan aset perusahaan.
- Seksi Administrasi
Menangani fungsi administratif, surat-menyurat, dan dokumentasi perusahaan.

d. Pembagian Jam Kerja Karyawan

Operasional pabrik karbon aktif dirancang untuk beroperasi secara kontinyu selama 330 hari dalam satu tahun kalender, dengan waktu operasi 24 jam per hari. Sisa waktu dalam setahun digunakan untuk kegiatan perawatan berkala (*preventive maintenance*), *shutdown* tahunan serta inspeksi peralatan proses. Untuk mendukung sistem kerja ini, pengaturan jam kerja karyawan dibagi menjadi dua kategori utama: karyawan non-shift dan karyawan shift.

▪ Karyawan Non-Shift

Karyawan non-shift adalah personel yang tidak terlibat langsung dalam kegiatan operasional harian di area produksi. Kelompok ini mencakup manajemen tingkat atas (direktur), staf ahli, kepala bagian, kepala seksi dan pegawai administratif lainnya. Waktu kerja non-shift mengikuti sistem kerja kantor reguler dengan rincian sebagai berikut:

- Senin s.d. Kamis

Jam kerja : 08.00–16.00 WIB

Jam istirahat : 12.00–13.00 WIB

- Jum'at

Jam kerja : 08.00–17.00 WIB

Jam istirahat : 11.30–13.00 WIB

Karyawan kategori ini bekerja selama 5 hari kerja per minggu, mengikuti kebijakan umum jam kerja nasional dan peraturan perusahaan.

- Karyawan Shift

Karyawan shift adalah tenaga kerja yang terlibat secara langsung dalam pengoperasian fasilitas produksi, pengawasan utilitas serta pengamanan pabrik. Kelompok ini mencakup operator produksi, teknisi pemeliharaan dan personel keamanan. Untuk menjamin kesinambungan proses produksi selama 24 jam, sistem kerja diterapkan dalam bentuk tiga shift operasi, sebagai berikut:

- Shift I : 07.00–15.00 WIB

- Shift II : 15.00–23.00 WIB

- Shift III : 23.00–07.00 WIB

Distribusi kerja dilakukan melalui sistem rotasi empat kelompok (A, B, C dan D), dengan skema:

- Tiga kelompok aktif bertugas sesuai jadwal shift.
- Satu kelompok beristirahat (*off shift*) secara bergiliran.

Rotasi ini dirancang untuk menjaga stamina kerja dan menghindari kelelahan akibat kerja bergilir terus-menerus, sekaligus menjamin adanya cadangan tenaga kerja yang siap bila terjadi kondisi darurat.

Untuk memastikan kelancaran operasional, sistem absensi elektronik diterapkan secara menyeluruh terhadap seluruh karyawan. Data absensi digunakan sebagai indikator kedisiplinan dan menjadi salah satu parameter penilaian kinerja untuk pengembangan karier dan kebijakan sumber daya manusia, termasuk promosi, pelatihan dan penugasan khusus.

Tabel 4.2 Jadwal Pembagian Shift Karyawan

Regu	Hari ke-														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A		I	III	II		I	III	II		I	III	II		I	III
B	I		II	III	I		II	III	I		I	III	I		II
C	III	II		I	III	II		I	III	I		I	III	II	
D	II	III	I		II	III	I		II	III	I		II	III	I
Regu	Hari ke-														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
A	II		I	III	II		I	III	II		I	III	II		I
B	III	I		II	III	I		II	III	I		I	III	I	
C	I	III	II		I	III	II		I	III	II		I	III	II
D		II	III	I		II	III	I		II	III	I		II	III

e. Status Karyawan

Sistem penggajian di pabrik karbon aktif dirancang berdasarkan asas keadilan, tanggung jawab dan kompetensi, dengan mempertimbangkan status kepegawaian, jabatan struktural, cakupan tanggung jawab kerja serta

keahlian teknis yang dimiliki oleh masing-masing karyawan. Skema pengupahan ini dibagi berdasarkan kategori status ketenagakerjaan sebagai berikut:

- Karyawan Tetap

Karyawan tetap adalah personel yang secara resmi diangkat dan diberhentikan melalui Surat Keputusan (SK) Direksi, serta memiliki hak dan kewajiban sebagaimana diatur dalam peraturan perusahaan. Mereka memperoleh gaji bulanan tetap, yang besarnya ditentukan berdasarkan faktor-faktor berikut:

- Tingkatan jabatan dan struktur organisasi,
- Kualifikasi dan kompetensi profesional,
- Lama masa kerja (senioritas).

Selain itu, karyawan tetap berhak atas tunjangan tetap, insentif kinerja, jaminan sosial, serta fasilitas lainnya sesuai ketentuan perusahaan.

- Karyawan Harian

Karyawan harian adalah tenaga kerja yang diangkat dan diberhentikan oleh Direksi tanpa melalui SK pengangkatan formal. Mereka bekerja berdasarkan kebutuhan operasional harian dan menerima upah berdasarkan jumlah hari kerja. Pembayaran upah dilakukan secara periodik (mingguan), dihitung dari total jam kerja aktual sesuai daftar hadir. Karyawan harian umumnya ditempatkan pada fungsi operasional bersifat pendukung.

- Karyawan Kontrak/Borongan

Karyawan kontrak adalah pekerja yang dikontrak untuk menyelesaikan pekerjaan tertentu dalam jangka waktu atau volume kerja yang telah ditentukan, berdasarkan kesepakatan awal. Sistem pengupahan diberikan dalam bentuk upah borongan, sesuai dengan nilai pekerjaan yang telah diselesaikan. Jenis pekerjaan borongan umumnya bersifat non-rutin atau berbasis proyek, seperti pekerjaan konstruksi, perawatan besar (overhaul), atau kegiatan tambahan tertentu.

f. Sistem Gaji Karyawan

Dalam operasional pabrik karbon aktif, sistem remunerasi dirancang untuk mencerminkan tanggung jawab kerja dan status kepegawaian, dengan tujuan menjaga keadilan internal serta mendorong produktivitas kerja. Pembayaran gaji diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama sebagai berikut:

- Gaji Bulanan

Gaji bulanan diberikan kepada karyawan tetap, sesuai struktur penggajian yang ditetapkan oleh manajemen perusahaan. Besaran gaji ditentukan berdasarkan jabatan, kompetensi dan masa kerja. Pembayaran dilakukan secara berkala setiap tanggal 1 awal bulan, dan mencakup komponen gaji pokok serta tunjangan-tunjangan tetap yang berlaku.

- Gaji Harian

Gaji harian diperuntukkan bagi tenaga kerja tidak tetap, seperti buruh harian dan pekerja borongan. Besaran upah dihitung berdasarkan jumlah hari kerja aktual, sesuai ketentuan upah minimum harian yang berlaku di wilayah operasional. Pembayaran dilakukan secara mingguan atau sesuai kesepakatan kontraktual proyek.

▪ Gaji Lembur

Gaji lembur merupakan insentif tambahan yang diberikan kepada karyawan yang bekerja di luar jam kerja normal. Perhitungan upah lembur mengacu pada ketentuan regulasi ketenagakerjaan yang berlaku, termasuk persentase tambahan berdasarkan jumlah jam kerja lembur dan hari kerja (hari biasa, hari libur atau hari besar nasional). Gaji lembur bertujuan memberikan kompensasi yang layak atas fleksibilitas waktu kerja karyawan.

g. Penggolongan Jabatan, Jumlah Karyawan dan Besaran Gaji

Tabel 4.3 Penggolongan Jabatan, Jumlah Karyawan dan Besaran Gaji

No	Jabatan	Jumlah	Gaji/Bulan
1	Direktur Utama	1	Rp 40.000.000,00
2	Direktur Teknik dan Produksi	1	Rp 30.000.000,00
3	Direktur Keuangan dan Umum	1	Rp 30.000.000,00
4	Staff Ahli	1	Rp 25.000.000,00
5	Staff Ahli Proses dan Produksi	1	Rp 20.000.000,00
6	Staff Ahli Lingkungan dan Limbah	1	Rp 20.000.000,00
7	Staff Ahli Energi dan Efisiensi	1	Rp 20.000.000,00
8	Ka. Bag. Produksi	1	Rp 15.000.000,00
9	Ka. Bag. Teknik	1	Rp 15.000.000,00
10	Ka. Bag. Pemasaran dan Keuangan	1	Rp 15.000.000,00
11	Ka. Bag. Administrasi dan Umum	1	Rp 15.000.000,00

12 Ka. Bag. Litbang	1	Rp 15.000.000,00
13 Ka. Bag. Humas dan Keamanan	1	Rp 15.000.000,00
14 Ka. Bag. K3	1	Rp 15.000.000,00
15 Ka. Bag. Pem. Listrik & Instrumen	1	Rp 15.000.000,00
16 Ka. Sek. Utilitas	1	Rp 12.000.000,00
17 Ka. Sek. Proses	1	Rp 12.000.000,00
18 Ka. Sek. Bahan Baku dan Produk	1	Rp 12.000.000,00
19 Ka. Sek. Pemeliharaan	1	Rp 12.000.000,00
20 Ka. Sek. Listrik dan Instrumentasi	1	Rp 12.000.000,00
21 Ka. Sek. Litbang	1	Rp 12.000.000,00
22 Ka. Sek. Keuangan	1	Rp 12.000.000,00
23 Ka. Sek. Pemasaran	1	Rp 12.000.000,00
24 Ka. Sek. Personalia	1	Rp 12.000.000,00
25 Ka. Sek. Humas	1	Rp 12.000.000,00
26 Ka. Sek. Keamanan	1	Rp 12.000.000,00
27 Ka. Sek. K3	1	Rp 12.000.000,00
28 Karyawan Personalia	4	Rp 10.000.000,00
29 Karyawan Humas	4	Rp 10.000.000,00
30 Karyawan Litbang	4	Rp 10.000.000,00
31 Karyawan Pembelian	4	Rp 10.000.000,00
32 Karyawan Pemasaran	4	Rp 10.000.000,00
33 Karyawan Administrasi	4	Rp 10.000.000,00
34 Karyawan Kas/Anggaran	4	Rp 10.000.000,00
35 Karyawan Proses	45	Rp 10.000.000,00
36 Karyawan Pengendalian	6	Rp 10.000.000,00
37 Karyawan Pemeliharaan	4	Rp 10.000.000,00
38 Karyawan Utilitas	42	Rp 10.000.000,00
39 Karyawan K3	6	Rp 10.000.000,00
40 Sekretaris	8	Rp 8.000.000,00
41 Dokter	2	Rp 10.000.000,00
42 Perawat	2	Rp 5.000.000,00
43 Satpam	8	Rp 4.000.000,00
44 Supir	2	Rp 4.000.000,00
45 Cleaning Service	2	Rp 3.500.000,00
Total	142	Rp 1.385.000.000,00

h. Ketenagakerjaan

Karyawan pabrik memiliki hak-hak ketenagakerjaan yang dilindungi dan diatur sesuai dengan peraturan perundang-undangan ketenagakerjaan nasional. Kebijakan ketenagakerjaan perusahaan dirancang untuk memberikan perlindungan, kesejahteraan dan lingkungan kerja yang produktif melalui skema tunjangan, cuti, fasilitas hingga program jaminan sosial. Adapun ketentuan umum yang diterapkan adalah sebagai berikut:

- Tunjangan dan Komponen Penghasilan

Setiap karyawan berhak menerima kompensasi yang terdiri atas:

- Gaji Pokok; Ditetapkan berdasarkan golongan dan status kepegawaian.
- Tunjangan Jabatan; Diberikan sesuai tanggung jawab struktural dalam organisasi.
- Tunjangan Lembur; Dibayarkan berdasarkan jumlah jam kerja di luar waktu normal, sesuai ketentuan lembur yang berlaku.
- Tunjangan Hari Raya (THR); Setara dengan satu bulan gaji, diberikan menjelang Hari Raya Idul Fitri setiap tahun, sebagaimana diatur dalam regulasi pemerintah.

- Hari Libur Nasional

- Karyawan non -shift; Hari libur nasional ditetapkan sebagai hari tidak bekerja.
- Karyawan shift; Apabila bekerja pada hari libur nasional, jam kerja dihitung sebagai lembur dan dibayarkan sesuai tarif yang berlaku.

▪ Hak Cuti Karyawan

- Cuti Tahunan; Setiap karyawan tetap berhak atas cuti tahunan selama 12 hari kerja, tidak dapat diakumulasi apabila tidak digunakan dalam periode berjalan.
- Cuti Sakit dan Cuti Melahirkan; Berlaku bagi karyawan yang menyertakan surat keterangan dari instansi medis. Untuk karyawan wanita yang melahirkan, cuti sesuai ketentuan Undang-Undang Ketenagakerjaan.

▪ Fasilitas Penunjang Karyawan

Untuk meningkatkan kesejahteraan dan mendukung kelancaran operasional, perusahaan menyediakan fasilitas sebagai berikut:

- Poliklinik Karyawan; Layanan kesehatan dasar yang dikelola oleh tenaga medis (dokter dan perawat).
- Seragam Kerja dan APD; Setiap karyawan mendapatkan dua set pakaian kerja per tahun, dilengkapi dengan Alat Pelindung Diri (APD) seperti masker, sarung tangan dan helm kerja.
- Fasilitas Konsumsi; Makanan dan minuman disediakan satu kali per hari melalui katering resmi perusahaan.
- Tempat Ibadah; Disediakan masjid dalam area pabrik untuk mendukung kebutuhan ibadah karyawan.
- Transportasi Karyawan; Layanan *shuttle bus* gratis disediakan untuk rute antar-jemput dari titik tertentu menuju dan/atau dari lokasi pabrik.

- Program Jaminan Sosial dan Kesehatan

Perusahaan mendaftarkan seluruh karyawan dalam program BPJS Ketenagakerjaan dan BPJS Kesehatan dengan manfaat sebagai berikut:

- Jaminan Kecelakaan Kerja (JKK)

Menanggung seluruh biaya transportasi, perawatan medis, rehabilitasi serta pemberian kompensasi atas cacat atau kematian akibat kecelakaan kerja.

- Jaminan Kematian (JKM)

Menyediakan santunan duka dan biaya pemakaman bagi ahli waris karyawan yang meninggal karena kecelakaan kerja.

- Jaminan Hari Tua (JHT)

Dana akumulatif yang diberikan kepada karyawan setelah memasuki usia pensiun (55 tahun), mengalami cacat total tetap atau diberikan kepada ahli waris dalam hal kematian.

- Jaminan Pemeliharaan Kesehatan (JKN)

Meliputi pelayanan kesehatan komprehensif seperti rawat jalan, rawat inap, pemeriksaan kehamilan dan persalinan, tindakan diagnostik dan spesialisik, serta penanganan gawat darurat.

BAB V

UTILITAS

Unit utilitas merupakan komponen pendukung yang esensial dalam menunjang keberlangsungan operasi pabrik secara kontinu dan efisien. Utilitas berfungsi sebagai sistem penunjang yang menyediakan kebutuhan proses selain bahan baku utama dan bahan pembantu, namun memiliki peran vital dalam menjaga kestabilan dan kesinambungan proses produksi. Dalam perancangan pabrik karbon aktif berbasis cangkang kelapa sawit, sejumlah sistem utilitas berikut dirancang untuk memenuhi kebutuhan energi, kontrol proses, dan pengelolaan lingkungan:

1. Sistem Penyediaan dan Pengolahan Air (*Water Treatment System*)
2. Sistem Pembangkit Listrik (*Power Plant System*)
3. Sistem Penyediaan Udara Tekan (*Instrument Air System*)
4. Sistem Penyediaan Bahan Bakar (*Fuel Supply System*)
5. Sistem Pengolahan Limbah (*Waste Treatment System*)

5.1 Sistem Penyediaan dan Pengolahan Air

Unit penyediaan dan pengolahan air merupakan salah satu fasilitas penunjang vital yang berfungsi untuk menyediakan pasokan air bersih dalam jumlah dan kualitas yang sesuai untuk menunjang seluruh aktivitas di dalam pabrik. Air yang digunakan dalam proses produksi harus melalui tahap pengolahan terlebih dahulu karena air yang diperoleh dari alam umumnya masih mengandung kontaminan fisik maupun kimia seperti *suspended solids*

dan *dissolved solids* yang berpotensi merusak peralatan atau menurunkan efisiensi proses.

Dalam perancangan pabrik karbon aktif ini, sumber air utama berasal dari Sungai Landak, yang lokasinya berdekatan dengan lokasi pabrik. Pemilihan air Sungai Landak sebagai sumber air didasarkan pada pertimbangan berikut: (1) Debit air sungai yang melimpah dan berkelanjutan, mengurangi risiko kekurangan pasokan air. (2) Lokasi sungai yang berdekatan dengan pabrik, meminimalkan biaya distribusi. (3) Proses pengolahan lebih sederhana dibandingkan dengan air laut. (4) Kebutuhan air dalam pabrik cukup tinggi, sehingga ketersediaan volume menjadi faktor utama.

Proses pengolahan dilakukan secara fisik (filtrasi, sedimentasi) dan kimia (koagulasi, disinfeksi) untuk memastikan air memenuhi standar teknis dan lingkungan yang ditetapkan. Secara umum, kebutuhan air pada pabrik karbon aktif ini digunakan untuk:

a. Air Domestik (*Domestic Water*)

Air domestik digunakan untuk kebutuhan personal karyawan seperti air minum, toilet, fasilitas mess dan sarana kebersihan umum.

Berdasarkan standar WHO[80], kebutuhan air domestik berkisar antara 100–120 liter/orang/hari. Kriteria air domestik yang dipenuhi antara lain:

- Jernih, tidak berwarna, tidak berbau dan tidak berasa.
- Tidak mengandung zat organik/anorganik berbahaya atau bersifat toksik.

Dengan asumsi kebutuhan air domestik untuk tiap karyawan sebesar 120 liter/hari, dan densitas air adalah 1.000 kg/m^3 , maka kebutuhan air domestik pada pabrik ini ditetapkan sebagai berikut:

Tabel 5.1 Jumlah Kebutuhan Air Domestik

Jumlah Karyawan	Kebutuhan Air Domestik (L/Hari)	Kebutuhan Air Domestik (kg/jam)
142	17.040	710
<i>Over Design 10%</i>	1.704	71
Total	18.744	781

b. Air Servis (*Service Water*)

Air servis digunakan untuk memenuhi kebutuhan fasilitas non-proses seperti bengkel, laboratorium, poliklinik, masjid, kantin serta sistem pemadam kebakaran (*hydrant*). Kriteria air untuk keperluan ini mirip dengan air domestik, baik secara fisika maupun kimia, yaitu suhu di bawah suhu udara, tidak berbau, tidak berwarna dan tidak mengandung zat berbahaya atau mikroorganisme patogen. Kebutuhan air servis berkisar antara $0,5\text{--}2 \text{ m}^3/\text{metrik ton produk}$ [81], [82]. Dipilih nilai $0,5 \text{ m}^3/\text{metrik ton produk}$ karena pabrik tidak membutuhkan sistem pendingin, jaket reaktor dan *steam*. Kebutuhan air servis adalah $757,58 \text{ kg/jam}$.

c. Air Proses (*Process Water*)

Air proses digunakan langsung dalam area produksi dan harus memiliki kualitas yang lebih tinggi dibandingkan air domestic, terutama dalam kandungan mineralnya yang harus lebih rendah agar tidak

menyebabkan timbulnya *scaling* dan *fouling* yang berpengaruh pada efisiensi alat.

Tabel 5.2 Jumlah Kebutuhan Air Proses

No	Nama Alat	Jumlah Air Proses (kg/jam)
1	<i>Mixer</i> (M-101)	6.560,11
2	<i>Horizontal Belt Filter</i> (HBF-101)	790,05
Total		7.350,16

Tabel 5.3 Total Kebutuhan Air

No	Jenis Kebutuhan	Jumlah (kg/jam)
1	Air Domestik	781,00
2	Air Servis	757,58
3	Air Proses	7.350,16
Total		8.888,74

Air untuk proses, yang bersumber dari alam (air sungai) tidak dapat digunakan secara langsung dalam sistem proses industri tanpa melalui tahapan pengolahan terlebih dahulu. Air tersebut umumnya mengandung kontaminan fisik, kimia dan biologis, baik dalam bentuk partikel tersuspensi (*suspended solids*) maupun terlarut (*dissolved solids*), yang dapat mengganggu performa peralatan serta merusak sistem utilitas seperti *heat exchanger*, *Horizontal Belt Filter*, dan *Mixer*. Oleh karena itu, unit pengolahan air dirancang untuk mengolah air proses menjadi air bersih dan lunak (*soft water*). Proses pengolahan dilakukan melalui kombinasi metode fisika dan kimia sebagai berikut:

a. Pengambilan Air

Air dari sumbernya (Sungai Landak) dihisap menggunakan pompa *intake* dan dialirkan menuju sistem penyaringan awal (*screen*). Proses ini bertujuan untuk menghilangkan kotoran kasar seperti ranting, daun atau sampah padat lainnya. Setelah penyaringan, air disalurkan menuju reservoir atau bak penampungan awal sebelum tahap pengolahan selanjutnya.

b. Penyaringan Awal (*Screening*)

Pada tahap ini, air dialirkan melalui *screen* mekanis yang berfungsi menyaring material padat berukuran besar tanpa melibatkan bahan kimia. Sistem ini dilengkapi dengan unit pembilas otomatis (*backwash*) untuk menjaga screen tetap bersih dan mencegah kerusakan akibat akumulasi padatan.

c. Koagulasi

Tahapan koagulasi dilakukan dengan menambahkan zat koagulan seperti Aluminium Sulfat $Al_2(SO_4)_3$ untuk menggumpalkan partikel koloid yang bermuatan negatif agar membentuk flok. Koagulan bekerja dengan menetralkan muatan partikel, sehingga memfasilitasi pengendapan. Untuk meningkatkan efektivitas, ditambahkan kapur $Ca(OH)_2$ untuk mengatur pH dan membantu pengendapan karbonat yang menyebabkan kesadahan.

d. Flokulasi

Dalam tahap ini, ditambahkan bahan flokulan seperti *Poly Aluminium Chloride* (PAC) untuk membentuk agregat flok yang lebih

besar dan mudah dipisahkan. Proses dilakukan dalam bak pengaduk lambat untuk menghindari pecahnya flok yang sudah terbentuk.

e. Pengendapan (Sedimentasi)

Flok yang terbentuk akan dipisahkan melalui proses pengendapan gravitasi dalam bak sedimentasi. Endapan hasil reaksi (*sludge*) dibuang secara periodik melalui sistem *blowdown* ke unit pengolahan limbah.

f. Filtrasi (*Sand Filter*)

Air hasil sedimentasi kemudian melewati unit *sand filter*, yang bertujuan menghilangkan padatan tersuspensi sisa ion logam seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} dan Fe^{2+} , serta kotoran mikro. Media filter dapat berupa pasir kuarsa, antrasit, atau resin khusus. Unit ini dilengkapi sistem pembersih balik (*backwash*) untuk menjaga efisiensi filtrasi.

g. Penampungan Air Bersih

Air yang telah melewati tahap penyaringan disebut sebagai air bersih dan ditampung dalam bak penampung air bersih. Dari sini, air didistribusikan ke berbagai keperluan seperti Air Domestik dan *Service Water*.

h. Demineralisasi

Untuk kebutuhan air berkemurnian tinggi, seperti air pelarut KOH, diperlukan tahap akhir demineralisasi yang bertujuan menghilangkan seluruh ion terlarut guna menghilangkan senyawa yang reaktif terhadap KOH seperti ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} yang berpotensi membentuk endapan (*scaling*). Proses ini terdiri dari dua tahap utama:

- *Cation Exchanger*

Mengandung resin penukar kation yang menggantikan ion-ion positif dalam air seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ dan Fe^{2+} dengan ion H^+ . Setelah keluar dari kolom ini, air mengandung H^+ sebagai kation yang menggantikan semua kation lain.

- *Anion Exchanger*

Tahap ini menggunakan resin basa kuat untuk menukar anion seperti Cl^- , SO_4^{2-} , dan CO_3^{2-} dengan ion OH^- . Hasil akhirnya air mengandung H^+ dan OH^- , yang langsung bergabung menjadi H_2O murni.

5.2 Sistem Pembangkit Listrik

Unit pembangkit listrik berperan penting dalam memastikan ketersediaan energi listrik secara kontinu dan stabil guna menunjang seluruh kegiatan operasional pabrik karbon aktif. Listrik dibutuhkan tidak hanya sebagai daya penggerak utama peralatan proses, tetapi juga untuk sistem pengolahan air, unit utilitas, peralatan instrumen serta sarana pendukung lainnya seperti sistem pencahayaan dan pendingin ruangan. Kebutuhan energi listrik di pabrik ini dipenuhi melalui dua sumber utama:

a. Sumber Utama – Listrik PLN

Jaringan listrik dari PLN menjadi sumber utama pasokan energi karena lebih ekonomis dan praktis dalam pengelolaan. Listrik dari PLN dialirkan ke sistem distribusi pabrik dan digunakan untuk seluruh kebutuhan operasional, seperti peralatan proses dan utilitas, sistem

pendingin (AC), penerangan umum, laboratorium, bengkel kerja, panel-panel kontrol dan sistem instrument.

b. Sumber Cadangan – Generator Set Internal

Untuk menjaga keandalan pasokan listrik, terutama saat terjadi gangguan dari PLN, pabrik dilengkapi dengan genset berbahan bakar solar sebagai sumber listrik cadangan. Generator ini menghasilkan listrik melalui konversi energi mekanik dari putaran poros engkol yang digerakkan oleh pembakaran internal mesin diesel. Sistem ini secara otomatis dapat diaktifkan saat terdeteksi pemutusan daya dari jaringan utama.

Dengan penerapan sistem *dual power supply* (PLN + Genset), pabrik mampu meminimalkan risiko gangguan operasional akibat pemadaman listrik, sekaligus tetap menjaga efisiensi biaya energi dalam jangka panjang. Sistem ini mendukung prinsip *reliability-based design* yang menjadi standar dalam industri proses berkelanjutan.

5.3 Sistem Penyediaan Udara Tekan

Pada sistem penyedia udara tekan mempunyai fungsi untuk menyediakan kebutuhan udara yang dibutuhkan semua dari alat controller memenuhi kebutuhan udara tekan untuk alat-alat yang bekerja dengan prinsip pneumatic terutama alat-alat kontrol.

