

**PRA RANCANGAN
PABRIK PEMBUATAN TRIKLOOROSILANA
KAPASITAS 140.000 TON/TAHUN**



SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat mengikuti
Ujian Sarjana pada Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya**

Bonfilio Shaquille Gunawan

NIM 03031382025118

**JURUSAN TEKNIK KIMIA FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

2024

HALAMAN PENGESAHAN

**PRA RANCANGAN
PABRIK PEMBUATAN TRIKLOROSILANA
KAPASITAS 140.000 TON/TAHUN**

SKRIPSI

**Diajukan untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana**

Oleh :

BONFILIO SHAQUILLE GUNAWAN 03031382025118

telah disetujui di Palembang,

2025

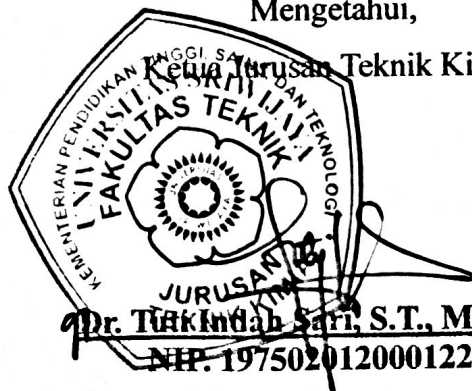
Dosen Pembimbing,



Dr. Ir. David Bahrin, S.T., M.T.
NIP. 198110312005011003

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Kimia



Dr. Tiak Indah Sari, S.T., M.T., IPM
NIP. 197502012000122001

HALAMAN PERSETUJUAN


Karya tulis ilmiah berupa Skripsi dengan judul “Pra Rancangan Pabrik Pembuatan Triklorosilana Kapasitas 140.000 Ton/Tahun” telah dipertahankan Bonfilio Shaquille Gunawan di hadapan Tim Penguji Sidang Tugas Akhir Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada tanggal 24 Desember 2024.

Palembang, 2025

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah berupa Skripsi

1. Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Haryati, DEA
NIP. 195610241981032001
2. Ir. Bazlina Dawami Afrah, ST., MT., M.Eng
NIP. 199001272023212033
3. Dr. Budi Santoso, ST., MT
NIP. 197706052003121004

)

()

()

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Kimia



Dr. Tuti Indah Sari, S.T., M.T., IPM
NIP. 197502012000122001

Palembang, 2025

Pembimbing Tugas Akhir



Dr. Ir. David Bahrin, S.T., M.T
NIP. 198110312005011003

HALAMAN PERBAIKAN

Dengan ini menyatakan bahwa :

Bonfilio Shaquille Gunawan

03031382025118

Judul :

“PRA RANCANGAN PABRIK PEMBUATAN TRIKLOROSILANA KAPASITAS 140.000 TON/TAHUN”

Mahasiswa tersebut telah menyelesaikan tugas perbaikan yang diberikan pada Sidang Sarjana di Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada hari Selasa, tanggal 24 Desember 2024 oleh Dosen Penguji :

1. Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Haryati, DEA
NIP. 195610241981032001



2. Ir. Bazlina Dawami Afrah, S.T., M.T., M.Eng
NIP. 199001272023212033



3. Dr. Budi Santoso, S.T., M.T
NIP. 197706052003121004



Palembang,

2025

Mengetahui,

Pembimbing Tugas Akhir



Dr. Ir. David Bahrin, S.T., M.T.
NIP. 198110312005011003

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Bonfilio Shaquille Gunawan
NIM : 03031382025118
Judul Tugas Akhir : *Pra Rancangan Pabrik Pembuatan Triklorosilana*
Kapasitas 140.000 Ton/Tahun
Fakultas / Jurusan : Teknik / Teknik Kimia

Menyatakan bahwa Skripsi ini merupakan hasil karya saya didampingi Pembimbing dan bukan hasil jiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku. Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.



Palembang,

2025



Bonfilio Shaquille Gunawan

NIM. 03031382025118

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami ucapkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas ridhanya penulis dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir ini yang berjudul “Pra Rancangan Pabrik Pembuatan Triklorosilana dengan Kapasitas 140.000 Ton/Tahun”.

Penulisan Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat mengikuti ujian sidang kelulusan gelar Sarjana di Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Penulis menyadari bahwa penulisan Tugas Akhir ini tidak dapat terselesaikan tanpa adanya dukungan, bimbingan, nasehat dari berbagai pihak selama penyusunan Tugas akhir ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

- 1) Allah SWT dengan segala rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir di Jurusan Teknik Kimia Universitas Sriwijaya sehingga lancar dan diberkahi;
- 2) Kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan dukungan baik secara materi maupun moral.;
- 3) Dr. Ir. David Bahrin, S. T., M. T. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah membantu banyak dipenulisan laporan ini;
- 4) Dr. Tuti Indah Sari, S.T, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya;
- 5) Dr. Fitri Hadiah, S.T, M. T., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya;
- 6) Seluruh Dosen Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya;
- 7) Seluruh staff Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya;
- 8) Angkatan Teknik Kimia 2020 Kampus Palembang dan Indralaya terutama rekan saya Bayaraka Kalima teman seperjuangan yang telah kebersamai suka dan duka selama penulis menjalani masa studi;
- 9) Teman-teman SMA yang selalu memberikan semangat dalam menjalani hidup dan menyelesaikan studi sarjana saya sampai sekarang.