BAB VI

EVALUASI EKONOMI

Evaluasi ekonomi merupakan salah satu komponen kritis dalam perancangan pabrik, karena secara langsung menentukan kelayakan finansial dan profitabilitas jangka panjang dari proyek pendirian pabrik karbon aktif. Melalui analisis ini, berbagai parameter ekonomi dapat dihitung secara sistematis, mulai dari estimasi kebutuhan investasi awal hingga proyeksi keuntungan dan risiko yang menyertainya. Salah satu aspek yang paling berpengaruh dalam evaluasi ekonomi adalah estimasi harga peralatan proses, karena data tersebut menjadi dasar dalam menyusun perhitungan modal, biaya operasi, dan proyeksi pengembalian investasi. Evaluasi ini mencakup analisis menyeluruh terhadap pembiayaan, pendapatan, waktu balik modal serta titik impas (*Break Event Point*)[78]. Beberapa komponen evaluasi ekonomi utama adalah :

1. Profitabilitas Proyek

Mengukur kemampuan pabrik menghasilkan keuntungan bersih dalam periode tertentu, dengan mempertimbangkan seluruh biaya dan pendapatan.

2. *Return on Investment* (ROI)

Menunjukkan rasio laba bersih terhadap total modal yang diinvestasikan, sebagai indikator efisiensi penggunaan modal.

3. *Pay Out Time* (POT)

Menggambarkan waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan seluruh investasi awal dari keuntungan bersih tahunan.

4. *Break Event Point (BEP)*

Titik di mana total pendapatan sama dengan total biaya, artinya perusahaan belum mendapatkan laba, namun tidak mengalami kerugian.

5. *Shut Down Point (SDP)*

Batas minimal tingkat pendapatan di mana operasional masih layak dijalankan; di bawah titik ini, pabrik harus dihentikan karena mengalami kerugian operasional.

6. *Discounted Cash Flow (DCF)*

Metode evaluasi yang mempertimbangkan nilai waktu uang (*time value of money*) untuk menilai kelayakan investasi jangka panjang melalui parameter seperti NPV (*Net Present Value*) dan IRR (*Internal Rate of Return*).

Untuk menganalisis lebih lanjut factor-faktor yang memengaruhi evaluasi ekonomi pabrik karbon aktif, diperlukan interpretasi terhadap beberapa aspek utama, yaitu[83]:

1. Analisis Modal Industri (*Total Capital Investment*)

Total investasi awal terdiri dari dua kategori, yaitu:

- Modal Tetap (*Fixed Capital Investment*); Investasi jangka panjang yang mencakup biaya pengadaan dan instalasi peralatan proses, pembangunan gedung, infrastruktur utilitas, sistem kontrol dan fasilitas penunjang.
- Modal Kerja (*Working Capital*); Dana yang dialokasikan untuk mendukung operasional harian seperti pembelian bahan baku, pembayaran gaji, biaya energi dan kebutuhan operasional jangka pendek lainnya.

2. Perhitungan Total Biaya Produksi (*Production Cost*)

Biaya produksi terdiri atas:

- Biaya Produksi Langsung (*Manufacturing Costs*); Termasuk bahan baku, tenaga kerja produksi, pemeliharaan alat serta biaya operasi fasilitas produksi.
- Biaya Umum dan Administratif (*General Expenses*); Termasuk biaya pemasaran, logistik, pajak, asuransi, pengeluaran kantor dan administrasi manajemen.

3. Estimasi Pendapatan dari Penjualan Produk (*Estimated Revenue*)

Pendapatan kotor dihitung dari perkalian antara kapasitas produksi tahunan dengan harga jual karbon aktif di pasar. Nilai ini menjadi dasar perhitungan arus kas masuk, serta indikator awal dari potensi keuntungan dan keberlanjutan proyek dalam jangka panjang.

6.1 Harga Alat

Harga peralatan industri bersifat dinamis dan cenderung mengalami fluktuasi sebagai akibat dari perubahan kondisi ekonomi global maupun domestik, seperti inflasi, nilai tukar, harga logam mulia dan biaya logistik. Oleh karena itu, dalam perancangan pabrik karbon aktif, penyesuaian harga peralatan dari tahun ke tahun menjadi hal penting untuk menghasilkan estimasi investasi yang realistis. Untuk memperoleh estimasi harga peralatan pada tahun tertentu di masa depan (2033), dapat digunakan pendekatan metode proyeksi linier berdasarkan data historis indeks harga peralatan proses.

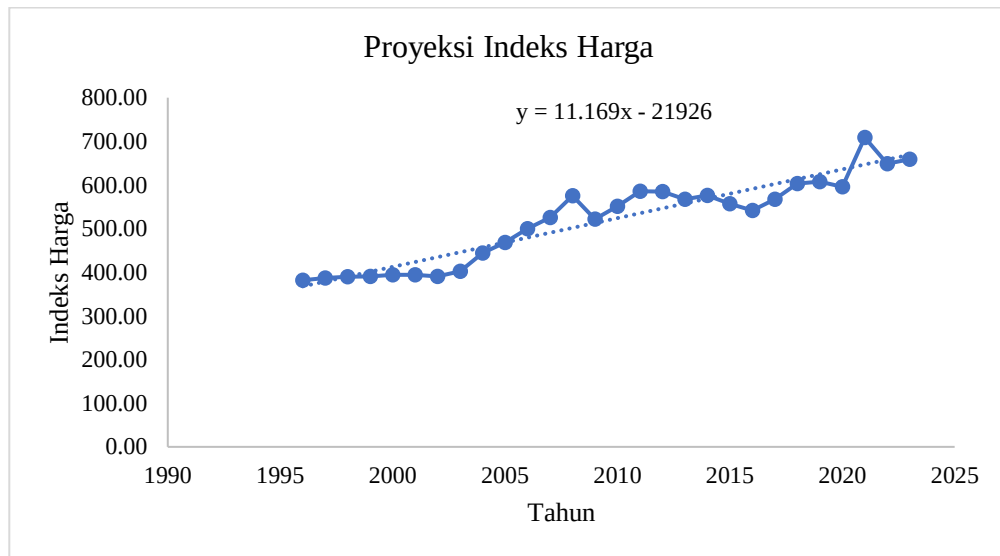
Perhitungan ini mengkonversi harga pada tahun referensi ke tahun target menggunakan indeks harga teknik (*Cost Index*). Data indeks harga yang

digunakan mencakup rentang tahun 1996 hingga 2023, dan nilai indeks untuk tahun 2033 diperkirakan melalui regresi linier, dengan mempertimbangkan tren kenaikan indeks dari tahun-tahun sebelumnya.

Tabel 6.1 Indeks Harga Dari Tahun 1996 Hingga 2023

No	Tahun (Xi)	Indeks (Yi)
1	1996	381,70
2	1997	386,50
3	1998	389,50
4	1999	390,60
5	2000	394,10
6	2001	394,30
7	2002	390,40
8	2003	402,00
9	2004	444,20
10	2005	468,20
11	2006	499,60
12	2007	525,40
13	2008	575,40
14	2009	521,90
15	2010	550,80
16	2011	585,70
17	2012	584,60
18	2013	567,30
19	2014	576,10
20	2015	556,80
21	2016	541,70
22	2017	567,50
23	2018	603,10
24	2019	607,50
25	2020	596,20
26	2021	708,70
27	2022	648,90
28	2023	658,60

[83]



Gambar 6.1 Proyeksi Indeks Harga

Harga alat pada pabrik karbon aktif didapatkan dari salah satu website matche[84] dan dari beberapa referensi lainnya. Perhitungan alat pada tahun 2033 saat pabrik didirikan didapatkan dengan rumus sebagai berikut[85]:

$$E_x = \left(\frac{N_x}{N_y} \right) E_y$$

Keterangan:

E_x	= Harga tahun pembelian	N_x	= Indeks harga tahun beli
E_y	= Harga tahun referensi	N_y	= Indeks harga tahun referensi

Dasar perhitungan:

- Kapasitas Produksi : 12.000 Metrik Ton/Tahun
- Waktu Operasi : 330 hari dalam setahun
- Pra-Rancangan : 2023–2025
- Tahun Beroperasi : 2033
- Nilai Kurs Uang : 1 USD = Rp 16.345,00
- Estimasi Umur Alat : 10 tahun

6.2 Perkiraan Harga Alat

Perkiraan harga peralatan dalam pra-rancangan pabrik karbon aktif dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu peralatan utama untuk proses produksi dan peralatan pendukung untuk unit utilitas. Estimasi harga ini menjadi dasar dalam penyusunan kebutuhan investasi modal tetap secara menyeluruh.

Tabel 6.2 Estimasi Harga Alat Proses

No	Nama Alat	Harga Alat 2033 (USD)	Harga Alat 2033 (Rp)
1	<i>Rotary Dryer 101</i>	815.292	13.325.954.907
2	<i>Rotary Dryer 102</i>	265.726	4.343.290.682
3	<i>Rotary kiln 101</i>	2.692.535	44.009.489.235
4	<i>Rotary kiln 102</i>	3.755.439	61.382.651.964
5	<i>Rotary Cooler</i>	774.024	12.651.420.270
6	<i>Screener</i>	24.380	398.487.459
7	<i>Bucket Elevator</i>	20.158	329.475.664
8	<i>Mixer</i>	991.399	16.204.414.596
9	<i>Hopper</i>	9.398	153.606.898
10	<i>Jaw Crusher</i>	34.056	556.643.353
11	<i>Horizontal Belt Filter</i>	43.137	705.081.580
12	<i>Hammer Mill</i>	79.464	1.298.834.490
13	<i>Belt Conveyor</i>	29.964	489.761.123
14	<i>Belt Conveyor + Screener</i>	40.315	658.951.329
15	<i>Screw Conveyor 101</i>	2.996	48.976.112
16	<i>Screw Conveyor 102</i>	4.358	71.237.981
17	<i>Screw Conveyor 103</i>	2.860	46.749.925
18	<i>Screw Conveyor 104</i>	3.950	64.559.421
19	<i>Screw Conveyor 105</i>	3.950	64.559.421
20	<i>Screw Conveyor 106</i>	2.315	37.845.178
21	<i>Screw Conveyor 107</i>	2.860	46.749.925
22	<i>Screw Conveyor 108</i>	2.860	46.749.925
Total			156.935.491.437

Tabel 6.3 Estimasi Harga Alat Utilitas

No	Nama Alat	Harga Alat 2033 (USD)	Harga Alat 2033 (Rp)
1	Pompa (18 buah)	95.612	1.562.783.218
2	<i>Heat Exchanger 101</i>	4.767	77.916.542
3	<i>Heat Exchanger 102</i>	4.631	75.690.355
4	<i>Blower</i> (6 buah)	65.376	1.068.569.722
5	<i>Screw Conveyor</i> Batu Bara	3.217	52.575.200
6	<i>Hopper</i> Batu Bara	6.936	113.365.275
Total			2.950.900.313

6.3 Perhitungan Biaya

a. *Capital Investment*

Modal investasi (capital investment) merupakan dana awal yang wajib disediakan sebelum suatu pabrik dapat dibangun dan dioperasikan. Secara umum, capital investment terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu:

- *Fixed Capital Investment*

Fixed Capital Investment merupakan dana yang dialokasikan untuk pengadaan seluruh fasilitas fisik dan peralatan operasi yang diperlukan dalam pembangunan dan pengoperasian pabrik secara permanen. Investasi ini mencakup biaya pembelian mesin proses, instalasi peralatan, pembangunan gedung serta infrastruktur pendukung lainnya.

Tabel 6.4 *Physical Plant Cost (PPC)*

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	<i>Purchased Equipment cost</i>	14.021.748	229.185.478.247
2	<i>Instalation Cost</i>	2.925.826	47.822.634.093
3	<i>Piping Cost</i>	12.058.704	197.099.511.293
4	<i>Instrumentation Cost</i>	2.103.262	34.377.821.737
5	<i>Insulation Cost</i>	1.121.740	18.334.838.260
6	<i>Electrical Cost</i>	2.103.262	34.377.821.737
7	<i>Building Cost</i>	1.587.109	25.941.297.600
8	<i>Land & Yard Improvement</i>	225.418	3.684.450.000
Total		36.147.070	590.823.852.967

Tabel 6.5 *Direct Plant Cost (DPC)*

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	<i>Physical Plant Cost</i>	36.147.070	590.823.852.967
2	<i>Engineering & Construction</i>	7.229.414	118.164.770.593
Total		43.376.484	708.988.623.560

Tabel 6.6 *Fixed Capital Investment (FCI)*

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	<i>Direct Plant Cost</i>	42.735.287	698.508.262.699
2	<i>Contractor Fee</i>	1.282.059	20.955.247.881
3	<i>Contingency Cost</i>	4.273.529	69.850.826.270
Total		48.290.874	789.314.336.849

- Working Capital Investment

Working Capital Investment adalah sejumlah dana yang dibutuhkan untuk mendukung kelangsungan operasional pabrik dalam jangka pendek, termasuk pembiayaan kegiatan produksi harian, pengadaan bahan baku, pembayaran tenaga kerja serta biaya utilitas dan distribusi. Modal kerja ini bersifat sirkulatif, artinya akan terus berputar selama proses produksi berlangsung. Sumber pendanaan untuk mendirikan suatu pabrik dapat berasal dari berbagai pihak, seperti modal pribadi, pinjaman perbankan atau pendanaan eksternal dari investor.

Struktur pembiayaan biasanya disesuaikan dengan kapasitas modal yang tersedia dan dapat disepakati dalam bentuk pola bagi hasil (*profit sharing*) atau rasio kepemilikan modal, seperti 40:60, 30:70, atau kombinasi lainnya tergantung pada proporsi dana pribadi terhadap dana pinjaman. Tujuan utama dari investasi modal adalah untuk memperoleh tingkat keuntungan (*return*) yang optimal. Investasi yang baik umumnya memiliki karakteristik sebagai berikut[83]:

- Memberikan laba maksimal dengan risiko yang terkendali.
- Memiliki periode pengembalian modal (*payback period*) yang relatif cepat.

- Dilaksanakan dalam kerangka hukum yang jelas, menggunakan teknologi yang layak, serta memastikan keamanan dan keberlanjutan operasional.

Tabel 6.7 *Working Capital Investment*

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	<i>Raw Material Inventory</i>	78.375	1.281.033.072
2	<i>In Process Inventory</i>	293.309	4.794.141.315
3	<i>Product Inventory</i>	1.629.496	26.634.118.417
4	<i>Available Cash</i>	1.629.496	26.634.118.417
5	<i>Extended Credit</i>	39.107.913	639.218.842.007
Total		42.738.590	698.562.253.228

b. *Manufacturing Cost*

Manufacturing cost merupakan total biaya yang harus dialokasikan untuk menjalankan proses produksi dalam suatu pabrik. Biaya ini mencakup seluruh pengeluaran yang berhubungan secara langsung maupun tidak langsung dengan pembuatan produk, baik yang bersifat variabel maupun tetap. Komponen biaya produksi ini menjadi bagian penting dalam menentukan struktur harga pokok produksi (*cost structure*) serta dalam analisis profitabilitas proyek. Secara umum, *manufacturing cost* terdiri atas tiga kategori utama[78]:

- *Direct Manufacturing Cost* (Biaya Produksi Langsung)

Biaya produksi langsung adalah komponen biaya yang berhubungan secara langsung dengan proses pembuatan produk,

seperti pengadaan bahan baku utama, gaji karyawan dan konsumsi energi yang digunakan langsung dalam alat proses.

Tabel 6.8 *Direct Manufacturing Cost*

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	Bahan Baku	546.328	8.929.739.271
2	Bahan Utilitas	315.792	5.161.624.520
3	Gaji Karyawan	1.016.825	16.620.000.000
4	<i>Supervise</i>	86.212	1.409.136.379
5	<i>Maintenance</i>	2.414.544	39.465.716.842
6	<i>Plant Supplies</i>	362.182	5.919.857.526
7	<i>Royalties</i>	18.109	295.992.876
Total		4.759.992	77.802.067.415

▪ *Indirect Manufacturing Cost* (Biaya Produksi Tidak Langsung)

Merupakan biaya yang tidak terkait secara langsung ke unit produksi, namun tetap diperlukan dalam menunjang proses produksi. Contohnya adalah perlengkapan kerja tidak langsung, biaya pengiriman dan laboratorium.

Tabel 6.9 *Indirect Manufacturing Cost*

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	<i>Payoll Overhead</i>	203.364,94	3.324.000.000
2	<i>Laboratory</i>	101.682,47	1.662.000.000
3	<i>Plant overhead</i>	813.459,77	13.296.000.000
4	<i>Packaging and shipping</i>	864.000,00	14.122.080.000
Total		1.982.507,19	32.404.080.000

▪ *Fixed Manufacturing Cost* (Biaya Produksi Tetap)

Biaya produksi tetap adalah pengeluaran yang terjadi secara konstan tanpa tergantung pada volume produksi. Biaya ini tetap dibayarkan meskipun proses produksi tidak berjalan penuh. Contohnya adalah depresiasi peralatan dan fasilitas, asuransi pabrik, sewa bangunan atau lahan serta pajak properti industri.

Tabel 6.10 *Fixed Manufacturing Cost*

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	<i>Depreciation</i>	4.346.178,67	71.038.290.316
2	<i>Property tax</i>	482.908,74	7.893.143.368
3	<i>Insurance</i>	482.908,74	7.893.143.368
Total		5.311.996,15	86.824.577.053

Tabel 6.11 *Total Manufacturing Cost*

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	<i>Direct Manufacturing Cost</i>	4.759.992,00	77.802.067.415
2	<i>Indirect Manufacturing Cost</i>	1.982.507,19	32.404.080.000
3	<i>Fixed Manufacturing Cost</i>	5.311.996,15	86.824.577.053
Total		12.054.495,34	197.030.724.468

c. *General Expenses*

General Expenses atau biaya pengeluaran umum mencakup seluruh pengeluaran yang berkaitan dengan aktivitas operasional perusahaan secara keseluruhan, namun tidak termasuk dalam kategori biaya produksi langsung (*Manufacturing Cost*). Biaya ini diperlukan untuk menjaga kelangsungan operasional perusahaan dari sisi administratif,

komersial, dan pengembangan. *General Expenses* diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama[83]:

- Biaya Administrasi (*Administrative Expenses*)

Biaya ini mencakup segala pengeluaran yang berhubungan dengan fungsi administrasi dan manajemen perusahaan, seperti gaji manajemen, jasa hukum dan konsultasi, biaya audit dan akuntansi, perlengkapan kantor serta perangkat lunak administrasi. Estimasi besarnya berkisar antara 2–3% dari nilai penjualan, atau 3–6% dari total *Manufacturing Cost*.

- Biaya Penjualan (*Selling Expenses*)

Merupakan pengeluaran yang digunakan untuk mendukung aktivitas pemasaran dan distribusi produk, seperti biaya promosi, iklan, branding, biaya pengemasan dan pengiriman. Besaran biaya penjualan umumnya antara: 3–12% dari harga jual produk, atau 5–22% dari *Manufacturing Cost*, tergantung pada strategi pemasaran. Produk baru biasanya memerlukan anggaran pemasaran yang lebih tinggi untuk membangun merk (*brand awareness*).

- Biaya Riset dan Pengembangan (*Research & Development Expenses*)

Dana riset dialokasikan untuk menjaga konsistensi mutu produk, melakukan inovasi produk dan proses, serta menunjang pengambilan keputusan berbasis data ilmiah. Dalam industri kimia, besaran anggaran untuk kegiatan R&D umumnya mencapai $\pm 2,8\%$ dari total penjualan tahunan.

Tabel 6.12 *General Expenses*

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	Administrasi	2.240.044	36.613.522.014
2	<i>Sales</i>	2.240.044	36.613.522.014
3	<i>Finance</i>	2.986.726	48.818.029.352
4	<i>Research</i>	2.986.726	48.818.029.352
Total		10.453.539	170.863.102.732

Tabel 6.13 *Total Production Cost*

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	<i>General Expenses</i>	18.918.270	309.219.122.998
2	<i>Manufacturing Cost</i>	19.553.956	319.609.421.004
Total		38.472.226	628.828.544.002

d. Analisis Kelayakan

Analisis kelayakan ekonomi bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan pabrik dalam menghasilkan keuntungan, sehingga dapat ditentukan apakah suatu pabrik layak dibangun dari sisi finansial. Melalui pendekatan ini, besaran laba yang dapat diperoleh dianalisis secara kuantitatif untuk mengidentifikasi potensi keuntungan maksimum maupun risiko kerugian. Hasil evaluasi akan menjadi dasar dalam mengkategorikan apakah proyek pendirian pabrik termasuk dalam kelompok ekonomis dan potensial atau tidak layak secara finansial. Untuk menilai kelayakan ekonomi secara menyeluruh, digunakan beberapa metode analisis keuangan, yaitu:

▪ % Pengembalian Investasi (% *Return on Investment / ROI*)

ROI merupakan indikator kinerja keuangan yang menggambarkan rasio laba bersih terhadap total investasi yang telah dikeluarkan. Nilai *ROI* menunjukkan seberapa besar pengembalian modal yang diperoleh dalam suatu periode waktu sebagai hasil dari operasional pabrik. Semakin tinggi nilai *ROI*, semakin baik tingkat profitabilitas investasi.

Menurut Aries & Newton[85], nilai *ROI* dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

$ROI < 44\%$ → Kategori risiko rendah (*low risk*)

$ROI \geq 44\%$ → Kategori risiko tinggi (*high risk*)

Klasifikasi ini digunakan sebagai tolok ukur dalam mengevaluasi tingkat sensitivitas dan potensi keberhasilan finansial dari suatu proyek pabrik.

$$\% ROI = \frac{Profit}{Fixed Capital Investment} \times 100\%$$

- %*ROI* Sebelum Pajak

$$ROI = \frac{keuntungan\ sebelum\ pajak}{Fixed\ Capital\ Investment} \times 100\%$$

$$ROI = \frac{338.210.172.799}{789.314.336.849} \times 100\%$$

$$ROI = 42,85\%$$

- %*ROI* Setelah Pajak

$$ROI = \frac{keuntungan\ setelah\ pajak}{Fixed\ Capital\ Investment} \times 100\%$$

$$ROI = \frac{253.657.629.599}{789.314.336.849} \times 100\%$$

$$ROI = 32,13\%$$

▪ *Pay Out Time (POT)*

Pay Out Time (POT) merupakan parameter yang menunjukkan lama waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan total modal investasi (*capital investment*) dari laba bersih tahunan sebelum depresiasi. Dengan kata lain, *POT* mencerminkan periode pengembalian investasi awal melalui akumulasi keuntungan operasional perusahaan. *POT* secara umum digunakan untuk menilai kecepatan pengembalian modal, dan sering dianggap sebagai indikator awal risiko finansial suatu proyek. Semakin singkat *POT*, semakin cepat investor memperoleh kembali modal yang telah ditanamkan[78].

POT juga dapat dianggap sebagai waktu minimum teoritis yang dibutuhkan untuk mengembalikan seluruh dana investasi tetap, tanpa mempertimbangkan faktor eksternal seperti perubahan nilai uang atau risiko ekonomi makro. Pabrik dikategorikan sebagai[85]:

Risiko rendah (*low risk*) apabila $POT \leq 3$ tahun

Risiko tinggi (*high risk*) apabila $POT > 3$ tahun

- *POT* Sebelum Pajak

$$POT = \frac{\text{Fixed Capital Investment}}{(\text{Keuntungan sebelum pajak} + \text{Depresiasi})} \times 1 \text{ Tahun}$$

$$POT = \frac{789.314.336.849}{(338.210.172.799 + 71.038.290.316)} \times 1 \text{ Tahun}$$

$$POT = 1,9 \text{ Tahun}$$

- *POT* Setelah Pajak

$$POT = \frac{\text{Fixed Capital Investment}}{(\text{Keuntungan sesudah pajak} + \text{Depresiasi})} \times 1 \text{ Tahun}$$

$$POT = \frac{789.314.336.849}{(253.657.629.599 + 71.038.290.316)} \times 1 \text{ Tahun}$$

$$POT = 2,4 \text{ Tahun}$$

▪ *Break Event Point (BEP)*

Break Even Point (BEP) atau titik impas merupakan kondisi di mana pendapatan total dari hasil penjualan produk sama persis dengan total biaya operasional, sehingga perusahaan tidak mengalami laba maupun rugi. *BEP* menjadi indikator penting untuk menentukan volume produksi minimum yang harus dicapai agar seluruh biaya dapat tertutupi. Dengan kata lain, *BEP* adalah titik di mana total pemasukan sama dengan total pengeluaran. Jika pabrik beroperasi di bawah *BEP*, maka akan mengalami kerugian karena pendapatan tidak mencukupi untuk menutup biaya produksi. Sebaliknya, jika pabrik beroperasi di atas *BEP*, maka akan menghasilkan keuntungan[78].

Tujuan utama dari setiap perusahaan adalah memaksimalkan profitabilitas, dan untuk itu, beberapa strategi dapat diterapkan guna mendorong tercapainya *BEP* dengan lebih cepat, antara lain:

- Menentukan harga jual yang optimal, dengan memperhitungkan target margin laba serta daya beli pasar.

- Meningkatkan volume produksi hingga mendekati kapasitas maksimum, sehingga biaya tetap dapat dibagi ke lebih banyak unit produk (*economies of scale*).
- Menekan biaya operasional serendah mungkin, tanpa menurunkan standar mutu produk, agar struktur biaya lebih efisien dan daya saing harga meningkat.

$$BEP = \frac{(Fa + 0,3Ra)}{Sa - Va - 0,3Ra} \times 1$$

Keterangan:

F_a = Annual Fixed Manufacturing Cost pada produksi maks.

R_a = Annual Regulated Expenses pada produksi maks.

V_a = Annual Variable Value pada produksi maks.

S_a = Annual Sales Value pada produksi maks. *annual*

Tabel 6.14 Annual Fixed Cost

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	<i>Depreciation</i>	4.346.179	71.038.290.316
2	<i>Property Taxes</i>	482.909	7.893.143.368
3	<i>Insurances</i>	482.909	7.893.143.368
Total		5.311.996	86.824.577.053

Tabel 6.15 Annual Variable Cost

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	<i>Raw Material</i>	546.328	8.929.739.271
2	<i>Packaging & Shipping</i>	864.000	14.122.080.000
3	Biaya Bahan Utilitas	315.792	5.161.624.520
4	<i>Royalties and Patens</i>	18.109	295.992.876
Total		1.744.230	28.509.436.667

Tabel 6.16 *Annual Regulated Expenses Cost*

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	<i>Employee Salary</i>	1.016.825	16.620.000.000
2	<i>Payoll Overhead</i>	203.365	3.324.000.000
3	<i>Plant Overhead</i>	813.460	13.296.000.000
4	<i>Supervise</i>	86.212	1.409.136.379
5	<i>Laboratory</i>	101.682	1.662.000.000
6	<i>General Expenses</i>	10.453.539	170.863.102.732
7	<i>Maintennace</i>	2.414.544	39.465.716.842
8	<i>Plant Supplies</i>	362.182	5.919.857.526
Total		15.451.809	252.559.813.480

Tabel 6.17 *Annual Sales Cost*

No	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (USD)	Jumlah Biaya (Rp)
1	<i>SA</i>	43.200.000	706.104.000.000
Total		43.200.000	706.104.000.000

$$BEP = \frac{(86.824.577.053 + 0,3 \times 252.559.813.480)}{706.104.000.000 - 28.509.436.667 - 0,3 \times 252.559.813.480} \times 1$$

$$BEP = 32,42\%$$

▪ *Shut Down Point (SDP)*

Shut Down Point (SDP) adalah batas kritis di mana kegiatan produksi pabrik tidak lagi layak untuk dilanjutkan, baik secara teknis maupun ekonomis. Titik ini menandai kondisi ketika biaya operasional, terutama biaya variabel (*variable cost*) menjadi terlalu tinggi hingga melebihi nilai pendapatan yang dihasilkan dari penjualan produk, sehingga perusahaan tidak mampu menghasilkan

keuntungan bahkan dalam skenario minimum sekalipun. SDP dapat terjadi akibat:

- Tingginya biaya variabel, seperti bahan baku, energi atau tenaga kerja.
- Kesalahan strategis dalam pengambilan keputusan operasional atau investasi yang menyebabkan biaya per unit menjadi tidak ekonomis.

Pabrik dinyatakan telah mencapai SDP ketika tingkat utilisasi tidak dapat mencapai kapasitas minimum tahunan yang dibutuhkan untuk menutup biaya operasional. Jika kapasitas produksi aktual terus berada di bawah ambang batas minimum tersebut selama periode tertentu, maka perusahaan perlu mengambil keputusan untuk:

- Menghentikan sementara kegiatan produksi (*temporary shutdown*), atau
- Menutup pabrik secara permanen (*permanent closure*), jika proyeksi finansial menunjukkan tidak adanya pemulihan dalam jangka panjang.

Penentuan *SDP* sangat penting dalam manajemen risiko dan strategi kelangsungan usaha, karena dapat menjadi indikator awal dari penurunan profitabilitas.

$$SDP = \frac{0,3Ra}{Sa - Va - 0,7Ra} \times 100\%$$

Keterangan:

R_a = *Annual Regulated Expenses* pada produksi maks.

V_a = *Annual Variable Value* pada produksi maks.

S_a = *Annual Sales Value* pada produksi maks.

$$SDP = \frac{0,3Ra}{S_a - V_a - 0,3Ra} \times 100\%$$

$$SDP = \frac{0,3 \times 252.559.813.480}{706.104.000.000 - 28.509.436.667 - 0,3 \times 252.559.813.480} \times 100\%$$

$$SDP = 13,85\%$$

▪ *Discounted Cash Flow Rate of Return (DCFRR)*

Discounted Cash Flow Rate of Return (DCFRR) merupakan metode evaluasi investasi yang digunakan untuk menilai prospek pertumbuhan finansial dari suatu proyek dalam jangka waktu tertentu, dengan mempertimbangkan nilai waktu uang (*time value of money*). Metode ini menggambarkan tingkat pengembalian investasi yang setara dengan diskonto bersih arus kas masa depan terhadap nilai investasi awal. Konsep dasar *DCFRR* adalah jika seseorang menginvestasikan sejumlah dana pada suatu proyek, maka metode ini akan menunjukkan berapa besar tingkat pengembalian (*% return*) yang diperoleh dari aliran kas masuk (*cash inflow*) setelah mempertimbangkan penurunan nilai uang seiring waktu (diskonto).

Metode ini juga dikenal sebagai bentuk dari analisis arus kas terdiskonto (*discounted cash flow*) karena perhitungannya melibatkan estimasi arus kas tahunan yang kemudian dikonversi ke nilai sekarang menggunakan tingkat diskonto tertentu. Nilai diskonto ini merepresentasikan tingkat pengembalian minimum yang diharapkan oleh investor (*hurdle rate*).

$$N=N-1 (WC+FCI) * [(1+i)^n] \{[(1+i)^{(n-1)} + ((1+i)^{(n-2)}) + ((1+i)^{(n-3)}) + \dots + ((1+i)^{(n-n)}) + (1+i) + 1]*CF\} + \{SV+WCI\}$$

Keterangan:

FCI = *Fixed Capital Investment*

WC = *Working Capital Investment*

SV = *Salvage Value / depreciation*

N = *Factory Age (10 years)*

I = *DCFRR Value*

Dipilih data untuk perhitungan sebagai berikut:

FCI = 789.314.336.849

WC = 431.136.396.954

SV = 78.931.433.685

N = 20 years (estimation)

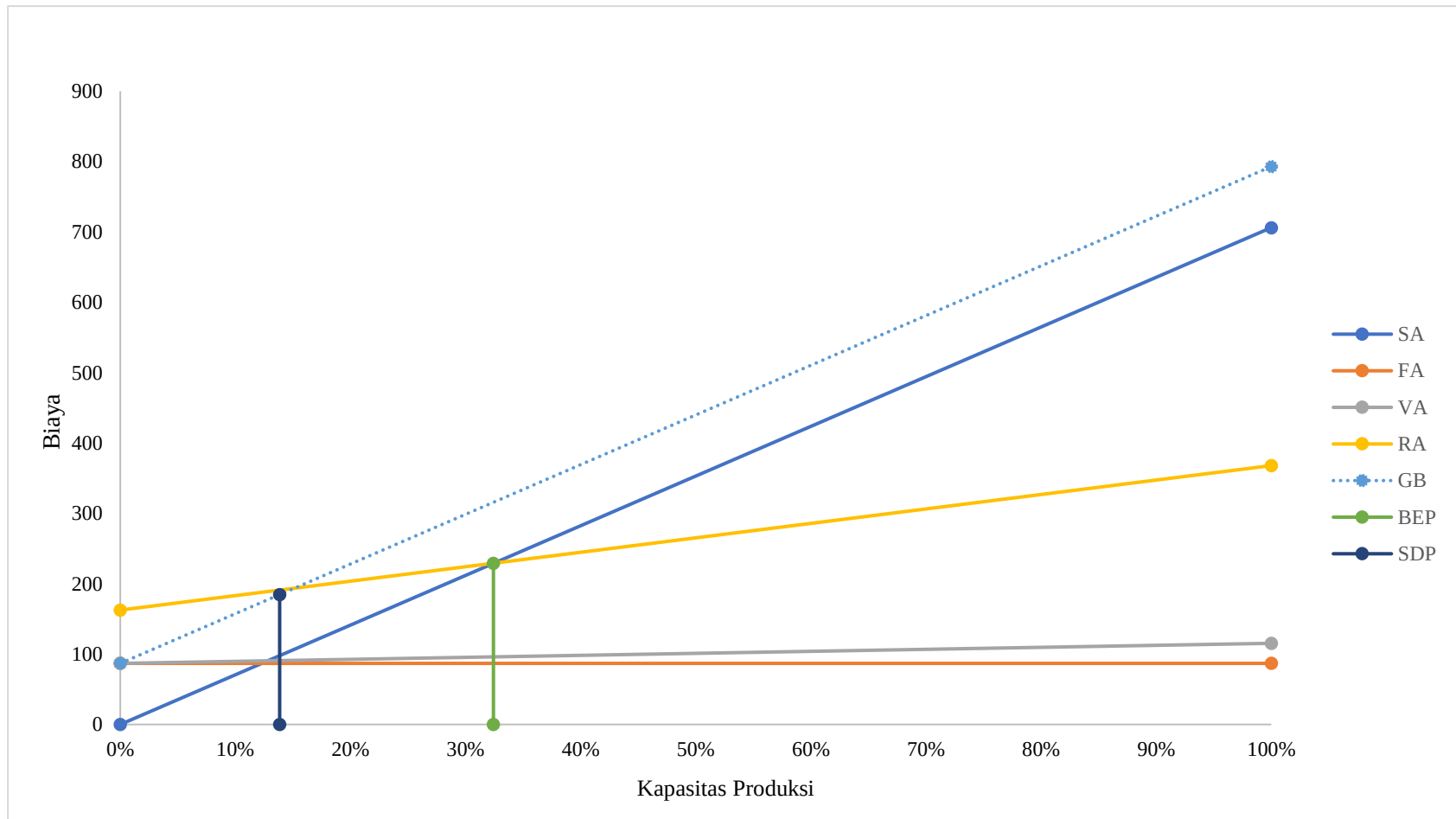
Dengan *trial & error*, diperoleh nilai *DCFRR* sebesar 6,8%.

Dalam perhitungan evaluasi ekonomi proyek ini, tingkat diskonto (*Discounted Cash Flow Rate of Return / DCFRR*) yang digunakan adalah sebesar 6,8%. Nilai ini ditentukan dengan mempertimbangkan suku bunga acuan deposito Bank Indonesia pada periode terkait, yaitu sekitar 2,75%, kemudian ditambahkan margin risiko, guna mengakomodasi faktor ketidakpastian investasi, inflasi dan risiko finansial lainnya.

Dengan demikian, angka 6,8% merepresentasikan tingkat pengembalian minimum yang diharapkan (*minimum acceptable rate*

of return) yang harus dicapai agar proyek dinilai layak secara finansial. Jika tingkat pengembalian aktual dari proyek lebih rendah dari nilai ini, maka proyek dapat dianggap kurang menarik atau berisiko tinggi secara ekonomi.





Gambar 6.2 Grafik Evaluasi Ekonomi

6.4 Resiko Pabrik

Tabel 6.18 Risiko Pabrik

No	Parameter Risiko	<i>Low Risk</i>	<i>High Risk</i>	Keterangan
1	Kondisi Operasi		✓	Beroperasi pada suhu tinggi (mencapai 927°C)
2	Kondisi Material			
	Cangkang Kelapa Sawit		✓	<i>Flammable</i> pada kondisi kering
	KOH		✓	<i>Toxic</i> dan korosif tinggi
	H ₂ O	✓		Tidak berbahaya
3	Lokasi Pabrik	✓		Lokasi di Kec. Ngabang, Kab. Landak, Kalbar
4	Ketersediaan Bahan Baku			
	Cangkang Kelapa Sawit	✓		Lokasi pabrik dekat dengan Industri Kelapa Sawit
	KOH		✓	<i>Import</i> dari China
	H ₂ O	✓		Diambil dari Sungai Landak, dekat dengan lokasi pabrik
5	Regulasi	✓		Didukung oleh PP No. 22 Tahun 2021

Penilaian tingkat risiko pabrik dilakukan dengan mempertimbangkan sejumlah parameter operasional dan teknis yang ditampilkan dalam tabel diatas. Berdasarkan analisis tersebut, terdapat empat parameter kunci yang diklasifikasikan dalam kategori risiko tinggi (*high risk*), yang secara signifikan berpotensi memengaruhi keselamatan, kontinuitas operasional dan kelayakan pabrik.

Pertama, kondisi operasi proses menunjukkan suhu tertinggi yang mencapai 927°C, terutama pada tahap aktivasi kimia menggunakan *rotary kiln*. Suhu yang sangat tinggi ini secara intrinsik meningkatkan potensi bahaya kebakaran atau ledakan, serta risiko kerusakan pada peralatan termal jika terjadi penyimpangan operasional.

Kedua, karakteristik bahan baku juga memberikan kontribusi besar terhadap tingkat risiko. Berdasarkan informasi *Material Safety Data Sheet* (MSDS), cangkang kelapa sawit dalam kondisi kering termasuk bahan mudah terbakar (*flammable*), yang memerlukan penanganan dan penyimpanan khusus untuk mencegah risiko kebakaran spontan. Kalium Hidroksida (KOH) diklasifikasikan sebagai zat *toxic*, korosif dan bereaksi eksotermis dengan air, sehingga dapat menimbulkan bahaya termal dan kimia apabila tidak dikendalikan dengan baik.

Ketiga, risiko juga muncul dari rantai pasok bahan baku, khususnya KOH yang diperoleh melalui impor dari China. Proses logistik ini menghadirkan potensi kendala seperti waktu pengiriman yang lama, risiko keterlambatan, kerusakan bahan atau bahkan kehilangan akibat insiden pengangkutan, yang semuanya dapat mengganggu kesinambungan produksi.

Berdasarkan keseluruhan tinjauan tersebut, pabrik karbon aktif berbasis aktivasi kimia menggunakan KOH dari cangkang kelapa sawit dikategorikan sebagai pabrik dengan tingkat risiko tinggi (*high risk*). Oleh karena itu, diperlukan penerapan sistem manajemen risiko terpadu, termasuk

pengendalian proses, prosedur keselamatan kerja, serta jaminan suplai bahan baku yang andal.



BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis teknis dan evaluasi ekonomi pada “Pra Rancangan Pabrik Karbon Aktif Dari Cangkang Kelapa Sawit Dengan Aktivasi Kimia (KOH) Pada Kapasitas 12.000 Metrik Ton/Tahun”, dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

- a. Pembangunan pabrik karbon aktif dari cangkang kelapa sawit pada kapasitas 12.000 metrik ton/tahun didasari oleh kebutuhan untuk mengurangi ketergantungan impor, menyediakan lapangan kerja, meningkatkan nilai tambah produk lokal serta memenuhi permintaan karbon aktif dalam negeri.
- b. Pabrik dirancang dalam bentuk Perseroan Terbatas (PT) dan berlokasi di Kecamatan Ngabang, Kabupaten Landak, Kalimantan Barat dengan total luas lahan 10.174 m². Kegiatan operasional dilakukan selama 330 hari per tahun dengan kebutuhan 142 tenaga kerja.
- c. Berdasarkan kondisi operasi, sifat bahan baku dan penilaian risiko berdasarkan *MSDS* serta potensi bahaya proses, pabrik diklasifikasikan sebagai pabrik berisiko tinggi (*high risk*).
- d. Hasil evaluasi ekonomi menunjukkan bahwa pabrik ini layak untuk dikembangkan lebih lanjut, dengan parameter sebagai berikut:

ROI sebelum pajak = 42,85%

ROI setelah pajak = 32,13%

POT sebelum pajak = 1,9 Tahun

POT setelah pajak = 2,4 Tahun

BEP = 32,42%

SDP = 13,85%

DCFRR = 6,8%

- e. Dengan mempertimbangkan seluruh aspek diatas (ketersediaan bahan baku, kelayakan teknis, prospek pasar dan hasil analisis ekonomi) pabrik karbon aktif berbasis cangkang kelapa sawit dengan kapasitas 12.000 metrik ton/tahun dinilai layak untuk direalisasikan dan dikembangkan lebih lanjut.

7.2 Saran

- a. Optimasi *heat recovery* dengan *Pinch Analysis*. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi titik-titik kritis dalam aliran panas proses, sehingga dapat dirancang sistem pertukaran panas yang optimal. *Pinch Analysis* dapat meminimalkan kebutuhan utilitas eksternal seperti *steam*, serta mengurangi konsumsi energi secara keseluruhan. yang berdampak pada penurunan biaya operasional.
- b. Optimalisasi pemilihan alat dan bahan baku. Pemilihan peralatan proses dan penunjang harus mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomi secara optimal. Selain itu, seleksi bahan baku dengan kualitas terbaik namun tetap ekonomis akan memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi produksi dan profitabilitas.

- c. Produk karbon aktif yang dihasilkan diharapkan mampu memenuhi kebutuhan pasar nasional dan internasional yang terus meningkat. Oleh karena itu, strategi pemasaran, jaminan mutu dan diversifikasi aplikasi produk perlu dirancang sejak awal untuk memastikan daya saing jangka panjang.
- d. Mengingat proses produksi karbon aktif berpotensi menghasilkan limbah padat, cair maupun gas, maka diperlukan sistem pengolahan limbah yang efektif, ramah lingkungan dan sesuai dengan regulasi yang berlaku. Pengembangan metode pengolahan limbah yang berkelanjutan harus menjadi bagian sakral dari desain pabrik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "Produksi Kelapa Sawit Indonesia Capai 45,58 Juta Ton pada 2022." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://dataindonesia.id/agribisnis-kehutanan/detail/produksi-kelapa-sawit-indonesia-capai-4558-juta-ton-pada-2022>
- [2] "Produsen CPO Terbesar Dunia, RI-Malaysia Sepakat Lawan Diskriminasi Sawit." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://databoks.katadata.co.id/agroindustri/statistik/81c2bbef526572b/produsen-cpo-terbesar-dunia-ri-malaysia-sepakat-lawan-diskriminasi-sawit>
- [3] "Panduan Lengkap Pengelolaan Kebun dan Pabrik Kelapa Sawit - Maruli Pardamean - Google Buku." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=8ZA2COQO1AgC&printsec=frontcover&hl=id#v=onepage&q&f=false>
- [4] "Kemenperin: RI Bidik Ekspor Produk Biomassa Cangkang Sawit ke Jepang." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://kemenperin.go.id/artikel/23583/RI-Bidik-Ekspor-Produk-Biomassa-Cangkang-Sawit-ke--Jepang>
- [5] "Official Website Direktorat Jenderal Bea dan Cukai." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.beacukai.go.id/berita/bea-cukai-parepare-layani-ekspor-cangkang-sawit-indonesia-ke-jepang.html>
- [6] B. N. Utomo and E. Widjaja, "Limbah padat pengolahan minyak sawit sebagai sumber nutrisi ternak ruminansia," *Jurnal Litbang Pertanian*, vol. 23, no. 1, pp. 22–28, 2004.
- [7] R. Idrus, B. P. Lapanporo, and Y. S. Putra, "Pengaruh suhu aktivasi terhadap kualitas karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa," *Prisma Fisika*, vol. 1, no. 1, 2013.
- [8] P. M. Rohmah and A. S. Redjeki, "Pengaruh waktu karbonisasi pada pembuatan karbon aktif berbahan baku sekam padi dengan aktivator KOH," *Jurnal Konversi*, vol. 3, no. 1, 2014.
- [9] "Data Ekspor Impor - Badan Pusat Statistik Indonesia." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/id/exim>
- [10] "UN Comtrade." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://comtradeplus.un.org/TradeFlow?Frequency=A&Flows=X&CommodityCodes=380210&Partners=0&Reporters=360&period=2013&AggregateBy=none&BreakdownMode=plus>
- [11] "intanprima.com." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://intanprima.com/about.html>

- [12] "Semangat Hilirisasi, PTBA Tandatangani HoA Produksi Karbon Aktif | PT Bukit Asam Tbk." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.ptba.co.id/berita/semangat-hilirisasi-ptba-tandatangani-hoa-produksi-karbon-aktif-1312>
- [13] "P3DN | Home." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: https://tkdn.kemenperin.go.id/kapasitas.php?id=pmdSLb2e0h1g955RI-cOL81kwuBQ2UAVJtIUM-D63t4,&pub=PuWof_o9nUINBBU7L3RZKvmOM-YJ--m5LkXlZPEolvY,&nama=EM-8e187QEYvaZ-vDif8-AEFqtk079rF4HWtUR_TR-H97RqNCUNG1KVA1kLsVi1zoSPVbEBi0XPxQlI3eN5uCw
- [14] Rudi, "Wawancara Pegawai PT Nawa Perkasa," Mempawah, 2023.
- [15] "Kementerian ESDM RI - Media Center - News Archives - Mini Plant Karbon Aktif Kapasitas 1 Ton per Hari Dibangun di Samarinda." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/en/media-center/news-archives/mini-plant-karbon-aktif-kapasitas-1-ton-per-hari-dibangun-di-samarinda>
- [16] "About Us – PT. Inkaprima Jaya." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://inkacarbon-indonesia.com/about/>
- [17] "会社概要 | PT. Swing Indonesia | カーボンニュートラル・省エネ." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: https://indonesia.fact-link.com/mem_profile.php?pl=jp&mem=00000083&page=00000100
- [18] "PT Mapalus Makawanua Charcoal Industry Company Profile - Indonesia | Financials & Key Executives | EMIS." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: https://www.emis.com/php/company-profile/ID/PT_Mapalus_Makawanua_Charcoal_Industry_en_7317565.html
- [19] "Activated Carbon - Indonesia - 2007-2024 - Market Overview - IndexBox Platform." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://app.indexbox.io/report/380210/360/>
- [20] "10 Provinsi Pemilik Lahan Kelapa Sawit Terluas di Indonesia." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://web.dumaikota.go.id/berita/detail/10-provinsi-pemilik-lahan-kelapa-sawit-terluas-di-indonesia>
- [21] "Data Perusahaan Industri Minyak Mentah Kelapa Sawit (Crude Palm Oil) di Kalimantan Barat - DATA PERUSAHAAN INDUSTRI MINYAK MENTAH KELAPA SAWIT (CRUDE PALM OIL).xlsx - SATU DATA PROVINSI KALIMANTAN BARAT." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://data.kalbarprov.go.id/dataset/data-perusahaan-industri-minyak-mentah-kelapa-sawit-crude-palm-oil-di-kalimantan-barat/resource/0ca8cfa5-c746-47bb-8df4-85f175664f4c>
- [22] "Company - Shanxi Xinhua Chemical Co., Ltd." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <http://sxxhhg.szbdfzkj.com/introduce/>

- [23] "Activated Carbon Technologies - Activated Carbon Technologies." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://actcarb.group/>
- [24] "Global activated carbon producer NORIT - Purity for Life." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://norit.com/>
- [25] "Activated Carbon Manufacturing Company In India | Kalpaka Chemicals." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.kalpachemicals.com/>
- [26] "Kegunaan Cangkang Sawit & Studi Kasus (2025)." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://palmoilina.asia/sawit-hub/kegunaan-cangkang-sawit/>
- [27] "Activated Carbon System Requirements." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://feeco.com/activated-carbon-system-requirements/>
- [28] "Capacity Utilization – A Simple Guide." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.mrpeasy.com/blog/capacity-utilization/>
- [29] A. M. Alhaji, E. S. Almeida, C. R. Carneiro, C. A. S. da Silva, S. Monteiro, and J. S. dos R. Coimbra, "Palm Oil (*Elaeis guineensis*): A Journey through Sustainability, Processing, and Utilization," *Foods*, vol. 13, no. 17, p. 2814, Sep. 2024, doi: 10.3390/FOODS13172814.
- [30] "Clean technology for the crude palm oil industry in Thailand." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/40113064_Clean_technology_for_the_crude_palm_oil_industry_in_Thailand
- [31] M. J. Chin, P. E. Poh, B. T. Tey, E. S. Chan, and K. L. Chin, "Biogas from palm oil mill effluent (POME): Opportunities and challenges from Malaysia's perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, pp. 717–726, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.008>.
- [32] R. N. Yanti, "Pemanfaatan Limbah Perkebunan Kelapa Sawit Sebagai Sumber Energi Terbarukan," *Dinamika Lingkungan Indonesia*, vol. 10, no. 1, p. 7, Jan. 2023, doi: 10.31258/dli.10.1.p.7-11.
- [33] E. Baffour-Awuah, S. A. Akinlabi, T. C. Jen, S. Hassan, I. P. Okokpujie, and F. Ishola, "Characteristics of Palm Kernel Shell and Palm Kernel Shell-Polymer Composites: A Review," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1107, no. 1, p. 012090, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1107/1/012090.
- [34] P. Teknologi Lingkungan, B. Pengkajian dan Penerapan Teknologi Gedung, K. Puspipetek Serpong, and T. Selatan, "Potensi Selulosa dari Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Bahan Baku Bioplastik Ramah Lingkungan Cellulose Potential of Empty Fruit Bunches Waste as The Raw Material of Bioplastics Environmentally Friendly DIAN PURWITASARI DEWANTI," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 19, no. 1, 2018.

- [35] Y. Meisrilestari, R. Khomaini, and H. Wijayanti, "PEMBUATAN ARANG AKTIF DARI CANGKANG KELAPA SAWIT DENGAN AKTIVASI SECARA FISIKA, KIMIA DAN FISIKA-KIMIA," vol. 2, no. 1, 2013.
- [36] A. Saragih and N. Santhiarsa, "Karakterisasi Karbon Aktif Tempurung Kelapa dengan Variasi Konsentrasi Aktivator Terhadap Adsorpsi Timbal," 2020.
- [37] D. E. Rahayu and W. Hadi, "KARAKTERISTIK ADSORBEN KARBON AKTIF DARI LIMBAH PADAT KELAPA SAWIT (REVIEW) CHARACTERISTICS OF ACTIVATED CARBON ADSORBENT FROM OIL PALM SOLID WASTE (REVIEW)."
- [38] D. Tani, "Pembuatan dan Karakterisasi Karbon Aktif," *Pembuatan dan Karakterisasi Karbon Aktif*, p. Penerbit NEM, 2023.
- [39] P. dan Kegunaan Arang Aktif Mody Lempang, P. DAN KEGUNAAN ARANG AKTIF Mody Lempang, B. Penelitian Kehutanan Makassar Jl Perintis Kemerdekaan Km, and S. Selatan, "Pembuatan dan Kegunaan Arang Aktif," *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, vol. 11, no. 2, pp. 65–80, 2014, doi: 10.20886/BULEBONI.5041.
- [40] K. Ridhuan and J. Suranto, "PERBANDINGAN PEMBAKARAN PIROLISIS DAN KARBONISASI PADA BIOMASSA KULIT DURIAN TERHADAP NILAI KALORI," *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, vol. 5, no. 1, Sep. 2017, doi: 10.24127/TRB.V5I1.119.
- [41] R. Sudrajat and S. Soleh, "Petunjuk teknis pembuatan arang aktif," *Bogor: Puslitbang Hutan*, 1994.
- [42] T. Y. A. Fahmy, Y. Fahmy, F. Mobarak, M. El-Sakhawy, and R. E. Abou-Zeid, "Biomass pyrolysis: past, present, and future," *Environ Dev Sustain*, vol. 22, no. 1, pp. 17–32, Jan. 2020, doi: 10.1007/S10668-018-0200-5/METRICS.
- [43] S. H. Kong, S. K. Loh, R. T. Bachmann, S. A. Rahim, and J. Salimon, "Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 729–739, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.107.
- [44] M. K. B. Gratuito, T. Panyathanmaporn, R. A. Chumnanklang, N. Sirinuntawittaya, and A. Dutta, "Production of activated carbon from coconut shell: Optimization using response surface methodology," *Bioresour Technol*, vol. 99, no. 11, pp. 4887–4895, Jul. 2008, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2007.09.042.
- [45] I. MONIKA and S. SUPRPTO, "PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON FROM SUBBITUMINOUS COAL USING ROTARY KILN AND CYCLONE BURNER," *Indonesian Mining Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 30–37, 2011, doi: 10.30556/IMJ.VOL14.NO1.2011.506.
- [46] J. M. Illingworth, B. Rand, and P. T. Williams, "Understanding the mechanism of two-step, pyrolysis-alkali chemical activation of fibrous biomass for the

- production of activated carbon fibre matting,” *Fuel Processing Technology*, vol. 235, p. 107348, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.FUPROC.2022.107348.
- [47] H. Yi, K. Nakabayashi, S. H. Yoon, and J. Miyawaki, “Pressurized physical activation: A simple production method for activated carbon with a highly developed pore structure,” *Carbon N Y*, vol. 183, pp. 735–742, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.CARBON.2021.07.061.
- [48] F. Rodríguez-Reinoso and A. Sepúlveda-Escribano, “POROUS CARBONS IN ADSORPTION AND CATALYSIS,” *Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials*, pp. 309–355, 2001, doi: 10.1016/B978-012513910-6/50066-9.
- [49] P. Feng, J. Li, H. Wang, and Z. Xu, “Biomass-based activated carbon and activators: Preparation of activated carbon from corncob by chemical activation with biomass pyrolysis liquids,” *ACS Omega*, vol. 5, no. 37, pp. 24064–24072, Sep. 2020, doi: 10.1021/ACSOMEGA.0C03494/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AO0C03494_M001.GIF.
- [50] E. Ranzi *et al.*, “Chemical kinetics of biomass pyrolysis,” *Energy and Fuels*, vol. 22, no. 6, pp. 4292–4300, Nov. 2008, doi: 10.1021/ef800551t.
- [51] G. E. Harimisa, N. W. C. Jusoh, L. S. Tan, K. Shameli, N. A. Ghafar, and A. Masudi, “Synthesis of potassium hydroxide-treated activated carbon via one-step activation method,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, Apr. 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2259/1/012009.
- [52] Z. Li, X. Gao, Q. Xu, W. Tian, R. Wang, and J. Zhang, “(12) United States Patent,” 2009.
- [53] U. H. Patent O X, “itsPO4/koh-Activated CARBON H3PO4-ACTIVATED CARBON 1. PRODUCTION OF HIGHLY MICROPOROUS ACTIVATED CARBON PRODUCTS BACKGROUND OF THE INVENTION,” 1995.
- [54] Z. Yong and H. Bu-Xing Group, “The Kinetic Parameters of Carbonaceous Materials Activated with Potassium Hydroxide.”
- [55] K. Słowiecka, P. Bartocci, and F. Fantozzi, “Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis,” *Appl Energy*, vol. 97, pp. 491–497, Sep. 2012, doi: 10.1016/J.APENERGY.2011.12.056.
- [56] D. R. Lide, M. Eleanor Lide David Alston Lide, and J. Grace Eileen Lide David Austell Whitcomb Kate Elizabeth Whitcomb, “CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th Edition, 2003-2004,” 2003.
- [57] O. V. Voitkevich, G. J. Kabo, A. V. Blokhin, Y. U. Paulechka, and M. V. Shishonok, “Thermodynamic properties of plant biomass components. Heat capacity, combustion energy, and gasification equilibria of lignin,” *J Chem Eng Data*, vol. 57, no. 7, pp. 1903–1909, Jul. 2012, doi: 10.1021/JE2012814/SUPPL_FILE/JE2012814_SI_001.PDF.