Dalam penulisan Tugas Akhir ini mungkin masih banyak kekurangan dan kesalahan. Penulis berharap agar Tugas Akhir dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Palembang, 24 Desember 2024

Penulis

ABSTRAK

PRA RANCANGAN PABRIK PEMBUATAN TRIKLOSILANA KAPASITAS 140.000 TON/TAHUN

Karya tulis ilmiah berupa Skripsi, Desember 2024.

Bonfilio Shaquille Gunawan ; Dibimbing Oleh Dr. Ir. David Bahrin, S.T., M.T..

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

RINGKASAN

Pabrik pembuatan Triklorosilana dengan kapasitas produksi 140.000 ton/tahun ini direncanakan berdiri pada tahun 2028 di kota Tangerang, Provinsi Banten, Kabupaten erang yang diperkirakan memiliki luas area sebesar 7,9 Ha. Pada pembuatan Triklorosilan ini mengacu pada Patent US2020/0339427A1 dengan proses Hidroklorinasi Hidrogen Klorida dengan bahan baku Si dan HCl. Reaktor yang digunakan adalah reaktor jenis *Fluidized Bed Reactor*. Reaktor ini beroperasi pada temperatur 330°C dan tekanan 6,9 atm.

Bentuk perusahaan yang akan digunakan pada pabrik ini adalah Perseroan Terbatas (PT) dengan sistem organisasi *Line* dan *Staff*, dipimpin oleh seorang Direktur dengan total karyawan 245 orang. Berdasarkan hasil analisa ekonomi, pabrik Triklorosilana ini layak untuk didirikan karena telah memenuhi berbagai macam persyaratan parameter ekonomi, yaitu sebagai berikut :

- Total Capital Invesmnet (TCI) = US\$ 42.538.627,0518
- Total Penjualan Pertahun = US\$ 157.954.544,2931
- *Annual Cash Flow* = US\$ 32.278.288,477
- *Pay Out Time* = 1 Tahun
- *Rate of Return* = 45,66 %
- *Break Even Point* = 29,2058 %
- *Service Life* = 11 Tahun

Kata kunci: Triklorosilana, Hidroklorinasi, *FBR*, Silikon Metalurgi.

ABSTRACT

PRELIMINARY DESIGN OF A TRICHLOROSILANE MANUFACTURING PLANT WITH A CAPACITY OF 140,000 TONS PER YEAR

Scientific paper in the form of a Thesis, December 2024

Bonfilio Shaquille Gunawan ; Supervised by Dr. Ir. David Bahrin, S.T., M.T

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

SUMMARY

The construction of a Trichlorosilane manufacturing plant with a production capacity of 140,000 tons per year is planned to commence in 2028 in the city of Tangerang, Banten Province, Erang District, which is estimated to have an area of 7,9 hectares. The production of Trichlorosilane is based on Patent US2020/0339427A1, using the Hydrochlorination process with raw materials Si and HCl. The reactor employed is a Fluidized Bed Reactor operating at a temperature of 330°C and a pressure of 6.9 atm.

The company structure to be utilized in this factory will be a Limited Liability Company (PT) with a Line and Staff organizational system, led by a Director with a total of 245 employees. Based on the results of economic analysis, the Trichlorosilane plant is deemed feasible for establishment as it has met various economic parameter requirements, as follows

- *Total Capital Invesmnet (TCI) = US\$ 42.538.627,0518*
- *Total Annual Sales = US\$ 157.954.544,2931*
- *Annual Cash Flow = US\$ 32.278.288,477*
- *Pay Out Time = 1 Tahun*
- *Rate of Return = 45,66 %*
- *Break Even Point = 29,2058 %*
- *Service Life = 11 Tahun*

Kata kunci: *Triklorosilana, Hidroklorinasi, FBR, Silikon Metalurgi.*

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
KATA PENGANTAR	ii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xxiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Sejarah dan Perkembangan	2
1.3. Macam Proses Pembuatan	2
1.3.1. Proses Hidroklorinasi Hidrogen Klorida (HCl).....	2
1.3.2. Proses Hidrogenasi Thermal Tetraklorosilana (STC)	3
1.4. Pemilihan Proses.....	4
1.5. Sifat Fisika dan Sifat Kimia.....	5
1.5.1. Bahan Baku	5
1.5.2. Produk.....	7
BAB II PERENCAAN PABRIK	10
2.1. Alasan Pemilihan Pabrik.....	10
2.2. Penentuan Kapasitas	12
2.3. Pemilihan Bahan Baku.....	13