- [58] Z. Chaula *et al.*, "Non-Isothermal Degradation and Thermodynamic Properties of Pine Sawdust," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 9, no. 12, pp. 272–284, Dec. 2018, doi: 10.4236/SGRE.2018.912017.
- [59] A. V. Blokhin *et al.*, "Thermodynamic properties of plant biomass components. Heat capacity, combustion energy, and gasification equilibria of cellulose," *J Chem Eng Data*, vol. 56, no. 9, pp. 3523–3531, Sep. 2011, doi: 10.1021/JE200270T/SUPPL_FILE/JE200270T_SI_001.PDF.
- [60] J. M. . Smith, H. C. . Van Ness, M. M. . Abbott, and M. T. . Swihart, *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. McGraw-Hill Education, 2018.
- [61] "ATKINS' PHYSICAL CHEMISTRY."
- [62] A. Lancia, D. Musmarra, and M. Prisciandaro, "Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Fifth Edition," 2012.
- [63] "Arang Aktif - PubChem." Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Activated-Charcoal#section=Nonfire-Spill-Response>
- [64] P. Ninduangdee, V. I. Kuprianov, E. Y. Cha, R. Kaewrath, P. Youngyuen, and W. Atthawethworawuth, "Thermogravimetric Studies of Oil Palm Empty Fruit Bunch and Palm Kernel Shell: TG/DTG Analysis and Modeling," *Energy Procedia*, vol. 79, pp. 453–458, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.11.518.
- [65] J. Waluyo, I. G. B. N. Makertihartha, H. Susanto, and I. Makertihartha, "Pyrolysis with intermediate heating rate of palm kernel shells: Effect temperature and catalyst on product distribution ," vol. 56, p. 56, 2023, doi: 10.1063/1.5042882.
- [66] R. H. Perry and D. W. Green, "Perry's Chemical Engineers' Handbook."
- [67] "Air | H₂O | CID 962 - PubChem." Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Water>
- [68] "Kalium Hidroksida | KOH | CID 14797 - PubChem." Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Potassium-Hydroxide#section=Health-Hazards>
- [69] T. Yang and A. C. Lua, "Characteristics of activated carbons prepared from pistachio-nut shells by physical activation," *J Colloid Interface Sci*, vol. 267, no. 2, pp. 408–417, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00689-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00689-1).
- [70] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, and F. J. Doyle III, "Process Dynamics and Control Fourth Edition."
- [71] D. M. . Considine and G. D. . Considine, "Process instruments and controls handbook," 19881985.

- [72] A. D. Hutabarat, H. Wirianata, and B. Yuniasih, "Kajian Peremajaan Sawit Rakyat di Kecamatan Ngabang Kabupaten Landak Kalimantan Barat," *AGROFORETECH*, vol. 2, no. 4, pp. 1687–1693, Dec. 2024, [Online]. Available: <https://jurnal.instiperjogja.ac.id/index.php/JOM/article/view/1580>
- [73] "Pembangunan Infrastruktur Jalan dan Jembatan Kabupaten Landak Tahun 2022 – Landaknews.com." Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: <https://landaknews.id/2022/03/18/pembangunan-infrastruktur-jalan-dan-jembatan-kabupaten-landak-tahun-2022/?utm>
- [74] "BERANDA | Kecamatan Ngabang." Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: https://kecamatanngabang.landakkab.go.id/?utm5https%3A%2F%2Fweb-api_bps_go_id%2Fdownload_php%3Ff=siLoJXjwSj%20%20s5HdQ2xZPINRSzdpY3ZGTm5KUWZHQ1ViWVExVGpJTDJRQ0VWc0VuWld5UHBXVmRCMk1FUVIBeWV0QkFHRnBqZDRUMTBpdnd1N09RdHBMd1Y4MjcyUUtJYzRXTXpDQzhCODhwbysxcldUeS94NzZjb0o3SW01Y2JBYUQ2aVBZNDJLRzZRTWtIRk1qTnAvejE2dkR5cGM3enRaYVpFRcCtCNVJSRWtnYTVKZ3Jic1ljemxyL0xpckp1ZzF3S1BuZU5zdHFGc1hOUU9ZSDhQR1NKd3pHQVdodUQ0QVpMNzNySStWQ1ovc2hvU2tvajk2dnAvQlZjbGxnN1FXZnlrN0tFZ3JCT2ITTHRfaHREZmJ1TjRObG1LdGwrQ2dGempRPT0%3D&utm
- [75] "statistik-penggunaan-lahan-kabupaten-landak-2017".
- [76] "Perda-No-4-2015-Tentang-Kawasan-Industri-Mandor".
- [77] "Izin Usaha Industri (IUI)." Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: <https://dpmptsptk.landakkab.go.id/izin/detail/izin-usaha-industri--iui?utm>
- [78] M. S. Peters and K. D. Timmerhaus, "McGraw-Hill Chemical Engineering Series Editorial Advisory Board Building the Literature of a Profession."
- [79] R. K. Sinnott, "CHEMICAL ENGINEERING VOLUME 6."
- [80] WHO, "Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda," *World Health Organization*, pp. 1–614, 2022, Accessed: May 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
- [81] "Chemical-Process-Equipment-Selection-and-Design-by-Stanley-M.-Walas".
- [82] "How We Use Water | US EPA." Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/watersense/how-we-use-water>
- [83] "EKONOMI TEKNIK WENNY DIAH RUSANTI, SE., MT. FAKULTAS TEKNIK KIMIA UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH JAKARTA 2020".
- [84] "Matches' 275 Equipment Cost Estimates." Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.matche.com/equipcost/Default.html>
- [85] "Chemical Engineering Cost Estimation - Robert Sancier Aries, Robert D. Newton - Google Buku." Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available:

https://books.google.co.id/books/about/Chemical_Engineering_Cost_Estimation.html?hl=id&id=6fKmb-KJ5NwC&redir_esc=y





Spesifikasi umum	
Nama	<i>Rotary Kiln</i>
Kode	R-102
Tipe	<i>Horizontal Rotating Cylinder</i>
Fase Feed	Padat
Contacting Method	<i>Indirect Fired</i>
Air Flow Option	<i>Cross Flow</i>
Fungsi	Mengaktivasi Arang Menjadi Karbon Aktif Dengan Bantuan Katalis KOH
Kondisi Operasi	
Laju Alir	11485,7707 kg/jam
Suhu feed	500 °C
Suhu produk	927 °C
Suhu masuk udara pemanas	1100 °C
Suhu keluar udara pemanas	783,3271 °C
Kecepatan udara panas	20m/s
Tekanan	1,4979 atm
Aspek Perancangan	
Jenis Reaktor	<i>Indirect Heat Rotary Kiln</i>
Bahan Konstruksi Reaktor	<i>Alloy C-276 (15Cr-54Ni-16Mo; UNS N10276)</i>
Dimensi Reaktor	D = 2,1335 m L = 21,3350 m A = 3,5732 m ²
Tebal <i>Shell</i>	0,0108 m
<i>Residence Time</i>	2,1322 menit
<i>Seal dan Refractory</i>	<i>Castable Refractory</i>
<i>Heat Transfer</i>	44,6735 kcal/m ² hr °C
Tebal <i>Refractory</i>	182,4521 mm
Jumlah <i>Flight</i>	0,2133 m
Suhu Keluar Udara Pemanas	783,3271 °C
Daya yang Dibutuhkan	23.9 kW/jam

Spesifikasi umum	
Nama	Rotary Kiln
Kode	R-101
Tipe	<i>Horizontal Rotating Cylinder</i>
Fase Feed	Padat
Contacting Method	<i>Indirect Fired</i>
Air Flow Option	<i>Cross Flow</i>
Fungsi	Mengkarbonisasi Cangkang Kelapa Sawit Menjadi Arang
Kondisi Operasi	
Laju Alir	6770,0932 kg/jam
Suhu feed	500 °C
Suhu produk	150 °C
Suhu masuk udara pemanas	783,3270982 °C
Suhu keluar udara pemanas	256,4551 °C
Kecepatan udara panas	20 m/s
Tekanan	1,3317 atm
Aspek Perancangan	
Jenis Reaktor	<i>Indirect Heat Rotary Kiln</i>
Bahan Konstruksi Reaktor	<i>SS ASTM-A240 Grade 304</i>
Dimensi Reaktor	D = 1,5239 m L = 18,2871 m A = 1,8230 m ²
Tebal <i>Shell</i>	0,0120 m
<i>Residence Time</i>	2,5586 menit
<i>Seal dan Refractory</i>	<i>Castable Refractory</i>
<i>Heat Transfer</i>	37,6539 kcal/m ² hr °C
Tebal <i>Refractory</i>	150,0372 mm
Jumlah <i>Flight</i>	0,1524 m
Suhu Keluar Udara Pemanas	256,455102 °C
Daya yang Dibutuhkan	10,3 kW/jam

A. Menentukan jenis Reaktor

Jenis reaktor yang dipilih untuk mengaktivasi karbon menjadi karbon aktif adalah indirect heat rotary kiln, dengan pertimbangan sebagai berikut:

- Reaksi berlangsung pada fase padat dengan suhu yang sangat tinggi
- Reaktor bekerja dengan memproses material umpan pada suhu tertentu untuk waktu tertentu
- Mampu mewadahi reaksi yang sangat endotermis dan/atau eksotermis
- Dapat dioperasikan dalam skala besar, efisiensi tinggi dalam produksi massal dengan kontrol kualitas yang baik

B. Menentukan Bahan Konstruksi Reaktor

Dipilih bahan konstruksi indirect heat rotary kiln adalah alloy C-276 (15Cr-54Ni-16Mo; UNS N10276), yakni paduan dari nikel, kromium dan molybdenum yang didesain khusus untuk suhu tinggi dan tahan korosi. Hal tersebut didasarkan pada beberapa aspek berikut:

- alloy C-276 memiliki strength dan stability pada suhu diatas 1000 °C
- tahan terhadap korosi gas-gas asam seperti SO₂ dan NO_x yang dihasilkan dari pembakaran batu bara
- memiliki konduktivitas thermal yang cukup baik, walaupun tidak sebaik logam murni

C. Menghitung Dimensi Reaktor

1. Menghitung Volume Reaktor

Persamaan untuk menghitung volume reaktor rotary kiln dapat didekati dengan perancangan reaktor alir pipa (plug flow reactor) menggunakan persamaan perancangan :

$$F_{A0} \frac{dx}{dv} = -r_a \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$F_{A0} \cdot dx = -r_a \cdot dV$$

$$dV = \frac{F_{A0} \cdot dx}{-r_A}$$

$$\int_0^V dV = F_{A0} \cdot \int_0^x \frac{dx}{-r_A}$$

$$V = F_{A0} \cdot \int_0^x \frac{dx}{-r_A}$$

$$-r_a = k \cdot C_A \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$V = F_{A0} \cdot \int_0^x \frac{dx}{k \cdot C_A}$$

$$C_A = C_{A0} \cdot (1 - x) \dots \dots \dots (3)$$

$$V = F_{A0} \cdot \int_0^x \frac{dx}{k \cdot C_{A0}(1 - x)}$$

$$F_A = C_A \cdot V \dots \dots \dots (4)$$

$$F_{A0} = C_{A0} \cdot V_0$$

$$V = C_{A0} \cdot V_0 \cdot \int_0^x \frac{dx}{k \cdot C_{A0}(1 - x)}$$

$$V = \frac{C_{A0} \cdot V_0}{k \cdot C_{A0}} \int_0^x \frac{dx}{(1 - x)}$$

$$V = \frac{V_0}{k} \int_0^x \frac{dx}{(1 - x)}$$

$$V = \frac{V_0}{k} \left[-\ln(1 - x) \right]_0^x$$

$$V = \frac{V_0}{k} \left(\left[-\ln(1 - x) \right] - \left[-\ln(1 - 0) \right] \right)$$

$$V = \frac{V_0}{k} \left(\left[-\ln(1 - x) \right] - [0] \right)$$

$$V = \frac{V_0}{k} \left(\left[-\ln(1 - x) \right] \right)$$

$$V = \frac{V_0}{k} \ln(1 - x)$$

V = Volume Reaktor

V0 = Laju Alir Masuk

K = Konstanta laju reaksi

X = Konversi

$$k = A \cdot e^{\left(\frac{-EA}{RT}\right)}$$

Pada persamaan diatas, diambil orde reaksi untuk proses aktivasi karbon aktif dengan katalis KOH adalah orde reaksi 1, dengan reaksi non elementer.

Alasan memilih reaksi non elementer :

- Kompleksitas Reaksi: Reaksi aktivasi karbon menggunakan KOH melibatkan banyak langkah reaksi, termasuk adsorpsi KOH pada permukaan karbon, reaksi kimia di permukaan, serta desorpsi produk reaksi. Proses ini melibatkan berbagai intermediet dan jalur reaksi, yang biasanya menunjukkan bahwa reaksi tersebut bukanlah reaksi elementer.
- Pembentukan Intermediet: Dalam reaksi non-elementer, sering ada tahap pembentukan intermediet, seperti radikal bebas atau kompleks sementara, yang kemudian berlanjut ke tahap akhir reaksi. Dalam kasus aktivasi karbon, kemungkinan ada intermediet yang terbentuk sebelum menghasilkan produk akhir seperti K, H₂, dan K₂CO₃.

$$V = \frac{V_0}{k} \ln(1 - x)$$

Dimana : V = Volume reaktor [L]

V₀ = Laju alir volumetric feed [L/jam]

K = Konstanta Kecepatan reaksi [s⁻¹](orde 1)

x = Konversi

1.1 Menghitung laju alir volumetris feed

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Dimana : m = laju alir massa feed [kg/jam]

ρ = densitas feed [kg/L]

densitas *feed* pada suhu tertentu dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\rho = A \cdot B^{-\left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^n}$$

Dimana : ρ = kepadatan cairan jenuh [g/ml]

A, B, dan n = Koefisien regresi untuk senyawa kimia
T = Suhu [K]
T_c = Suhu Kritis [K]

Komponen	Rumus Kimia	A	B	n	T (K)	T _c (K)	ρ (gr/ml)	ρ (kg/L)
Char	C	0,31	0,10	0,29	1198,82	6810,00	2,78	2,78
Potasium Hydroxide	KOH	0,31	0,15	0,29	1198,82	2605,86	1,48	1,48
Water	H ₂ O	0,35	0,27	0,29	1198,82	647,13	1,20	1,20

Komponen	Laju Alir Feed	Fraksi Berat (x _i)	Densitas (ρ) (kg/L)	x _i . ρ (kg/L)
Char	1640,03	0,14	2,78	0,40
Potasium Hydroxide	3280,05	0,29	1,48	0,42
Water	6565,69	0,57	1,20	0,68
Total	11485,77	1,00		1,50

Densitas Campuran = 1,5030 kg/L
Laju Alir Feed (m) = 11485,7707
Faktor Keamanan = 20%
m = 13782,9248

$$V_0 = \frac{m}{\rho}$$

V₀ = 9170,3666 L/jam
= 152,8394 L/jam

1.2 Menghitung Nilai Konstanta Kecepatan Reaksi (k)

Nilai k dapat ditentukan berdasarkan persamaan Arrhenius berikut:

$$k = A \cdot e^{-E_a/RT}$$

Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Zou & Han, 2000), diperoleh data sebagai berikut:

A = 531,9 mg/g min
= 0,5319 g/g min (atau 1/min)
E_a = 36,51 kJ/mol
= 36510 J/mol
R = 8,314 J/mol.K
T = 1199,82 K

sehingga:

$$\begin{aligned}k &= 0,0137 \quad 1/\text{min} \\ &= 0,0137 \quad \text{min}^{-1}\end{aligned}$$

1.3 Menentukan Nilai Konversi

Konversi reaksi untuk KOH sangat tinggi, apalagi jika Char disediakan berlebih. Konversi yang dapat dicapai adalah 99%

$$x = 99\%$$

Volume Reaktor :

$$V = \frac{V_0}{k} \ln(1 - x)$$

$$\begin{aligned}V &= 51426,3726 \text{ L} \\ &= 51,4264 \text{ m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Safety Factor} &= 10\% \\ V &= 56569,0099 \text{ L} \\ &= 56,5690 \text{ m}^3\end{aligned}$$

2. Menghitung Panjang dan Diameter Reaktor

Bentuk reaktor diasumsikan berbentuk silinder dengan arah horizontal, sehingga panjang reaktor sama dengan tinggi silinder.

Rumus Volume Silinder :

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 T$$

Dimana T = Panjang Reaktor (L)

$$\begin{aligned}\text{Rasio } L/D &= 6 \Leftrightarrow 10 \\ \text{Rasio yang dipilih} &= 10\end{aligned}$$

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 L$$

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 (10D)$$

$$54,06 = \frac{1}{4} (3,14) (10D)$$

$$D^3 = 7,2062$$

$$D = 1,9315 \text{ m}$$

$$L = 10 D$$

$$= 19,3154 \text{ m}$$

Ukuran yang ada di industry :

SOLIDS-DRYING EQUIPMENT 12-59						
TABLE 12-20 Typical Rotary-Kiln Installations*						
Size, diam. × length	Usual No. of supports	Range of motor hp. to operate†	Nominal 24-hr. capacities‡			
			Portland cement, 376-lb. bbl.		Lime, net tons	
			Dry process	Wet process	Lime sludge	Limestone
5 × 80 ft.	2	5–7.5	140	100	10	16
6 × 70 ft.	2	7.5–15	190	135	15	24
7 × 70 ft.	2	15–20	275	200	20	35
5 ft. 6 in. × 180 ft.	4	15–20	285	250	30	45
7 × 120 ft.	2	15–25	475	340	35	55
7 ft. 6 in. × 125 ft.	2	20–30	575	415	40	70
6 × 220 ft.	4	20–30	420	375	45	65
8 × 140 ft.	2	25–30	750	540	55	90
9 × 160 ft.	2	30–50	1100	800	80	130
8 ft. 6 in. × 185 ft.	4	30–50	1125	810	80	135
10 × 150 ft.	2	40–75	1300	950	—	145
10 × 175 ft.	2	50–75	1500	1100	—	155
8 × 300 ft.	5	50–75	1150	1000	110	160
7 ft. 6 in. × 8 ft. 6 in. × 320 ft.	5	50–75	1175	1020	115	165
7 ft. 6 in. × 10 ft. × 8 ft. 6 in. × 300 ft.	5	50–75	1175	1020	—	—
10 × 11 × 175 ft.	2	50–75	1650	1200	120	180
10 ft. 6 in. × 185 ft.	2	50–75	1800	1300	130	190
11 × 175 ft.	2	60–100	1850	1375	—	205
8 ft. 6 in. × 10 ft. × 8 ft. 6 in. × 300 ft.	5	50–75	1400	1200	—	—
8 × 10 × 300 ft.	5	50–75	1425	1225	140	200
9 ft. 6 in. × 265 ft.	4	60–100	1500	1300	150	215
9 × 10 ft. 6 in. × 9 ft. × 325 ft.	5	60–100	1700	1500	—	—
10 ft. 6 in. × 250 ft.	4	60–100	1750	1525	175	240
9 ft. 6 in. × 11 ft. × 9 ft. 6 in. × 300 ft.	5	60–100	1800	1550	—	—
10 × 300 ft.	5	75–125	1900	1650	190	250
9 ft. 6 in. × 11 ft. × 9 ft. 6 in. × 375 ft.	6	75–125	2025	1800	—	—
11 × 300 ft.	5	75–125	2400	2100	225	300
11 ft. 6 in. × 300 ft.	4	100–150	2600	2250	240	320
10 ft. 6 in. × 375 ft.	5	100–150	2700	2400	250	325
11 ft. 3 in. × 360 ft.	5	125–175	2900	2500	275	350
11 ft. 6 in. × 475 ft.	7	150–250	4000	3500	375	450
12 × 500 ft.	8	200–300	4600	4000	425	500

$$D = 1,9315 \text{ m}$$

$$= 6,3374 \text{ ft}$$

SsssadasxzcvcVDSVSDfdfsfs

$$L = 19,3154 \text{ m}$$

$$= 63,3737 \text{ ft}$$

Dipilih ukuran 7 x 70 ft

$$D = 2,1335 \text{ m}$$

$$L = 21,335 \text{ m}$$

Luas Penampang Reaktor :

$$A = \frac{1}{4}\pi D^2$$

$$A = 3,5732 \text{ m}^2$$

D. Menghitung Tebal Shell

Tebal *Shell* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan untuk tipe *Circumferential Strees* :

$$t = \frac{p \cdot d}{2 \cdot f \cdot E} + c$$

Dimana

- t = *thickness of shell* [in]
- P = *internal pressure* [psi]
- d = *inside diameter* [in]
- f = *allowable working stress* [psi]
- E = *joint efficiency*
- c = *corrosion allowance* [in]

1. Menentukan Nilai f

Bahan yang dipilih adalah *alloy C-276* dengan (UNS N10276) yang merupakan campuran nikel, kromium dan molybdenum. *Alloy C-276* memiliki nilai f sebagai berikut :

Kode	Komposisi	F pada 100°f	F pada 500°f
		(psi)	(psi)
UNS N10276	15%Cr	25000	22500
	54% Ni		
	16% Mo		

Karena nilai f merupakan fungsi suhu, maka perlu dicari nilai f untuk suhu operasi (925.67°C) menggunakan interpolasi.

$$y = y_1 + (x - x_1) + \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}$$

Dimana :

- y = nilai interpolasi
- x = variabel bebas
- x₁ , y₁ = nilai fungsi pada satu titik
- x₂ , y₂ = nilai fungsi pada titik lainnya

$$y = 25000 + (x - 100) + \frac{(22500 - 25000)}{(500 - 100)}$$

$$y = 15012,5 \text{ psi}$$

Sehingga $f = 15012,5$ psi

2. Menentukan Nilai E

Tipe Joint yang digunakan untuk reaktor rotary kiln adalah Double-welded butt joint dengan pertimbangan sebagai berikut:

- Reaktor beroperasi pada suhu ekstrim sehingga memerlukan sambungan yang mampu menahan fluktuasi suhu
- Double-welded butt joint memberikan kekuatan yang tinggi dan mencegah kebocoran dengan baik dibanding tipe joint lainnya. Sangat cocok untuk jangka panjang dan lingkungan yang buruk
- Tipe sambungan ini memastikan distribusi stress yang merata, mampu mengurangi resiko konsentrasi stress yang dapat memicu retakan atau kegagalan struktural

E = 80%

3. Menentukan Nilai c

Untukantisipasi terjadinya korosi pada bahan material, ditambahkan corrotion allowance bernilai 0.35 in.

c = 0,35 in

4. Menentukan Nilai p

$$p = \rho + \frac{(H - 1)}{144}$$

Dimana p = *internal pressure* [psi]

ρ = densitas [lb/ft]

H = *height of feed* [ft]

$\rho = 1,50$ kg/L

= lb/ft³

4.1 Mencari nilai H

$$Volume\ Feed = \frac{massa\ feed}{\rho\ feed}$$

$$\text{Massa feed} = 11485,7707 \text{ kg}$$

$$\rho_{\text{feed}} = 1,50 \text{ kg.L}$$

$$\begin{aligned}\text{Volume feed} &= 7641,9722 \text{ L} \\ &= 7,6420 \text{ m}^3\end{aligned}$$

$$V = A \cdot H$$

$$H = \frac{V}{A}$$

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2$$

$$A = 3,7994 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned}H &= 2,0114 \text{ m} \\ &= 6,5993 \text{ ft}\end{aligned}$$

$$p = \rho + \frac{(H - 1)}{144}$$

$$p = 3,6484 \text{ psi}$$

$$\begin{aligned}P_{\text{operasi}} &= 1 \text{ atm} \\ &= 14,696 \text{ psi}\end{aligned}$$

$$\text{Safety factor} = 20\%$$

$$P_{\text{desain}} = (p + P_{\text{operasi}}) + \text{safety factor}$$

$$\begin{aligned}P_{\text{desain}} &= 22,0133 \text{ psi} \\ &= 1,4979 \text{ atm}\end{aligned}$$