2.4.	Uraian Proses	13
2.4.1.	Tahapan Feed Treating	13
2.4.2.	Tahapan Sintesa Triklorosilana (SiHCl_3)	14
2.4.3.	Tahapan Separasi antara Produk dan <i>Impurities</i>	14
2.4.4.	Tahapan Purifikasi antara Produk dan <i>Impurities</i>	15
2.5.	Tinjauan Termodinamika.....	17
BAB III LOKASI DAN LETAK PABRIK		21
3.1.	Lokasi Pabrik	21
3.1.1.	Ketersediaan Bahan Baku.....	23
3.1.2.	Transportasi dan Pemasaran.....	23
3.1.3.	Ketersediaan Utilitas	24
3.1.4.	Tenaga Kerja	24
3.1.5.	Keadaan Iklim	25
3.2.	Tata Letak Pabrik.....	25
3.3.	Perkiraan Luas Area.....	28
BAB IV NERACA MASSA DAN NERACA PANAS.....		29
4.1.	Neraca Massa.....	29
4.1.1.	Neraca Massa Vaporizer (VP-01)	29
4.1.2.	Neraca Massa Knock Out Drum (KOD-01).....	29
4.1.3.	Neraca Massa Reaktor (R-01)	30
4.1.4.	Neraca Massa Cyclone Separator (CY-01)	30
4.1.5.	Neraca Massa Partial Condenser (PC-01)	31
4.1.6.	Neraca Massa Knock Out Drum (KOD-02).....	31
4.1.7.	Neraca Massa Kolom Destilasi (KD-01).....	32
4.1.8.	Neraca Massa Condenser (CD-01).....	32

4.1.9. Neraca Massa Accumulator (ACC-01)	33
4.1.10. Neraca Massa Reboiler (RB-01)	33
4.1.11. Neraca Massa Kolom Destilasi (KD-02).....	34
4.1.12. Neraca Massa Condenser (CD-02).....	35
4.1.13. Neraca Massa Accumulator (ACC-02)	35
4.1.14. Neraca Massa Reboiler (RB-02)	36
4.2. Neraca Panas	36
4.2.1. Neraca Panas Vaporizer-01 (VP-01)	36
4.2.2. Neraca Panas Knock Out Drum (KOD-01).....	36
4.2.3. Neraca Panas Furnace-01 (F-01)	37
4.2.4. Neraca Panas Reaktor-01 (R-01).....	37
4.2.5. Neraca Panas Cylcone Separator (CY-01)	37
4.2.6. Neraca Panas Chiller (CH-01).....	37
4.2.7. Neraca Panas Chiller (CH-02).....	38
4.2.8. Neraca Panas Partial Condenser (PC-01).....	38
4.2.9. Neraca Panas Knock Out Drum (KOD-02).....	38
4.2.10. Neraca Panas Heater -01 (H-01).....	38
4.2.11. Neraca Panas Kolom Destilasi-01 (KD-01)	39
4.2.12. Neraca Panas Condensor 01 (CD-01).....	39
4.2.13. Neraca Panas Cooler 01 (C-01)	39
4.2.14. Neraca Panas Reboiler 01 (RB-01)	39
4.2.15. Neraca Panas Kolom Destilasi-02 (KD-02)	40
4.2.16. Neraca Panas Condensor 02 (CD-02).....	40
4.2.17. Neraca Panas Cooler 02 (C-02).....	40
4.2.18. Neraca Panas Reboiler 02 (RB-02)	40

BAB V UTILITAS.....	41
5.1. Unit Pengadaan Steam	41
5.1.1. <i>Steam</i> Pemanas	41
5.1.2. <i>Steam</i> Penggerak Turbin.....	42
5.2. Unit Pengadaan Air.....	42
5.2.1. Air Pendingin	42
5.2.2. Air Umpan Boiler.....	45
5.2.3. Air Domestik.....	45
5.2.4. Kebutuhan Air Keseluruhan.....	46
5.3. Unit Pengadaan Refrigeran.....	47
5.4. Unit Pengadaan Listrik	48
5.4.1. Listrik untuk Peralatan	48
5.4.2. Listrik untuk Penerangan	48
5.5. Unit Pengadaan Bahan Bakar	50
5.5.1. Bahan Bakar Keperluan <i>Boiler</i>	50
5.5.2. Bahan Bakar Keperluan Generator	52
5.5.3. Kebutuhan Bahan Bakar Keseluruhan	52
BAB VI SPESIFIKASI PERALATAN	53
6.1. ACCUMULATOR-01 (ACC-01).....	53
6.2. ACCUMULATOR-02 (ACC-02).....	54
6.3. CONDENSER-01 (CD-01).....	55
6.4. CONDENSER-02 (CD-02).....	56
6.5. CHILLER-01 (CH-01).....	57
6.6. CHILLER-02 (CH-02).....	58
6.7. COOLER-01 (C-01)	59

6.8.	COOLER-02 (C-02)	60
6.9.	CYCLONE-01 (CY-01).....	61
6.10.	FURNACE (F-01).....	62
6.11.	HEATER (H-01).....	63
6.12.	KOMPRESOR (K-01)	64
6.13.	KOLOM DESTILASI (KD-01).....	65
6.14.	KOLOM DESTILASI (KD-02).....	67
6.15.	KNOCK OUT DRUM (KOD-01)	69
6.16.	KNOCK OUT DRUM (KOD-02)	70
6.17.	POMPA (P-01)	70
6.18.	POMPA (P-02)	72
6.19.	POMPA (P-03)	73
6.20.	PARTIAL CONDENSER (PC-01).....	74
6.21.	PNEUMATIC CONVEYER (PV-01)	75
6.22.	REAKTOR (R-01)	76
6.23.	REBOILER (RB-01).....	77
6.24.	REBOILER (RB-02).....	78
6.25.	SILO (S-01)	79
6.26.	TANGKI (T-01).....	80
6.27.	TANGKI (T-02).....	81
6.28.	TANGKI (T-03).....	82
6.29.	VAPORIZER (VP-01)	83
BAB VII ORGANISASI PERUSAHAAN		84
7.1.	Bentuk Perusahaan.....	84
7.2.	Struktur Organisasi Perusahaan	85

7.2.1. Organisasi Garis atau Lini	85
7.2.2. Organisasi Lini dan Staf	86
7.2.3. Organisasi Fungsional	86
7.3. Tugas dan Wewenang	87
7.3.1. Dewan Komisaris	87
7.3.2. Direktur	87
7.3.3. Manager Teknik dan Produksi	88
7.3.4. Manager Personalia dan Umum	89
7.3.5. Manager Keuangan dan Pemasaran	90
7.3.6. Kepala Bagian	90
7.3.7. Kepala Seksi	90
7.3.8. Karyawan atau Operator	91
7.4. Sistem Kerja.....	91
7.4.1. Waktu Kerja Karyawan <i>Shift</i>	91
7.4.2. Waktu Kerja Karyawan <i>Non-Shift</i>	92
7.5. Penentuan Jumlah Karyawan.....	92
7.5.1. <i>Direct Operating Labor</i>	92
7.5.2. <i>Indirect Operating Labor</i>	94
BAB VIII ANALISIS EKONOMI	98
8.1. Profitabilitas (Keuntungan).....	98
8.1.1. Total Penjualan Produk	98
8.1.2. Perhitungan <i>Annual Cash Flow</i> (ACF)	98
8.2. Lama Waktu Pengembalian Modal.....	99
8.2.1. Perhitungan Depresiasi.....	99
8.2.2. Lama Pengangsuran Pengembalian Pinjaman.....	99

8.2.3. <i>Pay Out Time (POT)</i>	100
8.3. Total Modal Akhir	100
8.3.1. Net Profit Over Total Life of Project (NPOTLP).....	100
8.3.2. <i>Total Capital Sink (TCS)</i>	101
8.4. Laju Pengembalian Modal	101
8.4.1. <i>Rate of Return on Investment (ROR)</i>	101
8.5. Break Even Point (BEP)	102
8.5.1. Metode Matematis.....	102
8.5.2. Metode Grafis.....	102
BAB IX KESIMPULAN	105
DAFTAR PUSTAKA	106
LAMPIRAN	111

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Data Impor Triklorosilana	12
Tabel 3.1. Rincian Area Pabrik	28
Tabel 5.1. Kebutuhan <i>Saturated Steam</i> 200°C	41
Tabel 5.2. Kebutuhan Air Pendingin.....	43
Tabel 5.3. Kebutuhan Air Domestik	46
Tabel 5.4. Total Kebutuhan Air dan Pabrik	47
Tabel 5.5. Kebutuhan Refrigeran	47
Tabel 5.6. Kebutuhan Listrik Peralatan.....	48
Tabel 5.7. Total Kebutuhan Listrik Pabrik Triklorosilana.....	50
Tabel 5.8. Total Kebutuhan Bahan Bakar	52
Tabel 7.1. Pembagian Jadwal Kerja Karyawan <i>Shift</i>	92
Tabel 7.2. Perincian Jumlah Total Karyawan	95
Tabel 8.1. Total Penjualan Produk.....	98
Tabel 8.2. Rincian Angsuran Pengembalian Pinjaman	100
Tabel 8.3. Kesimpulan Analisa Ekonomi	104

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Kebutuhan Triklorosilana di Indonesia	12
Gambar 2.2. Flowsheet Pembuatan Triklorosilana	16
Gambar 3.1. Peta Rencana Pola Ruang Kota Serang	22
Gambar 3.2. Peta Rencana Letak Lahan Pabrik	23
Gambar 3.3. Layout Area Pabrik	26
Gambar 3.4. Tata Letak Peralatan Pabrik	27
Gambar 7.1. Struktur Organisasi Perusahaan	97
Gambar 8.1. Grafik <i>Break Even Point</i>	103