5. Menentukan nilai d

$$\begin{aligned}d &= 2,1335 \text{ m} \\ &= 83,9957 \text{ in}\end{aligned}$$

$$t = \frac{p \cdot d}{2 \cdot f \cdot E} + c$$

$$t = 0,4270 \text{ in}$$

$$= 0,0108 \text{ m}$$

E. Menghitung *Residence Time*

$$\tau = 1 + \frac{L}{60 \pi n D \tan v} \cdot h$$

Dimana $n = \text{rpm}$

$D = \text{diameter [m]}$

$L = \text{length [m]}$

$v = \text{derajat kemiringan terhadap horizontal}$

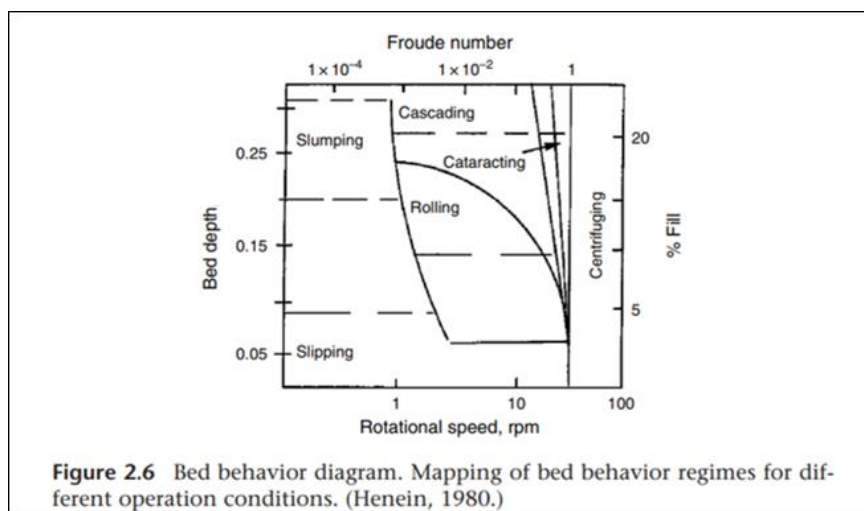
$D = 2,1335 \text{ m}$

$L = 21,3350 \text{ m}$

$v = 33^\circ$

$\tan v = 0,6494$

Nilai n dapat ditentukan dengan bantuan *bed behavior diagram*



1. Menentukan *Froude Number*

$$Fr = \omega^2 + \frac{R}{g}$$

Dimana ω = Kecepatan sudut [rad/s]

R = jari-jari dalam kiln [m]

g = Percepatan gravitasi [0,8 m/s²]

$$\omega = 0,279 \text{ rad/s}$$

$$R = 1,0667 \text{ m}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$Fr = 0,0085$$

2. Menentukan %Fill

$$\%Fill = \frac{Volume \text{ feed}}{Volume \text{ Total}} \times 100\%$$

$$Volume \text{ Feed} = 7,6420$$

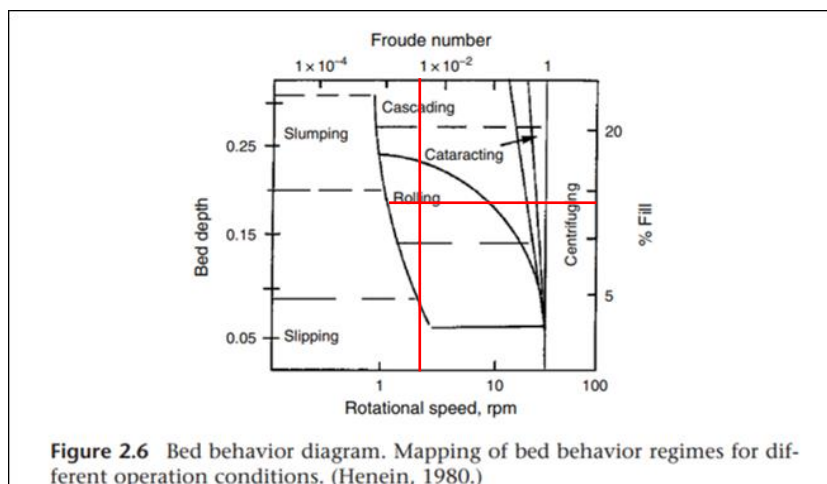
$$Volume \text{ Total} = 56,5690$$

$$\%fill = 14\%$$

3. Menentukan *Bed Depth*

$$Bed \text{ Depth} = 2,0114 \text{ m}$$

$$= 0,2011 \text{ dam}$$



Berdasarkan grafik diatas, diperoleh nilai Rotational speed (n) berkisar antara 2-4 rpm. Dipilih nilai 2.3 rpm

$$n = 2,3 \text{ rpm}$$

$$\tau = 1 + \frac{L}{60 \pi n D \tan \nu} \cdot h$$

$$\tau = 0,0355 \text{ jam}$$

$$= 2,1322 \text{ menit}$$

F. Menentukan Seal dan Refractory

1. Pemilihan Seal

Seal bertujuan untuk mencegah udara luar masuk ke dalam kiln dan mencegah gas atau partikel dari dalam kiln keluar ke lingkungan. Hal ini sangat penting untuk menjaga efisiensi panas dan kualitas atmosfer di dalam rotary kiln. Dipilih seal tipe leaf seal dengan pertimbangan sebagai berikut:

- Fleksibilitas tipe leaf seal sangat baik, memungkinkan untuk mengikuti gerakan rotary kiln dan menjaga kiln dengan rapat.
- Memiliki daya tahan yang tinggi terhadap keausan dan kerusakan mekanis
- Harga relatif lebih murah jika dibandingkan jenis seal lainnya (seperti graphith block seal, labyrinth seal, pneumatic seal dan bellows seal)

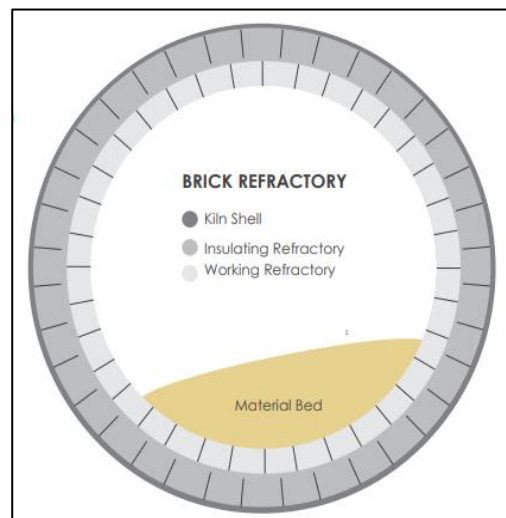
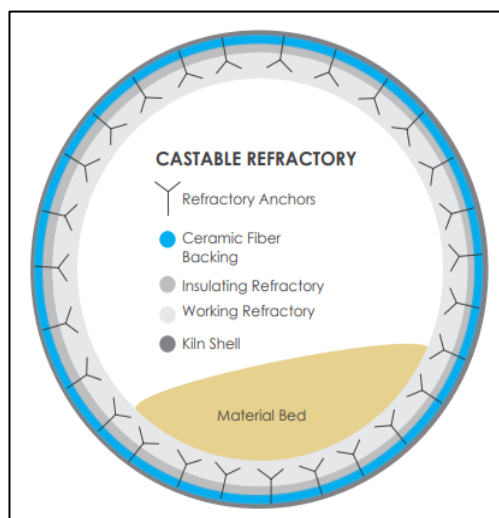


2. Pemilihan Refractory

Refractory merupakan salah satu komponen yang sangat penting di *rotary kiln*, berfungsi menjaga retensi panas di dalam kiln. Umumnya, ada 2 jenis refractory pada *rotary kiln*, yaitu *castable refractory* dan *brick refractory*.

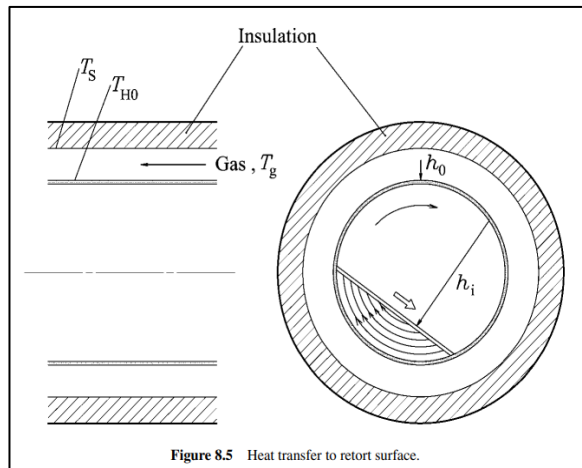
	Jenis <i>Refractory</i>	
	<i>Castable</i>	Brick
Kelebihan	Pembuatan mudah, dapat disesuaikan dengan kiln. Bahan material tersedia dalam bentuk bubuk, bisa diolah di tempat.	Kualitas lebih baik dibanding castable, tidak memerlukan anchors/jangkar.
	Mudah ditambah/diperbaiki jika terjadi masalah. Waktu penghentia dapat dibuat seminimal mungkin, karena area yang bermasalah dapat dipotong dan material baru dapat dituangkan ke rongga tersebut.	Tahan aus sehingga cocok untuk bahan yang bersifat abrasif.
Kelemahan	Rentan terhadap proses pemasangan. Jika dipasang oleh petugas yang ahli, kualitasnya hampir sama dengan brick. Namun, jika pemasangannya salah, kualitasnya sanagt buruk.	Biaya pemasangan lebih mahal dan maintenance lebih rumit. Ketika ada bagian batu bata yang rusak, bagian lain akan terpengaruh karena tiap batu bata saling bergantung dan saling menekan dengan yang lainnya.

Jenis yang dipilih : *Castable Refractory*



G. Menghitung *Heat Transfer*

Karena *rotary kiln* menggunakan metode *indirect fired* sebagai *contacting method*, maka perpindahan panas yang terjadi memiliki skema yang sedikit berbeda dari *direct fired*. Berikut adalah ilustrasi perpindahan panas dari aliran gas panas menuju kiln.



Gas panas yang digunakan berasal dari pembakaran batu bara jenis Bituminus (C 85% dan H 5%)

Asumsi kondisi :

diameter pipa gas / <i>breadth of channels for gas flow</i>	= 3 cm
<i>partial pressure</i> dari CO ₂	= 0,691 atm
<i>partial pressure</i> dari H ₂ O	= 0,244 atm
<i>average gas temp.</i> (T _g)	= 1100 °C
<i>average solid temp.</i> (T _c)	= 927 °C
<i>average gas velocity</i>	= 20 m/s

1. Menentukan Emissivity Gas

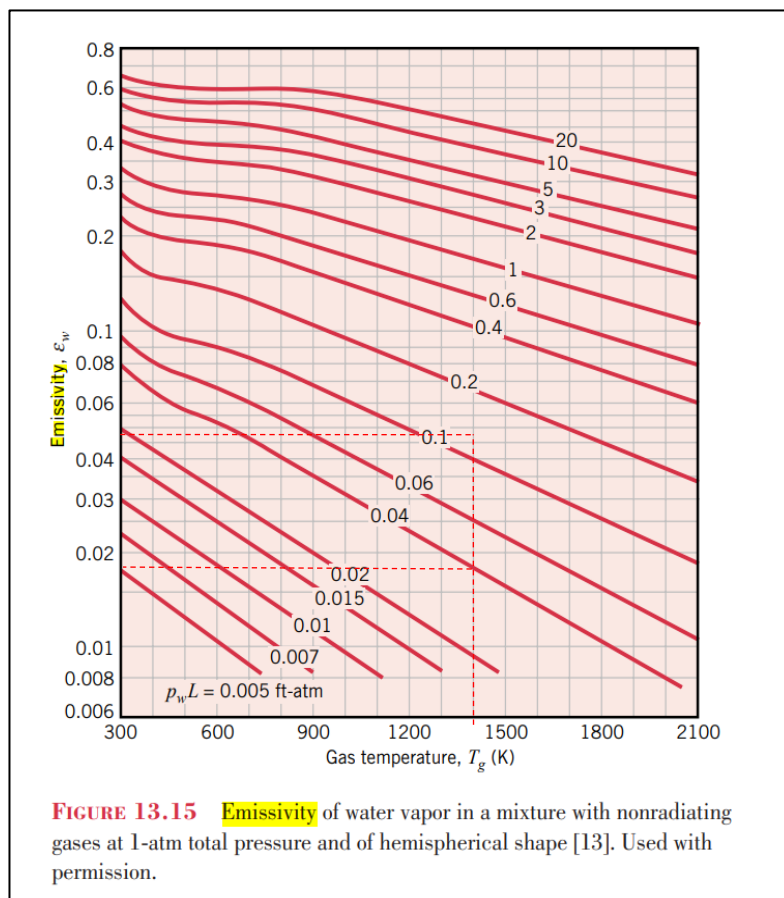
Emissivity gas dapat dihitung berdasarkan prosedur Incropera (2007) sebagai berikut:

$$l_g = 2 \times \text{breadth of channels for gas flow}$$

Dimana : l_g = *effective thickness of the gas flow*, ft

$$\begin{aligned}
 l_g &= 6 \text{ cm} \\
 &= 0,1969 \text{ ft} \\
 P_{\text{CO}_2} \cdot l_g &= 0,1360 \text{ ft.atm} \\
 P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot l_g &= 0,0480 \text{ ft.atm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{average gas temp. } (T_g) &= 1100 \text{ }^\circ\text{C} \\
 &= 1373,15 \text{ K}
 \end{aligned}$$



Tabel. ??

Berdasarkan table tersebut, diperoleh :

$$E_{\text{CO}_2} = 0,0483$$

$$E_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0169$$

$$\begin{aligned}
 \text{Emissivity gas } (\epsilon_g) &= E_{\text{CO}_2} + E_{\text{H}_2\text{O}} \\
 &= 0,0652
 \end{aligned}$$

2. Menentukan h_{rg}

$$h_{rg} = \frac{\varepsilon_g \varepsilon_H (4,88) \left[\left(\frac{T_g + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{H0} + 273}{100} \right)^4 \right]}{T_g - T_{H0}}$$

Dimana : h_{rg} = *radiant heat transfer coefficient from hot gas, on the basis of inner surface area reactor* [kcal/m² hr °C]

ε_g = *emissivity gas* [---]

ε_H = *emissivity permukaan H* [---]

T_g = *suhu gas* [°C]

T_{H0} = *suhu permukaan H0* [°C]

emissivity permukaan H (ε_H) = 0,76

Sebagai perkiraan awal, kita ambil T_{H0} = 1000 °C, T_s = 950 °C

T_g = 1100 °C

T_{H0} = 1000 °C

h_{rg} = 22,4306 kcal/m² hr °C

3. Menentukan h_c

Conventional heat transfer coeff. (h_c) dapat dihitung menggunakan Dittus-Boelter equation yang dikombinasikan dengan persamaan dasar bilangan Nusselt.

$$N_{U_D} = 0,024 Re_D^{4/5} Pr^n$$

$$N_{U_D} = \frac{h_c l_g}{k}$$

Dimana = N_u = *Nusselt number* [---]

= Re = *Reynolds number* [---]

= Pr = *Prandtl number* [---]

= h_c = *conventional heat transfer coefficient* [kcal/m² hr °C]

= l_g = *characteristic length* [m]

= k = *thermal conductivity* [kcal/m hr °C]

= n = exponent for heating/cooling [---]

Dittus-Boelter equation hanya berlaku untuk sistem dengan ketentuan berikut:

$$\left[\begin{array}{l} Re_D \geq 10000 \\ \frac{L}{D} \geq 10 \end{array} \right]$$

3.1.Mencari Nilai Bilangan Reynolds

$$Re = \frac{\rho v l_g}{\mu}$$

Dimana : ρ = density [gr/cm³]

v = gas velocity [cm/s]

l_g = characteristic length [cm]

μ = viscosity [gr/cm . s]

- Menghitung ρ_{gas}

$$\rho = A . B^{-(1-T/T_c)^n}$$

dimana : A, B, dan n = koefisien regresi untuk senyawa kimia

T = suhu [k]

T_C = suhu kritis [k]

komponen	Rumus Kimia	A	B	n	T (K)	T _c (K)	ρ (gr/ml)	ρ (g/cm ³)	Ref
Carbon Dioxide	CO ₂	0,46	0,26	0,29	1373,15	304,19	0,32	0,0003	Hal 207
Water	H ₂ O	0,35	0,27	0,29	1373,15	647,13	0,13	0,0001	Hal 208

Komponen	Fraksi Mol (x _i)	Densitas (ρ) g/cm ³	x _i . ρ (g/cm ³)
Karbon dioksida	0,7390	0,0003	0,0002
Air	0,2610	0,0001	0,0000
Total	1		0,0003

$$\rho_{\text{gas}} = 2,71\text{E-}04 \text{ g/cm}^3$$

- Menghitung gas velocity

$$v = 20 \text{ m/s}$$

$$= 2000 \text{ cm/s}$$

- Menghitung *characteristic length*

$$l_g = 6 \text{ cm}$$

$$= 0,06 \text{ m}$$

- Menghitung *viscosity* gas

Gunakan Hukum Wilke untuk mencari viscosity dari campuran gas.

$$\mu_{mix} = \sum_i \frac{x_i \mu_i}{x_i + \sum_{j=i}^n (x_j \phi_{ij})}$$

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8 \left[1 + \frac{M_i}{M_j} \right]}}$$

Dimana μ_{mix} = viscosity of mixture gas [gr/cm s]
 x_i = mole fracton of component i [---]
 μ_i = viscosity of component i [gr/cm s]
 x_j = mole fracton of component j [---]
 μ_j = viscosity of component j [gr/cm s]
 ϕ_{ij} = interaction factor of i and j [---]
 M_i = molecular weight i [g/mol]
 M_j = molecular weight j [g/mol]

viscosity senyawa dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\mu = 1.109 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{T}}{\Omega_\mu}$$

Namun, untuk mempermudah, kami menggunakan bantuan dari situs NIST Chemistry Web

$$\mu_{CO_2} = 5,1395E-05 \text{ Pa.s}$$

$$\begin{aligned}
&= 5,1395\text{E-}04 \text{ gr/cm.s} \\
\mu_{\text{H}_2\text{O}} &= 5,1428\text{E-}05 \text{ Pa.s} \\
&= 5,1428\text{E-}04 \text{ gr/cm.s} \\
M_{\text{CO}_2} &= 44,0095 \text{ gr/mol} \\
M_{\text{H}_2\text{O}} &= 18,0153 \text{ gr.mol} \\
\phi_{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}} &= 0,6171 \\
\phi_{\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2} &= 1,5085 \\
\mu_{\text{mix}} &= 3,2355\text{E-}04 \text{ gr/cm.s}
\end{aligned}$$

$$Re = \frac{\rho v l_g}{\mu}$$

$$Re = 10050,9668$$

3.2.Mencari Nilai Bilangan Prandtl

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$

dimana :

- C_p = heat capacity [kJ/mol K]
- μ = viscosity of gas [Pa.s]
- k = thermal conductivity [W/m K]

- Menghitung C_p

$$C_p \text{ CO}_2 = 0,0371 \text{ kJ/mol K}$$

$$C_p \text{ H}_2\text{O} = 0,0336 \text{ kJ/mol K}$$

$$C_{p \text{ mix}} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot C_{p i}$$

$$C_p \text{ mix} = 0,0362 \text{ kJ/mol K}$$

- Menhitung k

thermal conductivity untuk tiap komponen:

$$k = \left(\hat{c}_p + \frac{5}{4} \frac{R}{M} \right) \mu$$

dimana :

- C_p = heat capacity [cal/g-mol K]
- μ = viscosity of gas [gr/cm s]

R = ideal gas constant [cal/mol K]

M = molecular weight [g/mol]

Cp CO ₂	= 8,8671 cal/g-mol K	Cp H ₂ O	= 8,0306cal/g-mol K
μ CO ₂	= 5,1395E-04 gr/cm s μ	H ₂ O	= 5,1428E-04 gr/cm s
R	= 1,987 cal/mol K	R	= 1,987 cal/mol K
M	= 44,0095 gr/mol	M	= 18,0153 gr/mol
k CO ₂	= 0,0046 cal/ cm s K	k H ₂ O	= 0,0042 cal/ cm s K

thermal conductivity gabungan :

$$k_{mix} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{x_{\alpha} k_{\alpha}}{\sum x_{\beta} \phi_{\alpha\beta}}$$

$$\phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_{\alpha}}{\mu_{\beta}} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_{\beta}}{\mu_{\alpha}} \right)^{1/4} \right]^2$$

$$\phi_{CO_2, H_2O} = 6,0964$$

$$\phi_{H_2O, CO_2} = 9,5316$$

$$k_{mix} = 0,2684 \text{ cal/ cm s K}$$

$$k_{mix} = 112,2945 \text{ W/m K}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$

$$Pr = 0,0104$$

- Menentukan *exponent for heating/cooling* (n)

dimana n = 0,4 untuk pemanasan (Ts>Tm) dan untuk pendinginan (Ts<Tm).
Persamaan ini telah dikonfirmasi secara eksperimental untuk rentang kondisi

$$n = 0,4$$

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad \dots (1)$$

$$Nu_D = \frac{h_c l_g}{k} \quad \dots (2)$$

Substitusi pers (2) ke pers (1)

$$\frac{h_c l_g}{k} = 0.023 Re^{4/5} Pr^n$$

$$h_c = 0.023 Re^{4/5} Pr^n \times \frac{k}{l_g}$$

$$h_c = 26,3852 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

4. Menentukan $(h_{rs})_{SH}$

$$(h_{rs})_{SH} = \frac{\epsilon_s(1 - \epsilon_g)\epsilon_H(4,88) \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{H0} + 273}{100} \right)^4 \right]}{T_s - T_{H0}}$$

Dimana : $(h_{rs})_{SH}$ = *radian heat transfer coeff., from inner surface of insulation cover to outer surface of retort* [kcal/m² hr °C]

ϵ_s = *emissivity permukaan S* [---]

T_s = *suhu permukaan S* [°C]

ϵ_g = *emissivity gas* [---]

ϵ_H = *emissivity permukaan H* [---]

T_{H0} = *suhu permukaan H0* [°C]

Dalam desain pendekatan praktis, nilai ϵ_s dianggap sama nilainya dengan ϵ_H .

$$\epsilon_s = 0,76$$

$$\epsilon_g = 0,0652$$

$$\epsilon_H = 0,76$$

$$T_s = 950 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{H0} = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$$

maka:

$$(h_{rs})_{SH} = 204,9480 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

5. Menentukan h_0

$$h_0 = h_c + h_{rg} + \frac{1}{\frac{1}{h_c + h_{rg}} + \frac{1}{(h_{rs})_{SH}}}$$

Dimana: h_0 = *heat transfer coefficient, outside of retort* [kcal/m² hr °C]

$$h_{rg} = 22,4306 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$h_c = 26,3852 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$(h_{rs})_{SH} = 204,9480 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$h_0 = 88,2410 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

6. Menentukan $(h_{rs})_{HC}$

$$(h_{rs})_{HC} = \frac{\varepsilon_H(1 - \varepsilon_g^*)\varepsilon_C(4,88) \left[\left(\frac{T_H + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_C + 273}{100} \right)^4 \right]}{T_H - T_C}$$

Dimana : $(h_{rs})_{HC}$ = *radian heat transfer coeff. from inner surface of retort to rotating solid layer, based on surface area of inner wall to which rotating solids contact* [kcal/m² hr °C]

ε_H = *emissivity permukaan H* [---]

ε_g^* = *ratio of tar fraction in gas* [---]

ε_C = *emissivity permukaan C* [---]

T_H = *suhu permukaan H* [°C]

T_C = *suhu permukaan padatan yang dipanaskan* [°C]

$$\varepsilon_H = 0,76$$

$$\varepsilon_g^* = 0 \quad (\text{diasumsikan nilainya} = 0)$$

$$\varepsilon_C = 0,76 \quad (\text{dalam desain praktis, } \varepsilon_H \text{ dan } \varepsilon_C \text{ dianggap nilainya sama})$$

$$T_H = 990 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{dihitung menggunakan metode numeris dengan variabel } T_{H0}, k, r \text{ dan } h_c) \quad \{\text{kode perhitungan menggunakan Matlab ada di sheet 'Info'}\}$$

$$T_C = 927 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$(h_{rs})_{HC} = 70,2381 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

7. Menentukan $(h_p)_{HC}$

$$(h_p)_{HC} = 1,13 \left[\frac{k_e \bar{\rho} C_s N}{x} \right]^{1/2}$$

Dimana : $(h_p)_{HC}$ = heat transfer coefficient of wall surface, contacting with rotating solids [kcal/m² hr °C]

k_e = effective thermal conductivity of solids packet [kcal/m hr °C]

$\bar{\rho}$ = bulk density of solids [kg/m³]

C_s = specific heat of solids [kcal/kg °C]

N = rotational speed [rpm]

χ = fraction of wall surface, which contacts rotating solid [---]

7.1. Menentukan Nilai χ

Nilai χ dapat diperoleh dari grafik, dengan mencari nilai γ terlebih dahulu.

$$\gamma = \frac{\pi R^2 \left(\frac{\psi}{360} \right) - \left(12 \sin \frac{\psi}{n} \right) \left(R \cos \frac{\psi}{2} \right)}{\pi R^2} = \frac{\psi}{360} - \frac{\sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\psi}{2}}{\pi}$$

Dimana : γ = volumetric fraction of bulk solids [---]

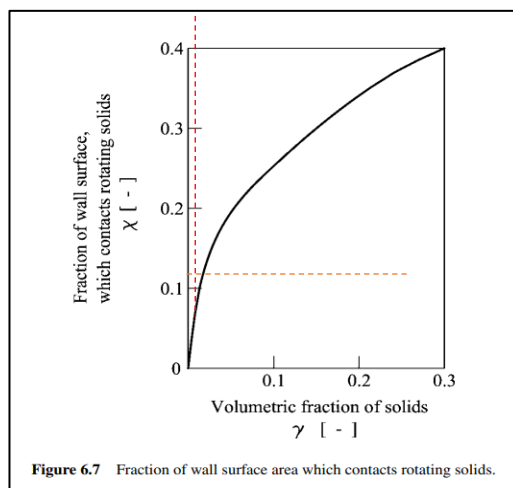
R = Radius [m]

ψ = angle against sliding layer [deg]

ψ = 45

R = 1,066747943 m

γ = 0,01246046



χ = 0,03

k_e = 0,5 kcal/m hr °C

$$\dot{\rho} = 450 \text{ kg/m}^3$$

$$C_s = 0,17 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

$$N = 2,3 \text{ rpm}$$

(data k_e diambil dengan pendekatan asumsi berdasarkan referensi)

$$(h_p)_{HC} = 1,13 \left[\frac{k_e \bar{\rho} C_s N}{x} \right]^{1/2}$$

$$(h_p)_{HC} = 183,5772 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

8. Menentukan h_i

$$h_i = \frac{1}{\frac{\delta_{H0}}{k_{H0}} + \frac{\delta_{Hi}}{k_{Hi}} + \frac{1}{\chi [(h_{rs})_{HC} + (h_p)_{HC}]}}$$

Dimana : h_i = heat transfer coefficient, inside of retort [$\text{kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$]

δ_{H0} = thickness of retort [m]

δ_{Hi} = thickness of sticked solid layer [m]

k_{H0} = thermal conductivity of retort [$\text{kcal/m hr } ^\circ\text{C}$]

k_{Hi} = thermal conductivity of sticked solids layer [$\text{kcal/m hr } ^\circ\text{C}$]

$$\delta_{H0} = 0,0108 \text{ m}$$

$$\delta_{Hi} = 0,008 \text{ m}$$

$$k_{H0} = 12,47 \text{ kcal/m hr } ^\circ\text{C}$$

$$k_{Hi} = 0,258 \text{ kcal/m hr } ^\circ\text{C}$$

$$\chi = 0,03$$

$$(h_{rs})_{HC} = 70,2381 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$(h_p)_{HC} = 183,5772 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$h_i = 90,5604 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

9. Menentukan U

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}}$$

U = overall heat transfer coefficient [kcal/m² hr °C]

$$U = 44,6928 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

10. Menentukan T_{H0} dan T_S

$$T_{H0} = \frac{h_o T_g + h_i T_c}{h_o + h_i}$$

$$T_{H0} = 1012,3779$$

Menentukan T_S :

$$(h_c + h_{rg})(T_g - T_S) = (h_{rs})_{SH}(T_S - T_{H0})$$

$$T_S = 1019,2367 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Masukkan nilai T_{H0} dan T_S ke persamaan awal untuk mencari nilai U yang baru.
(Perhitungan ada di sheet '6-Nilai U')

$$U = 44,6735 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

H. Menentukan Tebal *Refractory*

Hukum Fourier untuk laju perpindahan panas konduksi pada kondisi *steady state* satu arah di silinder :

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = -kA \frac{dT}{dr}$$

Jika persamaan di atas diintegrasikan, maka diperoleh :

$$\int_{r=r_1}^{r_2} \frac{\dot{Q}_{cond,cyl}}{A} = \int_{T=T_1}^{T_2} k dT$$

Substitusi nilai A dengan $2\pi L$

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = 2\pi Lk \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)}$$

Karena terdapat 2 variabel yang tidak diketahui (Q dan r_2), maka digunakan pendekatan melalui heat transfer rate dari refractory ke lingkungan.

$$Q = h_0 2\pi r_2 L (T_2 - T_{ambient})$$

Gabungkan 2 persamaan diatas sehingga menjadi :

$$\frac{2\pi k L (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = h_0 \cdot 2\pi r_2 L \cdot (T_2 - T_{ambient})$$

$$\frac{k(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = h_0 \cdot r_2 \cdot (T_2 - T_{ambient})$$

$$\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \frac{k(T_1 - T_2)}{h_0 \cdot r_2 \cdot (T_2 - T_{ambient})}$$

dimana : r_2 = radius of kiln + insulation [m]

r_1 = radius of kiln [m]

k = thermal conductivity of insulation material [kcal/m hr °C]

h_0 = heat transfer coefficient, outside of retort [kcal/m² hr °C]

T_1 = T_S (suhu permukaan S) [°C]

T_2 = suhu permukaan luar refractory [°C]

$T_{ambient}$ = suhu lingkungan [°C]

$r_1 = 1,0817$ m

$k = 0,086$ kcal/m hr °C

$h_0 = 89,4654$ kcal/m² hr °C (data ada di sheet '6-Nilai U')

$T_1 = 1019,2367$ °C

$T_2 = 100$ °C {umumnya, suhu setelah insulasi pada rotary kiln berkisar antara (100-150)°C}

$T_{ambient} = 30$ °C

Walaupun semua data sudah diketahui, persamaan diatas sangat sulit untuk diselesaikan dengan cara sederhana karena tipenya persamaan transendental. Oleh

karena itu, kami memutuskan untuk menggunakan metode numerik dengan software Matlab.