DAFTAR NOTASI

1. ACCUMULATOR

- C = Tebal korosi yang diizinkan, m
E = Efisiensi pengelasan, dimensionless
ID, OD = Inside diameter, Outside diameter, m
L = Panjang accumulator, m
P = Tekanan operasi, atm
S = Working stress yang diizinkan
t = Temperatur operasi, oC
V = Volume total, m³
V_s = Volume silinder, m³
W = Laju alir massa, kg/jam
 ρ = Densitas, lb/ft³

2. CHILLER, COOLER, HEATER, CONDENSOR, PARTIAL CONDENSER, REBOILER, VAPORIZER

- A = Area perpindahan panas, ft²
aa, ap = Area pada annulus, inner pipe, ft²
as, at = Area pada shell, tube, ft²
a'' = external surface per 1 in, ft²/in ft
B = Baffle spacing, in
C = Clearance antar tube, in
D = Diameter dalam tube, in
De = Diameter ekivalen, in
f = Faktor friksi, ft²/in²
Ga = Laju alir massa fluida pada annulus, lb/jam.ft²
Gp = Laju alir massa fluida pada inner pipe, lb/jam.ft²
Gs = Laju alir massa fluida pada shell, lb/jam.ft²
Gt = Laju alir massa fluida pada tube, lb/jam.ft²
g = Percepatan gravitasi
h = Koefisien perpindahan panas, Btu/jam.ft².oF

h_i, h_o = Koefisien perpindahan panas fluida bagian dalam dan luar tube
 ID = Inside Diameter, ft
 jH = Faktor perpindahan panas
 k = Konduktivitas termal, Btu/jam.ft².oF
 L = Panjang tube, pipa, ft
 $LMTD$ = Logarithmic Mean Temperature Difference, oF
 N = Jumlah baffle
 N_t = Jumlah tube
 OD = Outside Diameter, ft
 PT = Tube pitch, in
 ΔP_r = Return drop shell, Psi
 ΔP_s = Penurunan tekanan pada shell, Psi
 ΔP_t = Penurunan tekanan tube, Psi
 ΔP_T = Penurunan tekanan total pada tube, Psi
 Q = Beban panas pada heat exchanger, Btu/jam
 R_d = Dirt factor, jam.ft².oF/Btu
 Re = Bilangan Reynold, dimensionless
 s = Specific gravity
 T_1, T_2 = Temperatur fluida panas inlet, outlet, oF
 t_1, t_2 = Temperatur fluida dingin inlet, outlet, oF
 T_c = Temperatur rata-rata fluida panas, oF
 t_c = Temperatur rata-rata fluida dingin, oF
 U_c, U_d = Clean overall coefficient, design overall coefficient, Btu/jam.ft².oF
 W = Laju alir massa fluida panas, lb/jam
 w = Laju alir massa fluida dingin, lb/jam
 μ = Viskositas, Cp

3. CYCLONE

B = Diameter keluaran partikel solid
 C = Tebal korosi yang diizinkan
 D_c = Diameter cyclone, m dan ft

D_i	= Diameter inlet cyclone, ft
D_p	= Diameter kritis partikel
E	= Efisiensi penyambungan, dimensionless
H	= Tinggi cyclone keseluruhan, m dan ft
H_c	= Panjang bagian cyclone yang tidak kerucut, ft
H_k	= Panjang bagian kerucut cyclone, ft
N_t	= Jumlah putaran cyclone akibat aliran gas masuk
P	= Tekanan Operasi, atm
Q	= Feed rate total
S	= Working stress yang diizinkan, Psia
s	= Diameter aliran gas keluaran cyclone, ft
T	= Temperatur Operasi, K
W	= Laju alir massa, kg/jam
ρ	= Densitas, kg/m ³

4. FURNACE

A	= Luas tube, ft ²
A_{cp}	= Cold plate area, ft ²
A_{cpw}	= Cold plate area tube wall, ft ²
$A_{r, a}$	= Luas area radian section, luas tube, ft ²
ϵ	= Emisivitas
F	= Faktor seksi konveksi
G	= Mass velocity pada minimum cross section, lb/s.ft ²
L	= Panjang tube, ft
L_{beam}	= Mean beam length, ft
N_t	= Jumlah tube
OD	= Diameter luar tube, in
Q_n	= Net heat release, Btu/jam
qL	= Tube heat loss
q_r	= Radian duty, Btu/jam
t_f, t_t	= Temperatur fluida, temperatur dinding, °F
ρ_g	= Densitas fuel gas, lb/ft ³

5. KOLOM DISTILASI

Ad	= Downcomer area, m ²
At	= Tower area, m ²
An	= Net area, m ²
Aa	= Active area, m ²
Ab	= Hole area, m ²
Ada	= Aerated area, m ²
C	= Faktor korosi yang dizinkan, m
Csb	= Kapasitas vapor, m/det
Dl	= Clearance, mm
dh	= Diameter hole, mm
dc	= Diameter kolom, mm
E	= Joint efficiency, dimensionless
e	= Total entrainment, kg/det
F	= Friction factor, dimensionless
Fiv	= Paramater aliran, dimensionless
H	= Tinggi kolom, m
ha	= Aerated liquid drop, m
hf	= Froth height, mm
hw	= Weir height, mm
h σ	= Weep point, cm
Lw	= Weir length
L	= Laju alir massa liquid solvent, kg/det
Nm	= Jumlah tray minimum
ΔP	= Pressure drop
P	= Tekanan desain, atm
q	= Laju alir volume umpan solvent, m ³ /det
Q	= Laju alir volume umpan gas, m ³ /det
R	= [L/D] reflux ratio, dimensionless
Rh	= Radius Hydrolic, m
Rm	= Refluks minimum

Reh	= Reynold modulus, dimensionless
S	= Working stress, N/m ²
S _s	= Stage umpan
St	= Jumlah stages
T	= Temperatur operasi, oC
T _{av}	= Temperatur rata-rata, oC
t	= Tebal dinding vessel, m
U _f	= Kecepatan aerated mass, U _f
V	= Laju alir massa umpan gas, kg/det
V _d	= Downcomer velocity, m/det
α	= Relatif volatil, dimensionless
Δ	= Liquid gradien, cm
ρ _g	= Densitas gas, kg/m ³
ρ _l	= Densitas liquid, kg/m ³
ψ	= Fractional entrainment, dimensionless

6. KOMPRESOR

C _{fm}	= Cubic feed per menit
k	= Spesific heat
N _s	= Jumlah stage
P _w	= Power yang dibutuhkan, HP
P	= Tekanan, Psi
R _c	= Ratio P _{out} /P _{in} , dimensionless
R _{ct}	= Ratio kompresi per stage, dimensionless
W	= Laju feed
ρ _v , ρ _l	= Densitas gas, liquid, kg/m ³

7. KNOCK OUT DRUM

A	= Vessel Area Minimum, m ²
C	= Corrosion maksimum, in
D	= Diameter Vessel minimum, m
E	= Joint efisiensi
HL	= Tinggi Liquid, m

HT	= Tinggi Vessel, m
P	= Tekanan desain, Psi
QV	= Laju alir Volumetric massa, m ³ /jam
QL	= Liquid Volumetric flowrate, m ³ /jam
S	= Working stress Allowable, Psi
t	= tebal dinding tangki, m
U _v	= Kecepatan uap maksimum, m/s
V _t	= Volume Vessel, m ³
V _h	= Volume Head, m ³
V _t	= Volume Vessel, m ³
μ	= Viskositas, cP
ρ	= Densitas, kg/m ³
ρ _g	= Densitas gas, kg/m ³
ρ _l	= Densitas Liquid, kg/m ³

8. PNEUMATIC CONVEYING

A	= Area alir pipa, in ²
Ma	= Flowrate udara, lb/sec
Ms	= Flowrate massa solid, lb/sec
Le	= Panjang elbow, ft
P	= Require motor driver, HP
W _f	= Total friction power, ft lbf/sec
ρ _a	= Densitas udara, lb/cu ft
ρ _m	= Densitas campuran, lb/cu ft
μ	= Kecepatan linear udara yang masuk, fps
ΔP	= Pressure drop, Psi

9. POMPA

A	= Area alir pipa, in ²
BHP	= Brake Horse Power, HP
D _{i opt}	= Diameter optimum pipa, in
E	= Equivalent roughness

f	= Faktor friksi
FK	= Faktor keamanan
g_c	= Percepatan gravitasi, ft/s ²
Gpm	= Gallon per menit
$H_f \text{ suc}$	= Total friksi pada suction, ft
$H_f \text{ dis}$	= Total friksi pada discharge, ft
H_{fs}	= Skin friction loss
H_{fsuc}	= Total suction friction loss
H_{fc}	= Sudden Contraction Friction Loss (ft lbf/lbf)
H_{fe}	= Sudden expansion friction loss (ft lbf/lbf)
ID	= Inside diameter pipa, in
KC, KS	= Contraction, expansion loss contraction, ft
L	= Panjang pipa, ft
L_e	= Panjang ekuivalen pipa, ft
NPSH	= Net Positive Suction Head (ft)
N_{Re}	= Reynold number, dimension less
PVp	= Tekanan uap, Psi
Q_f	= Laju alir volumetrik
V_f	= Kapasitas pompa, lb/jam
V	= Kecepatan alir
ΔP	= Beda tekanan, Psi