Hasil r_2 yang diperoleh dari iterasi adalah 1.5 m. Namun, ada warning karena beberapa iterasi mengalami eror. Persamaan mungkin memiliki beberapa masalah konvergensi atau membutuhkan tebakan awal yang lebih baik. Dalam beberapa kasus, persamaan transendental sulit diselesaikan untuk beberapa nilai tebakan

(r_2) karena nilainya konstan sehingga fungsi tidak berubah untuk membuat fsolve mendapat hasil yang sesuai. Oleh karena itu, dilakukan simulasi berbasis grid search agar diperoleh nilai r_2 yang lebih sesuai. Berikut kode programnya :

```
% Parameters given
T1 = 1019.2367;    % °C
T2 = 100;         % °C
Tambient = 30;    % °C
r1 = 1.0817;      % meters
k = 0.086;        % kcal/m·hr·°C
h0 = 89.4654;     % kcal/m²·hr·°C

% Define the function to solve
equation_bisect = @(r2) (k * (T1 - T2)) / log(r2 / r1) + h0 * r2 * (T2 - Tambient);

% Generate a range of r2 values between 1.1 and 3.0
r2_values = linspace(1.1, 3.0, 10000);
equation_values = zeros(size(r2_values));

% Calculate the equation values for each r2
for i = 1:length(r2_values)
    try
        equation_values(i) = equation_bisect(r2_values(i));
    catch
        equation_values(i) = NaN;
    end
end
end
```

```
% Find the r2 value where the equation value is closest to zero
[~, min_index] = min(abs(equation_values));
r2_solution_grid_search = r2_values(min_index);

% Display the result
fprintf('The calculated value of r2 is: %.4f meters\n', r2_solution_grid_search);
```

diperoleh:

$$r_2 = 1,2642 \text{ m}$$

$$\text{Tebal Refractory} = (r_2 - r_1)$$

$$\text{Tebal Refractory} = 0,1825 \text{ m}$$

$$= 182,4521 \text{ mm (dapat diterima)}$$

{Tebal refractory berkisar antara : (150-300)mm}

I. Menghitung Jumlah *Flight*

Jumlah flight pada rotary kiln berkisar antara 0.6 D hingga D.

$$0.6 D = 1,2801$$

$$D = 2,1335$$

Jumlah flight yang diambil adalah 3 flight

Tinggi flight bernilai 1/12 hingga 1/8 dari diameter. Dipilih nilai tengahnya, yaitu 1/10

$$\text{Tinggi flight} = 0,2133 \text{ m}$$

J. Menghitung Suhu Keluar Udara Pemanas

Untuk menghitung suhu keluar dari udara pemanas, kita dapat menggunakan prinsip keseimbangan energi dan perpindahan panas.

Laju energi yang hilang pada udara panas dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Q = \dot{m}_u c_p (T_{in} - T_{out})$$

keterangan: Q = heat transfer rate [kcal/hr]
 $\dot{m}_u$ = mass flow rate for hot gas [kg/hr]
 c_p = heat capacity [kcal/kg °C]
 T_{in} = hot gas inlet temp [°C]
 T_{out} = hot gas outlet temp [°C]

Energi yang berpindah dari udara panas:

$$Q_{tr} = U A \Delta T$$

keterangan: $Q_{tr} = Q_{transfer}$; heat transfer rate from hot gas to material [kcal/hr]
 U = overall heat transfer coefficient [kcal/m² hr °C]
 A = surface area of shell [m²]
 $\Delta T = (T_{in} - T_{feed})$ [°C]

Karena suhu luar kiln $\neq$ suhu lingkungan, maka ada heat loss yang perlu dihitung

$$Q_l = h_0 \dot{A} (T_2 - T_{ambient})$$

keterangan: $Q_l = Q_{loss}$; heat loss to environment [kcal/hr]
 h_0 = heat transfer coefficient, outside of retort [kcal/m² hr °C]
 $\dot{A}$ = surface area of refractory [m²]
 T_2 = suhu permukaan luar refractory [°C]
 $T_{ambient}$ = suhu lingkungan [°C]

$$Q = Q_{tr} + Q_l$$

$$\dot{m}_u c_p (T_{in} - T_{out}) = U A \Delta T + h_0 \dot{A} (T_2 - T_{ambient})$$

$$T_{out} = T_{in} - \frac{U A \Delta T + h_0 \dot{A} (T_2 - T_{ambient})}{\dot{m}_u c_p}$$

Menentukan nilai $\dot{m}_u$:

Diketahui data:

diameter pipa gas (*breadth of channels for gas flow*) 0,03 m

average gas velocity 20 m/s

$$\dot{m}_u = \rho \tilde{V}$$

Keterangan : ρ = density [kg/m³]

$\tilde{V}$ = volumetric flow rate [m³/hr]

$$\rho = 2,71 \text{ kg/m}^3$$

$$\tilde{V} = 508,9380 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\dot{m}_u = 1379,2040 \text{ kg/hr}$$

$$U = 44,6735 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$A = 6,7026 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = 173 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_0 = 89,4654 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{A} = 7,9432 \text{ m}^2$$

$$T_2 = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{ambient}} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_p = 0,2325 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{out}} = T_{\text{in}} - \frac{U A \Delta T + h_0 \dot{A} (T_2 - T_{\text{ambient}})}{\dot{m}_u c_p}$$

$$T_{\text{out}} = 783,3270982 \text{ } ^\circ\text{C}$$

K. Menghitung Daya yang Dibutuhkan

untuk pengering putar atau bagian kiln dengan pengangkat

$$bhp = \frac{N(4,75dw + 0,1925DW + 0,33W)}{100000}$$

dimana : bhp = *brake horsepower* (1 bhp = 0.75 kW)

N = *rotational speed* [rpm]

d = *shell diameter* [ft]

w = *live load material* [lb]

D = *riding-ring diameter* [ft]

W = *total rotating load (equipment + material)* [lb]

N = 2,3 rpm

d = 7 ft

w = 25326,1243 lb

D = 9 ft

W = 262160,0556 lb

bhp = 31,8044

= 23,8533 kW

1. Menghitung Nilai w

w = 11485,7707 kg

= 25326,1243 lb

2. Menghitung Nilai D

Untuk mempermudah, nilai D diestimasi :

$D = (d+2)$

D = 9

3. Menghitung Nilai W

W = berat *material + equipment*

3.1. Berat Material

Berat material = 25326,1243 lb

3.2. Berat Equipment

- Berat Shell Rotary Kiln

$$\begin{aligned}\text{Volume shell} &= A.t \\ &= 2\pi r L.t \\ &= 1,55086521 \text{ m}^3\end{aligned}$$

dimana :

$$\begin{aligned}r &= \text{radius of shell [m]} \\ L &= \text{length of reactor [m]} \\ t &= \text{thickness of shell [m]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Density of shell} &= 8,89 \text{ gr/cm}^3 \\ &= 8890 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Berat shell} &= \rho.V \\ &= 13787,1917 \text{ kg} \\ &= 30400,7577 \text{ lb}\end{aligned}$$

- Berat Refractory

$$\text{Volume refractory} = \text{volume kiln (include insulation)} - \text{volume shell}$$

$$\begin{aligned}\text{volume kiln} &= A.t \\ &= 2\pi r L.t \\ &= 32,7577 \text{ m}^3\end{aligned}$$

dimana :

$$\begin{aligned}r &= \text{radius of shell+refractory [m]} \\ L &= \text{length of reactor [m]} \\ t &= \text{thickness of shell+refractory [m]}\end{aligned}$$

$$\text{Volume refractory} = 31,2068 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned}\rho \text{ refractory} &= 3 \text{ gr/cm}^3 \\ &= 3000 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

$$\text{Berat refractory} = \rho.V$$

= 93620,4869 kg

= 206433,1736 lb

Berat *equipment* = 236833,9313 lb

W = 262160,0556 lb

Diperlukan sebesar 23.9 kW/jam untuk mengoperasikan *rotary kiln*

A. Menentukan Jenis Reaktor

Jenis reaktor yang dipilih untuk mengkarbonisasi cangkang kelapa sawit menjadi arang/karbon adalah *indirect heat rotary kiln*, dengan pertimbangan sebagai berikut:

- Reaksi berlangsung pada fase padat dengan suhu yang sangat tinggi
- Reaktor bekerja dengan memproses material umpan pada suhu tertentu untuk waktu tertentu
- Mampu memadai reaksi yang sangat endotermis dan/atau eksotermis
- Dapat dioperasikan dalam skala besar, efisiensi tinggi dalam produksi massal dengan kontrol kualitas yang baik

B. Menentukan Bahan Konstruksi Reaktor

Dipilih bahan konstruksi *indirect heat rotary kiln* adalah SS ASTM-A240 Grade 304, yakni paduan dari *stainless steel*, nikel dan kromium yang didesain khusus untuk suhu tinggi, tahan karat dan korosi. Hal tersebut didasarkan pada beberapa aspek berikut:

- SS ASTM-A240 Grade 304 memiliki *strength* dan *stability* pada suhu hingga 870 °C
- tahan terhadap korosi gas-gas asam seperti SO₂ dan NO_x yang dihasilkan dari pembakaran batu bara
- memiliki konduktivitas thermal yang baik

C. Menghitung Dimensi Reaktor

1. Menghitung Volume Reaktor

Persamaan untuk menghitung volume reaktor *rotary kiln* dapat didekati dengan perancangan reaktor alir pipa (*plug flow reactor*) menggunakan persamaan perancangan :

$$F_{A0} \frac{dx}{dv} = -r_a \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$F_{A0} \cdot dx = -r_a \cdot dV$$

$$dV = \frac{F_{A0} \cdot dx}{-r_A}$$

$$\int_0^V dV = F_{A0} \cdot \int_0^x \frac{dx}{-r_A}$$

$$V = F_{A0} \cdot \int_0^x \frac{dx}{-r_A}$$

$$-r_A = k \cdot C_A \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$V = F_{A0} \cdot \int_0^x \frac{dx}{k \cdot C_A}$$

$$C_A = C_{A0} \cdot (1 - x) \dots \dots \dots (3)$$

$$V = F_{A0} \cdot \int_0^x \frac{dx}{k \cdot C_{A0}(1 - x)}$$

$$F_A = C_A \cdot V \dots \dots \dots (4)$$

$$F_{A0} = C_{A0} \cdot V_0$$

$$V = C_{A0} \cdot V_0 \cdot \int_0^x \frac{dx}{k \cdot C_{A0}(1 - x)}$$

$$V = \frac{C_{A0} \cdot V_0}{k \cdot C_{A0}} \int_0^x \frac{dx}{(1 - x)}$$

$$V = \frac{V_0}{k} \int_0^x \frac{dx}{(1 - x)}$$

$$V = \frac{V_0}{k} \left[-\ln(1 - x) \right]_0^x$$

$$V = \frac{V_0}{k} \left(\left[-\ln(1 - x) \right] - \left[-\ln(1 - 0) \right] \right)$$

$$V = \frac{V_0}{k} \left(\left[-\ln(1 - x) \right] - [0] \right)$$

$$V = \frac{V_0}{k} \left(\left[-\ln(1 - x) \right] \right)$$

Pada persamaan diatas, diambil orde reaksi untuk proses karbonisasi cangkang kelapa sawit adalah orde reaksi 1, dengan reaksi non elementer. Alasan memilih orde 1 dan reaksi non-elementer :

- Pada reaksi orde pertama, laju reaksi berbanding lurus dengan konsentrasi reaktan. Hal ini menyatakan bahwa laju dekomposisi

cangkang kelapa sawit akan berkurang seiring dengan menurunnya jumlah reaktan yang tersisa. Ciri tersebut merupakan karakteristik umum dari reaksi pirolisis atau dekomposisi termal. Selain itu, beberapa penelitian juga memodelkan reaksi ini sebagai reaksi orde pertama karena kesederhanaannya dengan data eksperimen.

- Cangkang kelapa sawit adalah bahan yang kompleks dan heterogen, memiliki kandungan utama berupa selulosa, hemiselulosa dan lignin. Setiap komponen memiliki jalur dekomposisi dan kinetika yang berbeda ketika dipanaskan, yang membuat keseluruhan proses dekomposisi menjadi sangat kompleks dan tidak dapat digambarkan sebagai reaksi elementer tunggal.

Persamaan untuk menghitung volume reaktor:

$$V = \frac{V_0}{k} \ln(1 - x)$$

Dimana : V = Volume reaktor [L]
 V₀ = Laju alir volumetric *feed* [L/jam]
 K = Konstanta Kecepatan reaksi [s⁻¹](orde 1)
 x = Konversi

1.1 Menghitung laju alir volumetris *feed*

$$V_0 = \frac{m}{\rho}$$

Dimana : m = laju alir massa *feed* [kg/jam]
 ρ = densitas *feed* [kg/L]

densitas *feed* pada suhu tertentu dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\rho = A \cdot B^{-\left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^n}$$

Dimana : ρ = kepadatan cairan jenuh [g/ml]
 A, B, dan n = Koefisien regresi untuk senyawa kimia
 T = Suhu [K]
 T_c = Suhu Kritis [K]

Komponen	Rumus Kimia	A	B	n	T (K)	Tc (K)	ρ (gr/ml)	ρ (kg/L)
Cellulose	$C_6H_{10}O_5$						1,50	1,50
Hemi cellulosa	$C_5H_8O_4$	0,36	0,25	0,26	773,15	807,00	0,68	0,68
Lignin	$C_{15}H_{14}O_4$						1,40	1,40
Water	H ₂ O	0,35	0,27	0,29	773,15	647,13	0,78	0,78

Komponen	Laju Alir Feed	Fraksi Berat (x_i)	Densitas (ρ) (kg/L)	$x_i \cdot \rho$ (kg/L)
Cellulose	449,80	0,07	1,50	0,11
Hemis cellulose	1697,54	0,27	0,68	0,19
Lignin	3500,25	0,56	1,40	0,79
Water	558,30	0,09	0,78	0,07
Total	6205,89	1,00		1,15

Densitas campuran = 1,1547 kg/L

Laju alir Feed (m) = 6770,0932 kg/jam

Faktor Keamanan = 20%

m = 8124,1118 kg/jam

$$V_0 = \frac{m}{\rho}$$

V_0 = 7035,8397 L/jam

= 117,2640 L/jam

1.2 Menghitung Nilai Konstanta Kecepatan Reaksi (k)

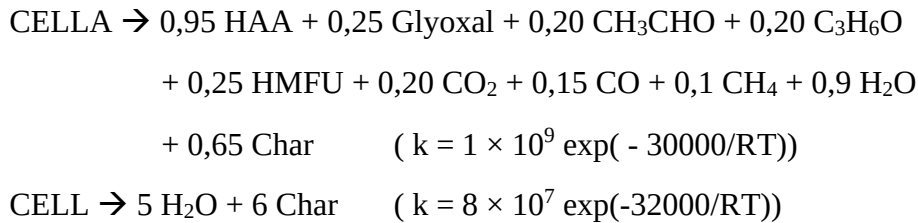
Nilai k dapat ditentukan berdasarkan persamaan Arrhenius berikut:

$$k = A \cdot e^{-E_a/RT}$$

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Ranzi et al, (2008), diperoleh data sebagai berikut:

Kinetika reaksi untuk dekomposisi selulosa (*cellulose*):

CELL $\rightarrow$ CELLA ($k = 8 \times 10^{13} \exp(-46000/RT)$)



R =

T =

Dari persamaan reaksi diatas, ada 3 skema reaksi yang terjadi. Maka untuk menentukan kinetika reaksi dekomposisi selulosa secara keseluruhan adalah sebagai berikut:

Skema reaksi secara sederhana:

Selulosa (*CELL*) $\rightarrow$ Intermediat 1 (*CELLA*)

Intermediat 1 (*CELLA*) $\rightarrow$ Produk Akhir

Selulosa (*CELL*) $\rightarrow$ Produk Akhir

- Laju Pembentukan Intermediet 1 : $\frac{d[\text{Intermediat 1}]}{dt} = k_1[\text{Selulosa}] - k_3[\text{Intermediat 1}]$
- Laju Konsumsi Intermediet 1 : $\frac{d[\text{Intermediat 1}]}{dt} = k_1[\text{Selulosa}] - k_3[\text{Intermediat 1}]$

Pada Kondisi kesetimbangan, laju pembentukan Intermediat 1 sama dengan laju konsumsinya :

$$k_1[\text{Selulosa}] - k_3[\text{Intermediat 1}]$$

Sehingga :

$$[\text{Intermediat 1}] = \frac{k_1[\text{Selulosa}]}{k_3}$$

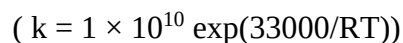
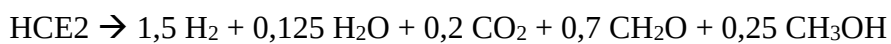
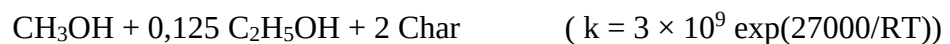
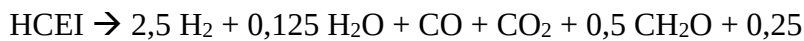
- Laju Produksi Akhir dari Selulosa secara Langsung $k_2[\text{Selulosa}]$
- Laju Produksi Produk Akhir dari intermediat 1 : $k_3[\text{Intermediat 1}] = k_3 \left(\frac{k_1[\text{Selulosa}]}{k_3} \right) = k_1[\text{Selulosa}]$

$$\text{Kecepatan Keseluruhan} = k_2[\text{Selulosa}] - k_1[\text{Selulosa}]$$

$$\text{Kecepatan Keseluruhan} = (k_1 + k_2)[\text{Selulosa}]$$

konstanta kec. reaksi dekomposisi selulosa = $0,011748855 \text{ min}^{-1}$ 0,006239941
 0,005508914

Kinetika reaksi untuk dekomposisi hemiselulosa (*hemicellulose*):



Skema reaksi secara sederhana:

Hemiselulosa (*HCE*) $\rightarrow$ Intermediat 1 (*HCE1*) + Intermediat 2 (*HCE2*)

Intermediat 1 (*HCE1*) $\rightarrow$ Produk Akhir

Intermediat 2 (*HCE2*) $\rightarrow$ Produk Akhir

Laju Pembentukan Intermediat 1 : $\frac{d[\text{Intermediat 1}]}{dt} = k_1[\text{Hemiselulosa}] - k_3[\text{Intermediat 1}]$. Pada kesetimbangan, laju pembentukan Intermediat 1 sama dengan laju konsumsinya:

$$k_1[\text{Hemiselulosa}] = k_2[\text{Intermediat 1}]$$

Sehingga:

$$[\text{Intermediat 1}] = \frac{k_1[\text{Hemiselulosa}]}{k_2}$$

Laju Pembentukan Intermediat 2 : $\frac{d[\text{Intermediat 2}]}{dt} = k_1[\text{Hemiselulosa}] - k_3[\text{Intermediat 2}]$. Pada kesetimbangan, laju pembentukan Intermediat 2 sama dengan laju konsumsinya:

$$k_1[\text{Hemiselulosa}] = k_3[\text{Intermediat 2}]$$

Sehingga:

$$[Intermediate\ 2] = \frac{k_1[Hemiselulosa]}{k_3}$$

- Laju Produksi Produk dari Intermediate 1 : $k_2[Intermediate\ 1]$
- Laju Produksi Produk dari Intermediate 2 : $k_3[Intermediate\ 2]$

$$k_2 \left(\frac{k_1[Hemiselulosa]}{k_2} \right) = k_1[Hemiselulosa]$$

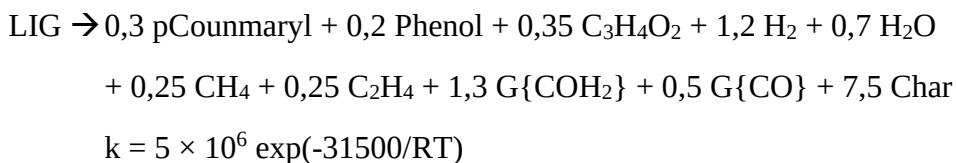
$$k_3 \left(\frac{k_1[Hemiselulosa]}{k_3} \right) = k_1[Hemiselulosa]$$

$$\text{Kecepatan Keseluruhan} = k_1[Hemiselulosa] + k_1[Hemiselulosa]$$

$$\text{Kecepatan Keseluruhan} = 2k_1[Hemiselulosa]$$

Konstanta kecepatan reaksi dekomposisi Hemiselulosa = $0,01609\text{ min}^{-1}$

Kinetika reaksi untuk dekomposisi lignin (*hemicellulose*):



Konstanta Kecepatan dekomposisi lignin = $0,003721582\text{ min}^{-1}$

Konstanta Kecepatan reaksi dekomposisi cangkang kelapa sawit = $0,0316\text{ min}^{-1}$

$$k = 0,316\text{ min}^{-1}$$

1.3 Menentukan Nilai Konversi Reaksi

Konversi reaksi untuk selulosa, hemiselulosa dan lignin pada kondisi aktual sangat sulit untuk mencapai nilai yang tinggi, umumnya hanya mencapai (60-80)%. Namun, untuk menyederhanakan perhitungan, diambil nilai konversi 99%.

$$x = 99\%$$

Volume Reaktor:

$$V = -\frac{V_0}{k} \ln(1 - x)$$

$$V = 17110,4180 \text{ L}$$

$$= 17,1104 \text{ m}^3$$

Safety Factor

$$V = 18821,4598 \text{ L}$$

$$= 18,8215 \text{ m}^3$$

2. Menghitung Panjang dan Diameter Reaktor

Bentuk reaktor diasumsikan berbentuk silinder dengan arah horizontal, sehingga panjang reaktor sama dengan tinggi silinder.

Rumus volume silinder:

$$V = \frac{1}{4}\pi D^2 T$$

Dimana T = Panjang reaktor (L)

$$\text{Rasio } L/D = 6 \Leftrightarrow 10$$

Rasio yang dipilih : 10

$$V = \frac{1}{4}\pi D^2 L$$

$$V = \frac{1}{4}\pi D^2 (10D)$$

$$54,06 = \frac{1}{4}(3,14)(10D^3)$$

$$D^3 = 2,3976$$

$$D = 1,3384 \text{ m}$$

$$L = 10D$$

$$= 13,3843 \text{ m}$$

Ukuran yang ada di industry :

SOLIDS-DRYING EQUIPMENT 12-39

TABLE 12-20 Typical Rotary-Kiln Installations*

Size, diam. × length	Usual No. of supports	Range of motor hp. to operate†	Nominal 24-hr. capacities‡			
			Portland cement, 376-lb. bbl.		Lime, net tons	
			Dry process	Wet process	Lime sludge	Limestone
5 × 60 ft.	2	5–7.5	140	100	10	16
6 × 70 ft.	2	7.5–15	190	135	15	24
7 × 70 ft.	2	15–20	275	200	20	35
5 ft. 6 in. × 180 ft.	4	15–20	285	250	30	45
7 × 120 ft.	2	15–25	475	340	35	55
7 ft. 6 in. × 125 ft.	2	20–30	575	415	40	70
6 × 220 ft.	4	20–30	420	375	45	65
8 × 140 ft.	2	25–30	750	540	55	90
9 × 160 ft.	2	30–50	1100	800	80	130
8 ft. 6 in. × 185 ft.	4	30–50	1125	810	80	135
10 × 150 ft.	2	40–75	1300	950	—	145
10 × 175 ft.	2	50–75	1500	1100	—	155
8 × 300 ft.	5	50–75	1150	1000	110	160
7 ft. 6 in. × 8 ft. 6 in. × 320 ft.	5	50–75	1175	1020	115	165
7 ft. 6 in. × 10 ft. × 8 ft. 6 in. × 300 ft.	5	50–75	1175	1020	—	—
10 × 11 × 175 ft.	2	50–75	1650	1200	120	180
10 ft. 6 in. × 185 ft.	2	50–75	1800	1300	130	190
11 × 175 ft.	2	60–100	1850	1375	—	205
8 ft. 6 in. × 10 ft. × 8 ft. 6 in. × 300 ft.	5	50–75	1400	1200	—	—
8 × 10 × 300 ft.	5	50–75	1425	1225	140	200
9 ft. 6 in. × 265 ft.	4	60–100	1500	1300	150	215
9 × 10 ft. 6 in. × 9 ft. × 325 ft.	5	60–100	1700	1500	—	—
10 ft. 6 in. × 250 ft.	4	60–100	1750	1525	175	240
9 ft. 6 in. × 11 ft. × 9 ft. 6 in. × 300 ft.	5	60–100	1800	1550	—	—
10 × 300 ft.	5	75–125	1900	1650	190	250
9 ft. 6 in. × 11 ft. × 9 ft. 6 in. × 375 ft.	6	75–125	2025	1800	—	—
11 × 300 ft.	5	75–125	2400	2100	225	300
11 ft. 6 in. × 300 ft.	4	100–150	2600	2250	240	320
10 ft. 6 in. × 375 ft.	5	100–150	2700	2400	250	325
11 ft. 3 in. × 360 ft.	5	125–175	2900	2500	275	350
11 ft. 6 in. × 475 ft.	7	150–250	4000	3500	375	450
12 × 500 ft.	8	200–300	4600	4000	425	500

D = 1,3384 m

L = 4,3914 ft

Dipilih ukuran 5 × 60 ft

D = 1,5239 m

L = 18,2871 m

Luas Penampang Reaktor :

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2$$

D. Menghitung Tebal Shell

Tebal *shell* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan untuk tipe *Circumferential Strees* :

$$t = \frac{p \cdot d}{2 \cdot f \cdot E} + C$$

Dimana:

t = *thickness of shell* [in]

p = internal pressure [psi]

d = inside diameter [in]

f = allowable working stress [psi]

E = joint efficiency

c = corrosion allowance [in]

1. Menentukan Nilai f

Bahan yang dipilih adalah Stainless Steel Grade 304 yang merupakan campuran kromium, nikel dan tembaga. SS Grade 304 memiliki nilai f sebagai berikut:

Kode	Komposisi	F pada 68°F (psi)	F pada 500°F (psi)
UNS N10276	18% C	20000	13000
	9% Ni		
	3% Cu		

Karena nilai f merupakan fungsi suhu, maka perlu dicari nilai f untuk suhu operasi (500°C) menggunakan interpolasi.

$$y = y_1 + (x - x_1) + \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}$$

Dimana : y = nilai interpolasi

x = variabel bebas

x_1, y_1 = nilai fungsi pada satu titik

x_2, y_2 = nilai fungsi pada titik lainnya

$$y = 20000 + (x - 68) + \frac{(13000 - 20000)}{(500 - 68)}$$

$$y = 6000 \text{ psi}$$

$$f = 6000 \text{ psi}$$

2. Menentukan Nilai E

Tipe Joint yang digunakan untuk reaktor *rotary kiln* adalah *Double-welded butt joint* dengan pertimbangan sebagai berikut:

- Reaktor beroperasi pada suhu ekstrim sehingga memerlukan sambungan yang mampu menahan fluktuasi suhu
- *Double-welded butt joint* memberikan kekuatan yang tinggi dan mencegah kebocoran dengan baik dibanding tipe *joint* lainnya. Sangat cocok untuk jangka panjang dan lingkungan yang buruk
- Tipe sambungan ini memastikan distribusi *stress* yang merata, mampu mengurangi resiko konsentrasi *stress* yang dapat memicu retakan atau kegagalan structural

$$E = 80\%$$

3. Menentukan Nilai c

Untukantisipasi terjadinya korosi pada bahan material, ditambahkan corrotion allowance bernilai 0.35 in.

$$c = 0,35 \text{ in}$$

4. Menentukan nilai p

$$p = \rho \frac{(H - 1)}{144}$$

Dimana :

$p = \text{Internal pressure [psi]}$

$\rho = \text{densitas [lb/ft}^3\text{]}$

$H = \text{height of feed [ft]}$

$$\rho = 1,1547 \text{ kg/L}$$

$$= 72,07841 \text{ lb/ft}^3$$

4.1 Mencari Nilai H

$$\text{Volume Feed} = \frac{\text{massa feed}}{\rho \text{ feed}}$$

$$\text{Massa feed} = 6770,0932 \text{ kg}$$

$$\rho \text{ feed} = 1,1547 \text{ kg/L}$$

$$\text{Volume feed} = 5863,1997 \text{ L}$$

$$= 5,8632 \text{ m}^3$$

$$V = A.H$$

$$H = \frac{V}{A}$$

$$A = \frac{1}{4}\pi D^2$$

$$A = 1,8230 \text{ m}^2$$

$$H = 1,2865 \text{ m}$$

$$= 4,2209 \text{ ft}$$

$$p = \rho \frac{(H - 1)}{144}$$

$$p = 1,6123 \text{ psi}$$

$$P_{\text{operasi}} = 1 \text{ atm}$$

$$= 14,696 \text{ psi}$$

$$\text{Safety factor} = 20\%$$

$$P_{\text{desain}} = (p + P_{\text{operasi}}) + \text{safety factor}$$

$$P_{\text{desain}} = 19,5700 \text{ psi}$$

$$= 1,3317 \text{ atm}$$

5. Menentukan nilai d

$$d = 1,5239 \text{ m}$$

$$= 59,9970 \text{ in}$$

$$t = \frac{p \cdot d}{2 \cdot f \cdot E} + C$$

$$t = 0,4723 \text{ in}$$

$$= 0,0120 \text{ m}$$

E. Menghitung *Residence Time*

$$\tau = 1 + \frac{L}{60 \pi n D \tan v} \cdot h$$

Dimana n = rpm

D = diameter [m]

L = length [m]

v = derajat kemiringan terhadap horizontal

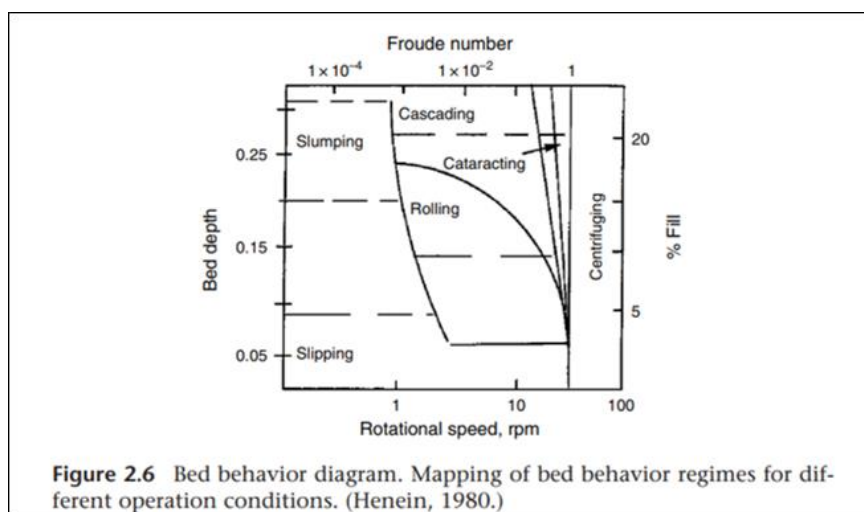
$D = 1,5239$ m

$L = 18,2871$ m

$v = 33$ degree

$\tan v = 0,6494$

nilai n dapat ditentukan dengan bantuan *Bed Behavior Diagram*



1. Menentukan *Froude Number*

$$Fr = \omega^2 \frac{R}{g}$$

Dimana:

ω = kecepatan sudut [rad/s]

R = jari-jari dalam kiln [m]

g = percepatan gravitasi [9.8 m/s^2]

$$\omega = 0,279 \text{ rad/s}$$

$$R = 0,7620 \text{ m}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$Fr = 0,279^2 \frac{0,7620}{9,8}$$

$$Fr = 0,0061$$

2. Menentukan %Fill

$$\%Fill = \frac{Volume \text{ feed}}{Volume \text{ Total}} \times 100\%$$

$$Volume \text{ Feed} = 5,8632$$

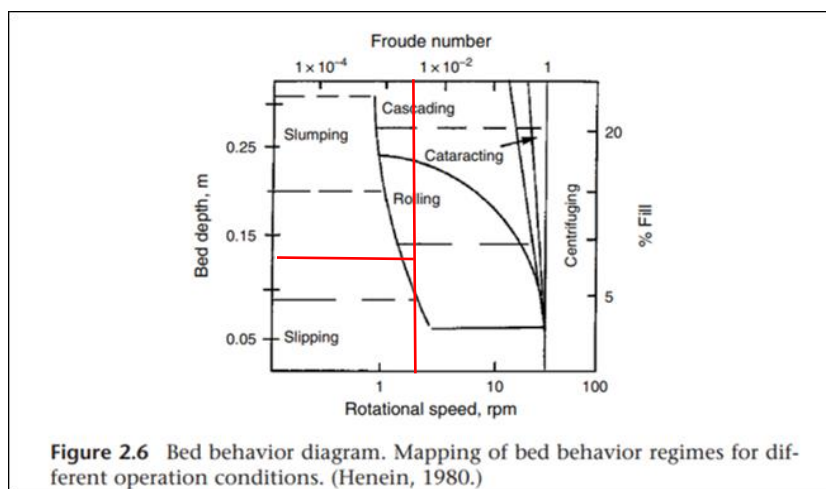
$$Volume \text{ Total} = 18,8215$$

$$\%Fill = 31\%$$

3. Menentukan Bed Depth

$$Bed \text{ Depth} = 1,2865 \text{ m}$$

$$= 0,1286 \text{ dam}$$



Berdasarkan grafik diatas, diperoleh nilai *Rotational speed* (n) berkisar antara 2-4 rpm. Dipilih nilai 2.3 rpm

$$n = 2,3 \text{ rpm}$$

$$\tau = \frac{L}{60\pi n D \tan \theta} h$$

$$\tau = 0,0426 \text{ jam}$$

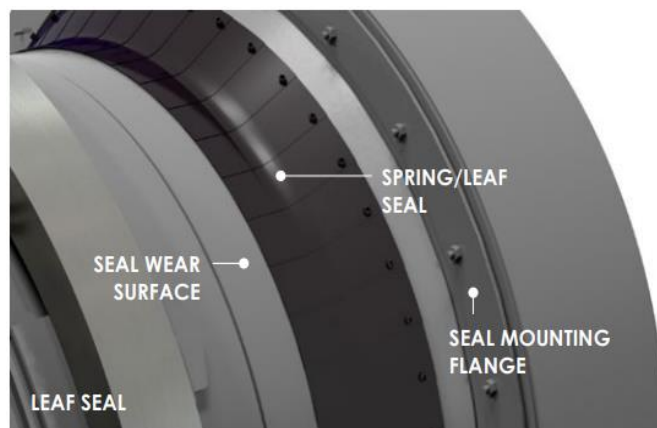
$$= 2,5586 \text{ menit}$$

F. Menentukan Seal dan Refractory

1. Pemilihan seal

Seal bertujuan untuk mencegah udara luar masuk ke dalam kiln dan mencegah gas atau partikel dari dalam kiln keluar ke lingkungan. Hal ini sangat penting untuk menjaga efisiensi panas dan kualitas atmosfer di dalam *rotary kiln*. Dipilih *seal* tipe *leaf seal* dengan pertimbangan sebagai berikut:

- Fleksibilitas tipe *leaf seal* sangat baik, memungkinkan untuk mengikuti gerakan *rotary kiln* dan menjaga kiln dengan rapat.
- Memiliki daya tahan yang tinggi terhadap keausan dan kerusakan mekanis
- Harga relatif lebih murah jika dibandingkan jenis *seal* lainnya (seperti *graphith block seal*, *labyrinth seal*, *pneumatic seal* dan *bellows seal*)



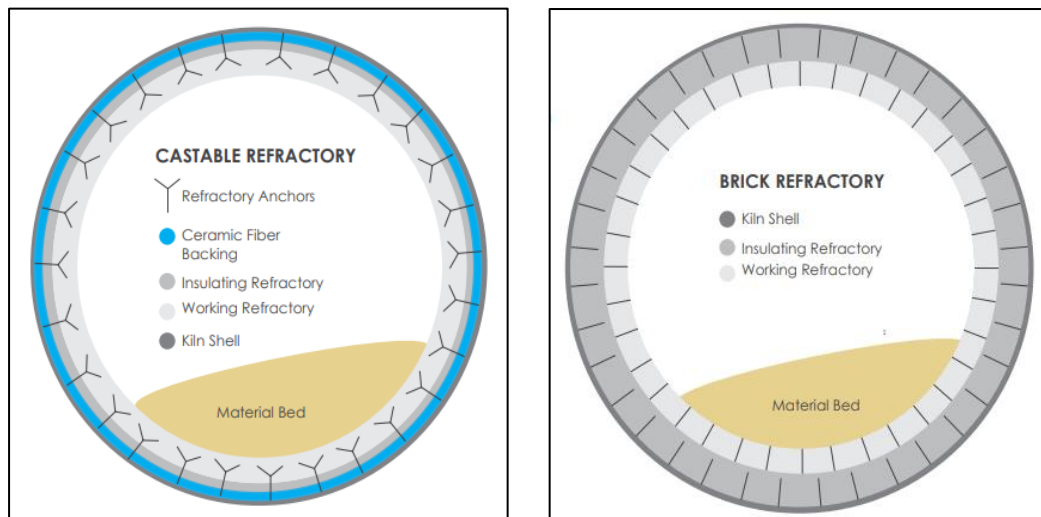
2. Pemilihan Refractory

Refractory merupakan salah satu komponen yang sangat penting di *rotary kiln*, berfungsi menjaga retensi panas di dalam kiln. Umumnya, ada 2 jenis *refractory* pada *rotary kiln*, yaitu *castable refractory* dan *brick refractory*.

	Jenis <i>Refractory</i>	
	<i>Castable</i>	Brick
Kelebihan	Pembuatan mudah, dapat disesuaikan dengan kiln. Bahan material tersedia	Kualitas lebih baik dibanding <i>castable</i> , tidak

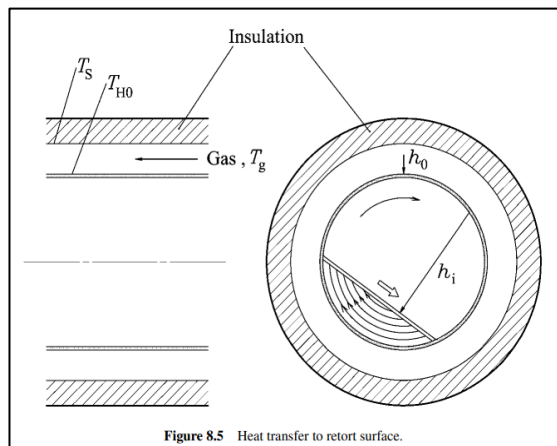
	dalam bentuk bubuk, bisa diolah di tempat.	memerlukan <i>anchors</i> /jangkar.
	Mudah ditambah/diperbaiki jika terjadi masalah. Waktu penghentian dapat dibuat seminimal mungkin, karena area yang bermasalah dapat dipotong dan material baru dapat dituangkan ke rongga tersebut.	Tahan aus sehingga cocok untuk bahan yang bersifat abrasif.
Kelemahan	Rentan terhadap proses pemasangan. Jika dipasang oleh petugas yang ahli, kualitasnya hampir sama dengan <i>brick</i> . Namun, jika pemasangannya salah, kualitasnya sangat buruk.	Biaya pemasangan lebih mahal dan <i>maintenance</i> lebih rumit. Ketika ada bagian batu bata yang rusak, bagian lain akan terpengaruh karena tiap batu bata saling bergantung dan saling menekan dengan yang lainnya.

Jenis yang dipilih → *Castable Refractory*



G. Menghitung *Heat Transfer*

Karena *rotary kiln* menggunakan metode *indirect fired* sebagai *contacting method*, maka perpindahan panas yang terjadi memiliki skema yang sedikit berbeda dari *direct fired*. Berikut adalah ilustrasi perpindahan panas dari aliran gas panas menuju kiln.



Gas panas yang digunakan berasal dari pembakaran batu bara jenis Bituminus (C 85% dan H 5%)

Asumsi kondisi :

diameter pipa gas / *breadth of channels for gas flow* = 3 cm

partial pressure dari CO₂ = 0,691 atm

partial pressure dari H₂O = 0,244 atm

average gas temp. (T_g) = 783,3271 °C

average solid temp. (T_c) = 150 °C

average gas velocity = 20 m/s

1. Menentukan *Emissivity* Gas

Emissivity gas dapat dihitung berdasarkan prosedur Incropera (2007) sebagai berikut:

$$l_g = 2 \times \text{breadth of channels for gas flow}$$

Dimana:

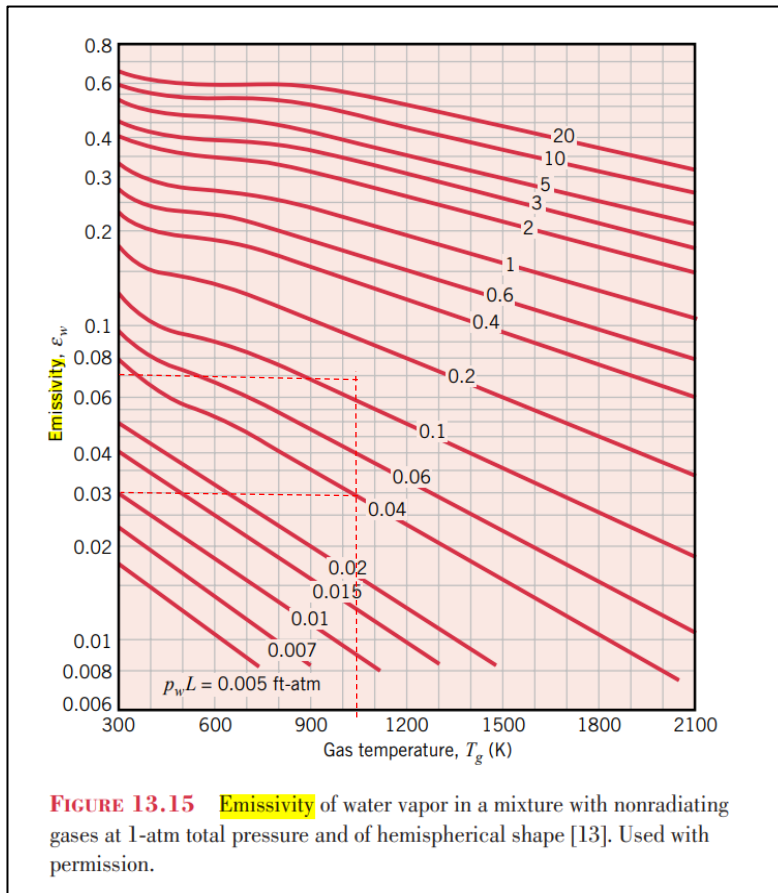
l_g = *effective thickness of the gas flow*, ft

$$l_g = 6 \text{ cm}$$

$$= 0,1969 \text{ ft}$$

$$P_{\text{CO}_2} \cdot l_g = 0,1360 \text{ ft.atm}$$

$$P_{H_2O} \cdot l_g = 0,0480 \text{ ft.atm}$$



Berdasarkan tabel tersebut, diperoleh :

$$\epsilon_{CO_2} = 0,075$$

$$\epsilon_{H_2O} = 0,03$$

$$\begin{aligned} \text{emissivity gas } (\epsilon_g) &= \epsilon_{CO_2} + \epsilon_{H_2O} \\ &= 0,105 \end{aligned}$$

2. Menentukan h_{rg}

$$h_{rg} = \frac{\epsilon_g \epsilon_H (4,88) \left[\left(\frac{T_g + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{H0} + 273}{100} \right)^4 \right]}{T_g - T_{H0}}$$

Dimana :

h_{rg} = radiant heat transfer coefficient from hot gas, on the basis of inner surface area reactor [kcal/m² hr °C]

$\epsilon_g = \text{emissivity gas [---]}$

$\epsilon_H = \text{emissivity permukaan H [---]}$

$T_g = \text{suhu gas [}^\circ\text{C]}$

$T_{H0} = \text{suhu permukaan H0 [}^\circ\text{C]}$

emissivity permukaan H (ϵ_H) = 0,73

Sebagai perkiraan awal, kita ambil $T_{H0} = 650^\circ\text{C}$, $T_S = 600^\circ\text{C}$

$$T_g = 783,3271^\circ\text{C}$$

$$T_{H0} = 650^\circ\text{C}$$

$$h_{rg} = 14,5687 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

3. Menentukan h_c

Conventional heat transfer coeff. (h_c) dapat dihitung menggunakan *Dittus-Boelter equation* yang dikombinasikan dengan persamaan dasar bilangan *Nusselt*.

$$N_{UD} = 0,024 Re_D^{4/5} Pr^n$$

$$N_{UD} = \frac{h_c l_g}{k}$$

Dimana $= N_u = \text{Nusselt number [---]}$

$= Re = \text{Reynolds number [---]}$

$= Pr = \text{Prandtl number [---]}$

$= h_c = \text{conventional heat transfer coefficient [kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C]}$

$= l_g = \text{characteristic length [m]}$

$= k = \text{thermal conductivity [kcal/m hr } ^\circ\text{C]}$

$= n = \text{exponent for heating/cooling [---]}$

Dittus-Boelter equation hanya berlaku untuk sistem dengan ketentuan berikut:

$$\left[\begin{array}{l} Re_D \geq 10000 \\ \frac{L}{D} \geq 10 \end{array} \right]$$

3.1 Mencari nilai bilangan Reynolds

$$Re = \frac{\rho v l_g}{\mu}$$

Dimana : ρ = density [gr/cm³]

v = gas velocity [cm/s]

l_g = characteristic length [cm]

μ = viscosity [gr/cm . s]

- Menghitung ρ_{gas}

$$\rho = A . B^{-(1-T/T_c)^n}$$

dimana : A, B, dan n = koefisien regresi untuk senyawa kimia

T = suhu [k]

T_C = suhu kritis [k]

komponen	Rumus Kimia	A	B	n	T (K)	Tc (K)	ρ (gr/ml)	ρ (g/cm ³)
Carbon Dioxide	CO ₂	0,46	0,26	0,29	1056,47	304,19	0,27	0,0003
Water	H ₂ O	0,35	0,27	0,29	1056,47	647,13	0,11	0,0001

Komponen	Fraksi Mol (x _i)	Densitas (ρ) g/cm ³	x _i . ρ (g/cm ³)
Karbon dioksida	0,7390	0,0003	0,0002
Air	0,2610	0,0001	0,0000
Total	1		0,0002

$$\rho_{\text{gas}} = 2,71\text{E-}04 \text{ g/cm}^3$$

- Menghitung gas velocity

$$v = 20 \text{ m/s}$$

$$= 2000 \text{ cm/s}$$

- Menghitung *characteristic length*

$$l_g = 6 \text{ cm}$$

$$= 0,06 \text{ m}$$

- Menghitung *viscosity* gas

Gunakan Hukum Wilke untuk mencari viscosity dari campuran gas.

$$\mu_{mix} = \sum_i \frac{x_i \mu_i}{x_i \sum_{j=1}^n (x_j \phi_{ij})}$$

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8 \left[1 + \frac{M_i}{M_j} \right]}}$$

Dimana μ_{mix} = viscosity of mixture gas [gr/cm s]
 x_i = mole fracton of component i [---]
 μ_i = viscosity of component i [gr/cm s]
 x_j = mole fracton of component j [---]
 μ_j = viscosity of component j [gr/cm s]
 ϕ_{ij} = interaction factor of i and j [---]
 M_i = molecular weight i [g/mol]
 M_j = molecular weight j [g/mol]

viscosity senyawa dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\mu = 1.109 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{T}}{\Omega_\mu}$$

Namun, untuk mempermudah, kami menggunakan bantuan dari situs NIST Chemistry Web

μ_{CO_2} = 4,2831E-05 Pa.s
 . = 4,2831E-04 gr/cm s
 μ_{H_2O} = 3,9795E-05 Pa.s
 . = 3,9795E-04 gr/cm s
 M_{CO_2} = 44,0095 gr/mol
 M_{H_2O} = 18,0153 gr/mol
 ϕ_{CO_2, H_2O} = 0,6380
 ϕ_{H_2O, CO_2} = 1,4481

$$\mu_{\text{mix}} = 2,6466\text{E-}04 \text{ gr/cm s}$$

$$Re = \frac{\rho v l_g}{\mu}$$

$$Re = 10170,0437$$

3.2 Mencari nilai bilangan Prandtl

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$

dimana : C_p = heat capacity [kJ/mol K]

μ = viscosity of gas [Pa.s]

k = thermal conductivity [W/m K]

- Menghitung C_p

$$C_p \text{ CO}_2 = 0,0371 \text{ kJ/mol K}$$

$$C_p \text{ H}_2\text{O} = 0,0336 \text{ kJ/mol K}$$

$$C_{p \text{ mix}} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot C_{p i}$$

$$C_p \text{ mix} = 0,0362 \text{ kJ/mol K}$$

- Menhitung k

thermal conductivity untuk tiap komponen:

$$k = \left(\hat{c}_p + \frac{5}{4} \frac{R}{M} \right) \mu$$

dimana : C_p = heat capacity [cal/g-mol K]

μ = viscosity of gas [gr/cm s]

R = ideal gas constant [cal/mol K]

M = molecular weight [g/mol]

$$C_p \text{ CO}_2 = 8,8671 \text{ cal/g-mol K}$$

$$C_p \text{ H}_2\text{O} = 8,0306 \text{ cal/g-mol K}$$

$$\mu \text{ CO}_2 = 4,2831\text{E-}04 \text{ gr/cm s}$$

$$\mu \text{ H}_2\text{O} = 3,9795\text{E-}04 \text{ gr/cm s}$$

$$R = 1,987 \text{ cal/mol K}$$

$$R = 1,987 \text{ cal/mol K}$$

$$M = 44,0095 \text{ gr/mol}$$

$$M = 18,0153 \text{ gr/mol}$$

$$k_{\text{CO}_2} = 0,0038 \text{ cal/ cm s K}$$

$$k_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0033 \text{ cal/ cm s K}$$

thermal conductivity gabungan :

$$k_{\text{mix}} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{x_{\alpha} k_{\alpha}}{\sum x_{\beta} \phi_{\alpha\beta}}$$

$$\phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_{\alpha}}{\mu_{\beta}} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_{\beta}}{\mu_{\alpha}} \right)^{1/4} \right]^2$$

$$\varphi_{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}} = 6,2110$$

$$\varphi_{\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2} = 9,3273$$

$$k_{\text{mix}} = 0,2185 \text{ cal/ cm s K}$$

$$k_{\text{mix}} = 91,4352 \text{ W/m K}$$

$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k}$$

$$\text{Pr} = 0,0105$$

- Menentukan *exponent for heating/cooling* (n)

dimana n = 0,4 untuk pemanasan ($T_s > T_m$) dan untuk pendinginan ($T_s < T_m$).
Persamaan ini telah dikonfirmasi secara eksperimental untuk rentang kondisi

$$n = 0,4$$

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad \dots (1)$$

$$Nu_D = \frac{h_c l_g}{k} \quad \dots (2)$$

Substitusi pers (2) ke pers (1)

$$\frac{h_c l_g}{k} = 0,023 Re^{4/5} Pr^n$$

$$h_c = 0,023 Re^{4/5} Pr^n \times \frac{k}{l_g}$$

$$h_c = 21,7272 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

4. Menentukan $(h_{rs})_{SH}$

$$(h_{rs})_{SH} = \frac{\epsilon_s(1 - \epsilon_g)\epsilon_H(4,88) \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{H0} + 273}{100} \right)^4 \right]}{T_s - T_{H0}}$$

Dimana : $(h_{rs})_{SH}$ = *radian heat transfer coeff., from inner surface of insulation cover to outer surface of retort* [kcal/m² hr °C]

ϵ_s = *emissivity permukaan S* [---]

T_s = *suhu permukaan S* [°C]

ϵ_g = *emissivity gas* [---]

ϵ_H = *emissivity permukaan H* [---]

T_{H0} = *suhu permukaan H0* [°C]

Dalam desain pendekatan praktis, nilai ϵ_S dianggap sama nilainya dengan ϵ_H .

$$\epsilon_s = 0,73$$

$$\epsilon_g = 0,105$$

$$\epsilon_H = 0,73$$

$$T_s = 600 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{H0} = 650 \text{ } ^\circ\text{C}$$

maka:

$$(h_{rs})_{SH} = 67,4705 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

5. Menentukan h_0

$$h_0 = h_c + h_{rg} + \frac{1}{\frac{1}{h_c + h_{rg}} + \frac{1}{(h_{rs})_{SH}}}$$

Dimana: h_0 = *heat transfer coefficient, outside of retort* [kcal/m² hr °C]

$$h_{rg} = 14,5687 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$h_c = 21,7272 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$(h_{rs})_{SH} = 67,4705 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$h_0 = 59,8960 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

6. Menentukan $(h_{rs})_{HC}$

$$(h_{rs})_{HC} = \frac{\varepsilon_H(1 - \varepsilon_g^*)\varepsilon_C(4,88) \left[\left(\frac{T_H + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_C + 273}{100} \right)^4 \right]}{T_H - T_C}$$

Dimana : $(h_{rs})_{HC}$ = *radian heat transfer coeff. from inner surface of retort to rotating solid layer, based on surface area of inner wall to which rotating solids contact* [kcal/m² hr °C]

ε_H = *emissivity permukaan H* [---]

ε_g^* = *ratio of tar fraction in gas* [---]

ε_C = *emissivity permukaan C* [---]

T_H = *suhu permukaan H* [°C]

T_C = *suhu permukaan padatan yang dipanaskan* [°C]

$$\varepsilon_H = 0,73$$

$$\varepsilon_g^* = 0 \quad (\text{diasumsikan nilainya} = 0)$$

$$\varepsilon_C = 0,73 \quad (\text{dalam desain praktis, } \varepsilon_H \text{ dan } \varepsilon_C \text{ dianggap nilainya sama})$$

$$T_H = 648,92 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{dihitung menggunakan metode numeris dengan variabel } T_{H0}, k, r \text{ dan } h_C) \quad \{\text{kode perhitungan menggunakan Matlab ada di sheet 'Info'}\}$$

$$T_C = 500 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$(h_{rs})_{HC} = 21,2668 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

7. Menentukan $(h_p)_{HC}$

$$(h_p)_{HC} = 1,13 \left[\frac{k_e \bar{\rho} C_s N}{x} \right]^{1/2}$$

Dimana : $(h_p)_{HC}$ = *heat transfer coefficient of wall surface, contacting with rotating solids* [kcal/m² hr °C]

k_e = *effective thermal conductivity of solids packet* [kcal/m hr °C]

$\bar{\rho}$ = *bulk density of solids* [kg/m³]

C_s = *specific heat of solids* [kcal/kg °C]

N = rotational speed [rpm]

χ = fraction of wall surface, which contacts rotating solid [---]

7.1 Menentukan Nilai χ

Nilai χ dapat diperoleh dari grafik, dengan mencari nilai γ terlebih dahulu.

$$\gamma = \frac{\pi R^2 \left(\frac{\psi}{360} \right) - \left(12 \sin \frac{\psi}{n} \right) \left(R \cos \frac{\psi}{2} \right)}{\pi R^2} = \frac{\psi}{360} - \frac{\sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\psi}{2}}{\pi}$$

Dimana : γ = volumetric fraction of bulk solids [---]

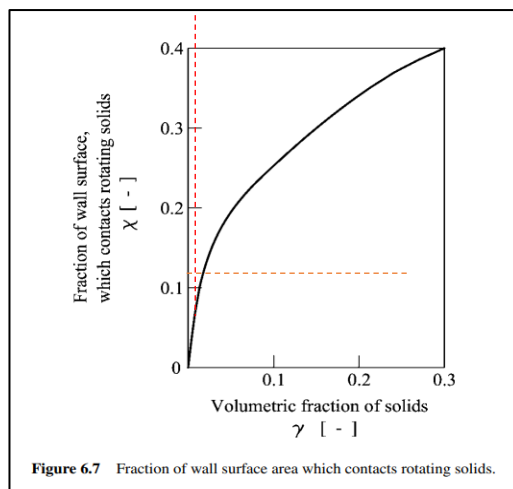
R = Radius [m]

ψ = angle against sliding layer [deg]

ψ = 45

R = 0,7620 m

γ = 0,0125



χ = 0,03

k_e = 0,5 kcal/m hr °C

$\dot{\rho}$ = 450 kg/m³

C_s = 0,17 kcal/kg °C

N = 2,3 rpm

(data k_e diambil dengan pendekatan asumsi berdasarkan referensi)

$$(h_p)_{HC} = 1,13 \left[\frac{k_e \bar{\rho} C_s N}{x} \right]^{1/2}$$

$$(h_p)_{HC} = 183,5772 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

8. Menentukan h_i

$$h_i = \frac{1}{\frac{\delta_{H0}}{k_{H0}} + \frac{\delta_{Hi}}{k_{Hi}} + \frac{1}{\chi [(h_{rs})_{HC} + (h_p)_{HC}]}}$$

Dimana : h_i = *heat transfer coefficient, inside of retort* [kcal/m² hr °C]

δ_{H0} = *thickness of retort* [m]

δ_{Hi} = *thickness of sticked solid layer* [m]

k_{H0} = *thermal conductivity of retort* [kcal/m hr °C]

k_{Hi} = *thermal conductivity of sticked solids layer* [kcal/m hr °C]

$$\delta_{H0} = 0,0120 \text{ m}$$

$$\delta_{Hi} = 0,008 \text{ m}$$

$$k_{H0} = 60,5417 \text{ kcal/m hr } ^\circ\text{C}$$

$$k_{Hi} = 0,258 \text{ kcal/m hr } ^\circ\text{C}$$

$$\chi = 0,03$$

$$(h_{rs})_{HC} = 21,2668 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$(h_p)_{HC} = 183,5772 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$h_i = 93,5912 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

9. Menentukan U

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_0}}$$

U = *overall heat transfer coefficient* [kcal/m² hr °C]

$$U = 36,5225 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

10. Menentukan T_{H0} dan T_S

$$T_{H0} = \frac{h_0 T_g + h_i T_c}{h_0 + h_i}$$

$$T_{H0} = 690,5640 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Menentukan T_S :

$$(h_c + h_{rg})(T_g - T_S) = (h_{rs})_{SH}(T_S - T_{H0})$$

$$T_S = 696,6358 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Masukkan nilai T_{H0} dan T_S ke persamaan awal untuk mencari nilai U yang baru.
(Perhitungan ada di sheet '6-Nilai U '))

$$U = 37,6539 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

H. Menentukan tebal *Refractory*

Hukum Fourier untuk laju perpindahan panas konduksi pada kondisi *steady state* satu arah di silinder :

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = -kA \frac{dT}{dr}$$

Jika persamaan di atas diintegrasikan, maka diperoleh :

$$\int_{r=r_1}^{r_2} \frac{\dot{Q}_{cond,cyl}}{A} = \int_{T=T_1}^{T_2} k dT$$

Substitusi nilai A dengan $2\pi L$

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = 2\pi L k \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)}$$

Karena terdapat 2 variabel yang tidak diketahui (Q dan r_2), maka digunakan pendekatan melalui heat transfer rate dari refractory ke lingkungan.

$$Q = h_0 2\pi r_2 L (T_2 - T_{ambient})$$

Gabungkan 2 persamaan diatas sehingga menjadi :

$$\frac{2\pi kL(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = h_0 \cdot 2\pi r_2 L \cdot (T_2 - T_{ambient})$$

$$\frac{k(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = h_0 \cdot r_2 \cdot (T_2 - T_{ambient})$$

$$\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \frac{k(T_1 - T_2)}{h_0 \cdot r_2 \cdot (T_2 - T_{ambient})}$$

dimana : r_2 = radius of kiln + insulation [m]

r_1 = radius of kiln [m]

k = thermal conductivity of insulation material [kcal/m hr °C]

h_0 = heat transfer coefficient, outside of retort [kcal/m² hr °C]

T_1 = TS (suhu permukaan S) [°C]

T_2 = suhu permukaan luar refractory [°C]

$T_{ambient}$ = suhu lingkungan [°C]

r_1 = 0,777 m

k = 0,086 kcal/m hr °C

h_0 = 62,9492 kcal/m² hr °C (data ada di sheet '6-Nilai U 2')

T_1 = 696,6358 °C

T_2 = 100 °C {umumnya, suhu setelah insulasi pada rotary kiln berkisar antara (100-150)°C}

$T_{ambient}$ = 30 °C

Walaupun semua data sudah diketahui, persamaan diatas sangat sulit untuk diselesaikan dengan cara sederhana karena tipenya persamaan transendental. Oleh karena itu, kami memutuskan untuk menggunakan metode numerik dengan *software Matlab*.

"Hasil r_2 yang diperoleh dari iterasi adalah 1.1 m. Namun, ada warning karena beberapa iterasi mengalami eror. Persamaan mungkin memiliki beberapa masalah konvergensi atau membutuhkan tebakan awal yang lebih baik. Dalam

beberapa kasus, persamaan transendental sulit diselesaikan untuk beberapa nilai tebakan (r_2) karena nilainya konstan sehingga fungsi tidak berubah untuk membuat fsolve mendapat hasil yang sesuai. Oleh karena itu, dilakukan simulasi berbasis grid search agar diperoleh nilai r_2 yang lebih sesuai. Berikut kode programnya:"

```
% Parameters given
T1 = 696,6358 ;      % °C
T2 = 100;            % °C
Tambient = 30;       % °C
r1 = 0,777 ;         % meters
k = 0.086;           % kcal/m·hr·°C
h0 = 62,9492;        % kcal/m²·hr·°C

% Define the function to solve
equation_bisect = @(r2) (k * (T1 - T2)) / log(r2 / r1) + h0 * r2 * (T2 - Tambient);

% Generate a range of r2 values between 1.1 and 3.0
r2_values = linspace(1.1, 3.0, 10000);
equation_values = zeros(size(r2_values));

% Calculate the equation values for each r2
for i = 1:length(r2_values)
    try
        equation_values(i) = equation_bisect(r2_values(i));
    catch
        equation_values(i) = NaN;
    end
end

% Find the r2 value where the equation value is closest to zero
[~, min_index] = min(abs(equation_values));
r2_solution_grid_search = r2_values(min_index);
```

% Display the result

```
fprintf('The calculated value of r2 is: %.4f meters\n', r2_solution_grid_search);
```

diperoleh:

$$r_2 = 0,927 \text{ m}$$

$$\text{Tebal Refractory} = (r_2 - r_1)$$

$$\text{Tebal Refractory} = 0,1500 \text{ m}$$

$$= 150,0372 \text{ mm (dapat diterima) \{Tebal refractory berkisar antara : (150-300)mm\}}$$

I. Menghitung Jumlah *Flight*

Jumlah flight pada rotary kiln berkisar antara 0.6 D hingga D.

$$0.6 D = 0,9144$$

$$D = 1,5239$$

Jumlah *flight* yang diambil adalah 2 flight

Tinggi *flight* bernilai 1/12 hingga 1/8 dari diameter. Dipilih nilai tengahnya, yaitu 1/10

$$\text{Tinggi } flight = 0,1524 \text{ m}$$

J. Menghitung Suhu Keluar Udara Pemanas

Untuk menghitung suhu keluar dari udara pemanas, kita dapat menggunakan prinsip keseimbangan energi dan perpindahan panas.

Laju energi yang hilang pada udara panas dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Q = \dot{m}_u c_p (T_{in} - T_{out})$$

keterangan: Q = heat transfer rate [kcal/hr]

$\dot{m}_u$ = mass flow rate for hot gas [kg/hr]

c_p = heat capacity [kcal/kg °C]

T_{in} = hot gas inlet temp [°C]

$$T_{out} = \text{hot gas outlet temp } [^{\circ}\text{C}]$$

Energi yang berpindah dari udara panas:

$$Q_{tr} = U A \Delta T$$

keterangan: $Q_{tr} = Q_{\text{transfer}}$; *heat transfer rate from hot gas to material* [kcal/hr]

$U = \text{overall heat transfer coefficient}$ [kcal/m² hr °C]

$A = \text{surface area of shell}$ [m²]

$\Delta T = (T_{in} - T_{feed})$ [°C]

Karena suhu luar kiln $\neq$ suhu lingkungan, maka ada heat loss yang perlu dihitung

$$Q_l = h_0 \dot{A} (T_2 - T_{ambient})$$

keterangan: $Q_l = Q_{\text{loss}}$; *heat loss to environment* [kcal/hr]

$h_0 = \text{heat transfer coefficient, outside of retort}$ [kcal/m² hr °C]

$\dot{A} = \text{surface area of refractory}$ [m²]

$T_2 = \text{suhu permukaan luar refractory}$ [°C]

$T_{ambient} = \text{suhu lingkungan}$ [°C]

$$Q = Q_{tr} + Q_l$$

$$\dot{m}_u c_p (T_{in} - T_{out}) = U A \Delta T + h_0 \dot{A} (T_2 - T_{ambient})$$

$$T_{out} = T_{in} - \frac{U A \Delta T + h_0 \dot{A} (T_2 - T_{ambient})}{\dot{m}_u c_p}$$

Menentukan nilai $\dot{m}_u$:

Diketahui data:

diameter pipa gas (*breadth of channels for gas flow*) 0,03 m

average gas velocity 20 m/s

$$\dot{m}_u = \rho \tilde{V}$$

Keterangan : $\rho = \text{density}$ [kg/m³]

$\tilde{V} = \text{volumetric flow rate}$ [m³/hr]

$$\rho = 2,24 \text{ kg/m}^3$$

$$\tilde{V} = 508,9380 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\dot{m}_u = 1141,5326 \text{ kg/hr}$$

$$U = 37,6539 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$A = 4,7876 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = 633,3271 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_0 = 62,9492 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{A} = 5,8245 \text{ m}^2$$

$$T_2 = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{ambient}} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_p = 0,2325 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

$$T_{out} = T_{in} - \frac{U A \Delta T + h_0 \dot{A} (T_2 - T_{\text{ambient}})}{\dot{m}_u c_p}$$

$$T_{out} = 256,455102 \text{ } ^\circ\text{C}$$

K. Menhitung Daya yang Dibutuhkan

untuk pengering putar atau bagian kiln dengan pengangkat

$$bhp = \frac{N(4,75dw + 0,1925DW + 0,33W)}{100000}$$

dimana : bhp = *brake horsepower* (1 bhp = 0.75 kW)

 N = *rotational speed* [rpm]

 d = *shell diameter* [ft]

 w = *live load material* [lb]

 D = *riding-ring diameter* [ft]

 W = *total rotating load (equimpent + material)* [lb]

$$N = 2,3 \text{ rpm}$$

$$d = 5 \text{ ft}$$

$$w = 14928,0555 \text{ lb}$$

$$D = 7 \text{ ft}$$

$$W = 142735,7440 \text{ lb}$$

$$\text{bhp} = 13,6616$$

$$= 10,2462 \text{ kW}$$

1. Menghitung Nilai w

$$w = 6770,0932 \text{ kg}$$

$$= 14928,0555 \text{ lb}$$

2. Menghitung Nilai D

Untuk mempermudah, nilai D diestimasi :

$$D = (d+2)$$

$$D = 7$$

3. Menghitung Nilai W

$$W = \text{berat material} + \text{equipment}$$

3.1 Berat Material

$$\text{Berat material} = 14928,0555 \text{ lb}$$

3.2 Berat *Equipment*

- Berat Shell Rotary Kiln

$$\begin{aligned}\text{Volume shell} &= A.t \\ &= 2\pi rL.t \\ &= 1,050308584 \text{ m}^3\end{aligned}$$

dimana :

$$\begin{aligned}r &= \text{radius of shell [m]} \\ L &= \text{length of reactor [m]} \\ t &= \text{thickness of shell [m]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Density of shell} &= 8,89 \text{ gr/cm}^3 \\ &= 8890 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Berat shell} &= \rho.V \\ &= 9337,2433 \text{ kg} \\ &= 20588,6215 \text{ lb}\end{aligned}$$

- Berat *Refractory*

$$\text{Volume refractory} = \text{volume kiln (include insulation)} - \text{volume shell}$$

$$\begin{aligned}\text{volume kiln} &= A.t \\ &= 2\pi rL.t \\ &= 17,2588 \text{ m}^3\end{aligned}$$

dimana :

$$\begin{aligned}r &= \text{radius of shell+refractory [m]} \\ L &= \text{length of reactor [m]} \\ t &= \text{thickness of shell+refractory [m]}\end{aligned}$$

$$\text{Volume refractory} = 16,2085 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned}\rho \text{ refractory} &= 3 \text{ gr/cm}^3 \\ &= 3000 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

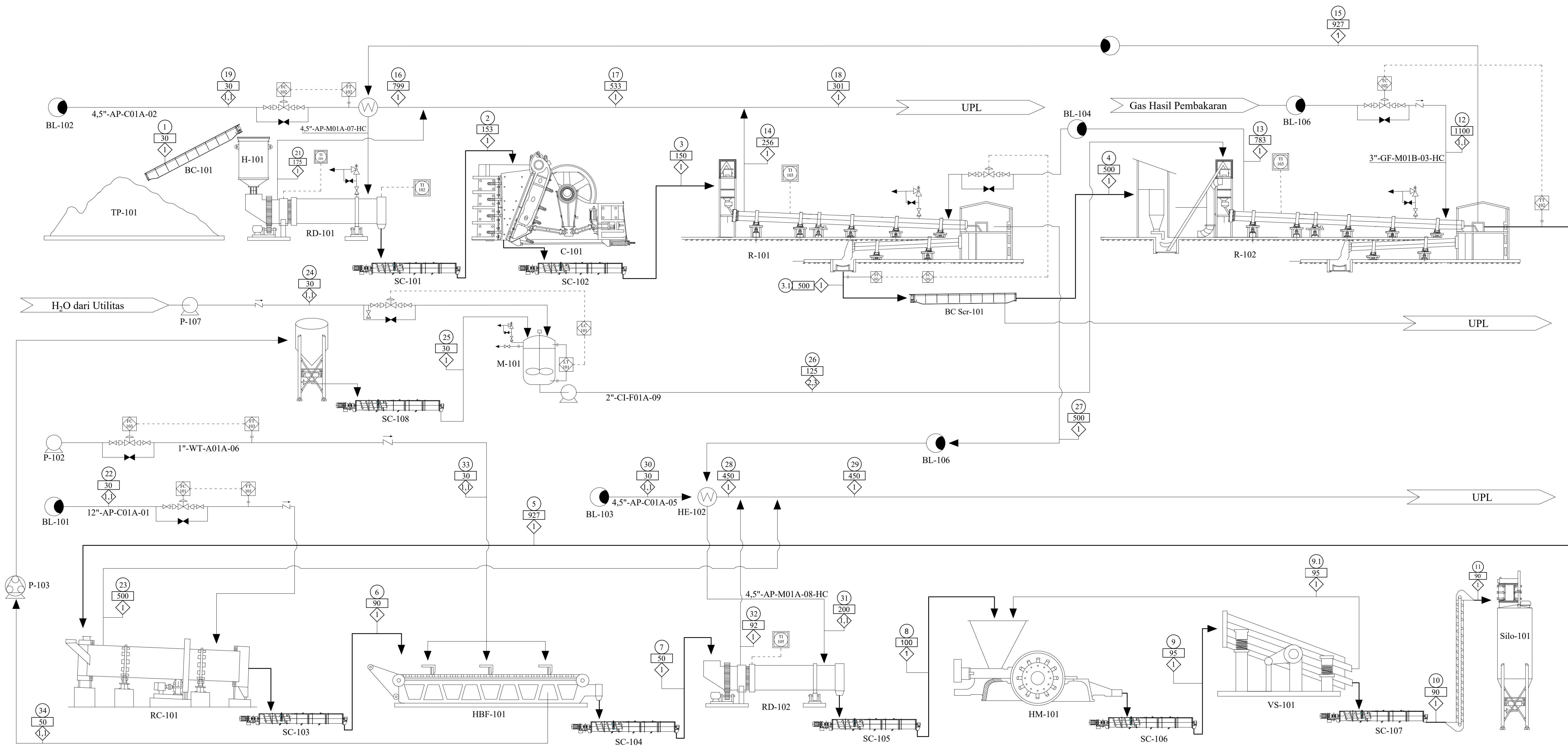
$$\begin{aligned}\text{Berat refractory} &= \rho.V \\ &= 48625,4272 \text{ kg} \\ &= 107219,067 \text{ lb}\end{aligned}$$

Berat *equipment* = 127807,6885 lb

W = 142735,7440 lb

Diperlukan sebesar 10,3 kW/jam untuk mengoperasikan *rotary kiln*

PRARANCANGAN PABRIK KARBON AKTIF DARI CANGKANG KELAPA SAWIT

[illegible]

SIMBOL

- | | | | |
|---|-------------------------|---|--------------------------|
|  | = Nomor Arus |  | = Relief valve |
|  | = Suhu |  | = Gate valve |
|  | = Tekanan |  | = Flange |
|  | = Bleeder valve |  | = Check valve |
|  | = Close Gate valve |  | = Jalur Pipa |
|  | = Control valve |  | = Arah Arus (Tanpa Pipa) |
|  | = Selectable Compressor |  | = Kabel |

KETERANGAN

- | | | | |
|----|---------------------------|--------|---------------------------------|
| TP | = Tempat Penyimpanan | BC Scr | = <i>Belt Conveyor + Screen</i> |
| BC | = <i>Belt Conveyor</i> | HBf | = <i>Horizontal Belt Filter</i> |
| RD | = <i>Rotary Dryer</i> | UPL | = Unit Pengolah Limbah |
| SC | = <i>Screw Conveyor</i> | BE | = <i>Bucket Elevator</i> |
| RC | = <i>Rotary Cooler</i> | H | = <i>Hopper</i> |
| HM | = <i>Hammer Mill</i> | C | = <i>Crusher</i> |
| VS | = <i>Vibrating Screen</i> | R | = Reaktor |
| BL | = <i>Blower</i> | P | = Pompa |



PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2025

PROCESS FLOW DIAGRAM
PRARANCANGAN PABRIK KARBON AKTIF DARI CANGKANG K
DENGAN KAPASITAS 12.000 METRIK TON/TAHUN

FAJARUDDIN AL HAFIDH	BIMA PANJIWI
20521132	20521136
MAHASISWA 1	MAHASISWA

Dr. Ifa Puspasari, S.T., M.Eng.

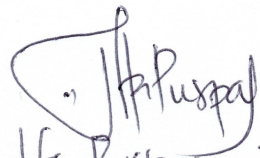
PEMBIMBING

KARTU KONSULTASI BIMBINGAN PRA RANCANGAN PABRIK

Nama Mahasiswa 1 : Fajardien Al Hafidh Eka Pribadi
 No. Mahasiswa 1 : 20521132
 Nama Mahasiswa 2 : Bima Panjuruhan
 No. Mahasiswa 2 : 20521136
 Judul Pra rancangan Pabrik : Pra Rancangan Pabrik Karbon aktif dari Cangkang Kelapa Sawit Dengan aktivasi Kimia (KOH) Pada kapasitas 12.000 metrik ton/tahun
 Mulai Masa Bimbingan : 24 November 2023
 Selesai Masa Bimbingan : 15 Mei 2025

No	Tanggal	Materi Bimbingan	Paraf Dosen
1	24/11/2023	Lecran 1 - perancangan kapasitas pabrik	
2	19/01/2024	Lecran 2 - kinetika dan termodinamika	
3	19/01/2024	Lecran 3 - spek bahan baku & produk	
4	19/01/2024	Lecran 4 - Diagram alir kualitatif	
5	29/06/2024	Lecran 5 - Neraca massa	
6	10/09/2024	Lecran 6 - Perancangan reaktor	
7	11/09/2024	Lecran 7 - Perancangan alat pemisah	
8	12/09/2024	Lecran 8 - PFD	
9	18/02/2025	Lecran 9 - alat penyimpanan	
10	18/02/2025	Lecran 10 - Alat transportasi	
11	25/02/2025	Lecran 11 - Alat penular panas	
12	5/05/2025	Lecran 12 - Neraca Pangs	
13	5/05/2025	Lecran 13 - lokasi, tata letak, dll	
14	7/05/2025	Lecran 14 - Utilitas	
15	15/05/2025	Lecran 15 - evaluasi ekonomi	
16	15/05/2025	Lecran 16 - Masalah terakhir	

Disetujui Draft Penulisan :
 Yogyakarta, 16 Mei 2025
 Pembimbing,


 (Ika Puspasari)

Catatan:

- Kartu Konsultasi Bimbingan dilampirkan pada Laporan Pra Rancangan Pabrik
- Kartu Konsultasi Bimbingan dapat difotocopy