10. REAKTOR

A_c	= Cross sectional area
A_r	= Arquimedes Number
C_{Ao}	= konsentrasi awal umpan masuk, kmol/m ³
C	= Tebal korosi yang dizinkan, atm
D_p	= Diameter Partikel, m
D_{bm}	= Diameter maximum bubble
D_{bo}	= Diameter awal bubble
D_b	= Diameter efektif bubble
FA_o	= Laju alir umpan, kmol/jam

g	= Gravitasi
H	= Tinggi Reaktor, m
ID	= Inside Diameter, m
k	= Konstanta laju reaksi, mol/g-solid h Pa
K	= Konstanta Adsorpsi, /Pa
OD	= Outside Diameter, m
P	= Tekanan, atm
Q_f	= Volumetric Flowrate Umpan
r'	= laju reaksi kmol/kg-solid h
Re	= Bilangan Reynold
S	= Working Stress yang diizinkan, atm
T	= Temperatur. °C
t	= Tebal dinding vessel
U_b	= Velocity of a bubble rising through a bed, m/s
U_e	= Upward superficial velocity of gas through the emulsion
U_{mf}	= Kecepatan superficial gas at minimum fluidization, m/s
U_o	= Kecepatan gas pada <i>bottom fluidized bed</i> , m/s
V_s	= Volume partikel solid, m ³
V_r	= Volume reaktor, m ³
W_s	= Berat partikel solid
X	= Konversi
δ	= Bubble fraction on emulsion
ρ	= Densitas
ε	= Porositas
ε_{mf}	= Void fraction at minimum fluidization

11. TANGKI

C	= Tebal korosi yang diizinkan
D	= Diameter tangki, m
E	= Efisiensi penyambungan, dimensionless
h	= Tinggi head, m
H	= Tinggi silinder, m

HT	= Tinggi total tangki, m
P	= Tekanan Operasi, atm
S	= Working stress yang diizinkan, Psia
T	= Temperatur Operasi, K
t	= Lama persediaan/penyimpanan, hari
Vh	= Volume ellipsoidal head, m ³
Vs	= Volume silinder, m ³
Vt	= Volume tangki, m ³
W	= Laju alir massa, kg/jam
ρ	= Densitas, kg/m ³

12. SILO

C	= Faktor korosi, in
D	= Diameter shell, ft
d	= Diameter ujung konis, ft
E	= Welded joint efficiency
h	= Tinggi Kerucut, m
Ht	= Tinggi silo, m
H	= Tinggi Silinder, m
G	= Laju Alir Massa, kg/s
g	= Percepatan Gravitasi, m/s ²
P	= Tekanan, atm
S	= Allowance stress, psi
T	= Temperatur, K
Vt	= Volume tangki, m ³
Ws	= Laju alir massa, kg/jam
ρ	= Densitas, kg/m ³

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I	Perhitungan Neraca Massa.....	111
Lampiran II	Perhitungan Neraca Panas.....	155
Lampiran III	Perhitungan Spesifikasi Peralatan.....	204
Lampiran IV	Perhitungan Ekonomi.....	447
Lampiran V	Tugas Khusus	456

BAB I

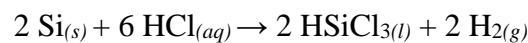
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia adalah negara berkembang yang sampai sekarang masih banyak melakukan kegiatan impor barang dari luar negeri. Upaya mengatasi hal tersebut Indonesia melakukan peningkatan yang mencakup semua bidang terutama pada bidang industri dengan cara meningkatkan kualitas agar dapat bersaing dengan industri yang ada di luar negeri. Pengembangan pada sector industri yang banyak dilakukan saat ini adalah industri kimia yang menghasilkan produk jadi maupun produk *intermediate* agar dapat digunakan secara luas, contohnya pada bidang farmasi dan elektronika. Peningkatan industri kimia diharapkan dapat berperan pada pertumbuhan ekonomi nasional agar meningkat setiap tahunnya. Peningkatan industri kimia bertujuan untuk menyediakan barang dan jasa yang berkualitas, memperluas lapangan pekerjaan, menunjang pembangunan daerah dan nasional, dan mengembangkan penguasaan teknologi. Pabrik pembuatan triklorosilana berpotensi mempunyai prospek yang besar jika dikembangkan di Indonesia. Triklorosilana merupakan cairan berwujud transparan yang tidak berwarna dengan bau yang menyengat pada temperatur normal, dan stabil hanya jika disimpan dalam wadah tertutup rapat. Triklorosilana bisa terurai menjadi gas asam klorida (HCl) dan silika ketika bereaksi dengan udara lembab. Triklorosilana mudah menyala dan terbakar ketika terkena udara. Triklorosilana digunakan untuk bahan baku *intermediate* pembuatan silikon polikristalin. Silikon polikristalin adalah produk yang mengandung kemurnian tinggi sehingga dapat digunakan saat penggunaan semikonduktor pada sel surya (Tokuyama, 2011). Sel surya atau pembangkit listrik tenaga matahari rencananya akan dijadikan sebagai energi alternatif pengganti energi fosil sebagai energi utama untuk saat ini yang semakin hari semakin menipis dan akan habis. Selain itu juga triklorosilana dimanfaatkan dalam pembuatan resin silikon, elemen diskrit seperti dioda listrik, dan *epitaxial wafers* yang dapat digunakan untuk *charge-coupled devices* (CCD) dan substrat IC tipe MOS

1.2. Sejarah dan Perkembangan

Senyawa triklorosilana pertama kali oleh Richard Müller dan Eugene G. Rochow yaitu pada tahun 1940 (Tazmania, 2019). Awal mula penemuan yaitu dengan proses mereaksikan silikon dengan hidrogen klorida dengan bantuan katalis tembaga pada suhu yang tinggi. Proses tersebut dinamakan Müller-Rochow. Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut :



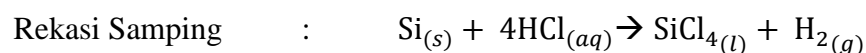
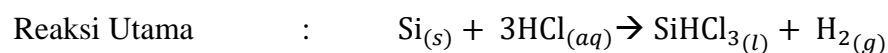
Reaksi tersebut menghasilkan produk utama yaitu trichlorosilane (HSiCl_3), dan produk samping berupa tetraklorida silikon (SiCl_4) dan dichlorosilane (H_2SiCl_2). Pemanfaatan triklorosilana terus dikembangkan dan semakin meluas setiap tahunnya dan banyak dimanfaatkan dalam industri kimia dan industri elektronika.

1.3. Macam Proses Pembuatan

Proses pembentukan triklorosilana melalui proses pereaksian antara HCl dan silikon pada suhu yang tinggi menggunakan katalis. Proses ini dinamakan sesuai nama penemunya yaitu proses Muller-Rochow. Seiring dengan perkembangan teknologi, proses pembuatan triklorosilana terus dikembangkan. Berikut ini berbagai proses pembuatan triklorosilana yang umum digunakan:

1.3.1. Proses Hidroklorinasi Hidrogen Klorida (HCl)

Proses pembentukkan triklorosilana yang menggunakan model ini, dilakukan dengan menambahkan bahan baku Metallurgical grade silikon (Mg-Si) yang direaksikan bersama dengan hidrogen klorida (HCl). Proses ini menghasilkan reaksi utama yaitu triklorosilana dan hidrogen, dan reaksi samping yang menghasilkan senyawa tetraklorosilana dan juga hidrogen. Reaksinya sebagai berikut:



Reaksi ini terjadi di dalam reaktor dengan temperatur berkisar antara 250-400°C. Reaktor yang digunakan adalah reaktor jenis *Fluidized Bed Reactor* (FBR) agar dapat mengoptimalkan proses *mixing* dan reaksi berlangsung cepat (Sudarsita, 2015). Proses ini juga dapat menggunakan katalis atau bisa tanpa bantuan katalis.

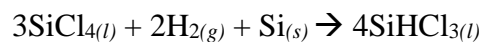
Katalis yang digunakan dalam proses ini berupa logam seperti tembaga, besi, nikel, titanium, aluminium, kobalt dan platinum.

Produk keluaran dari reaktor FBR yang berasal dari reaksi utama maupun reaksi samping berupa produk gas, triklorosilana (TCS), tetraklorosilana (STC), dan impuritas berupa boron. Kemurnian produk utama berupa triklorosilana dapat ditingkatkan dalam proses pemurnian dengan cara distilasi.

Adapun kelebihan dari proses ini yaitu panas yang digunakan tidak terlalu tinggi sehingga dapat menghemat penggunaan energi. Bahan baku yang digunakan adalah HCl karena lebih mudah ditemukan di Indonesia dan harganya lebih murah jika dibandingkan dengan bahan baku tetraklorosilana (STC).

1.3.2. Proses Hidrogenasi Thermal Tetraklorosilana (STC)

Proses berikut ini membentuk triklorosilana dengan cara mereaksikan logam silikon dengan tetraklorosilana dan hidrogen. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :



Reaksi ini terjadi di dalam *Fluidized Bed Reactor* (FBR) menggunakan katalis jenis tembaga yang berupa bubuk, yaitu tembaga klorida atau silisida tembaga. Katalis yang digunakan dengan kadar 0,1% sampai 40% berat atau 0,2-20% berat terhadap silikon logam. Reaksi yang terjadi dalam reaktor ini dilakukan dengan temperatur yang tinggi yaitu kisaran antara 500-600 °C dan pada tekanan antara 15-30 BarG. Reaksi ini juga dapat berlangsung tanpa bantuan katalis dengan cara meningkatkan temperatur yang lebih besar lagi hingga >1000°C. Laju reaksi pada proses ini lebih kecil jika dibandingkan dengan laju reaksi pada proses menggunakan hidrogen klorida. Produk triklorosilana yang terbentuk berwujud gas, yang kemudian dikondensasi agar fasanya menjadi wujud cair.

1.4. Pemilihan Proses

Proses yang terdapat pada patent yang kami gunakan sebagai acuan menggunakan kedua proses diatas berdasarkan patent US 20200339427A1. Akan tetapi yang kami gunakan pada tugas pra rancangan pabrik pembuatan triklorosilana ini hanya hidroklorinasi HCl karena pada hasil produk akhir dengan menggunakan proses pertama yaitu hidroklorinasi HCl yang sudah membentuk produk triklorosilana sesuai dengan jumlah kapasitas yang diinginkan dan impurities berupa SiCl_4 dan H_2 sudah sangat sedikit. Jika menggunakan kedua proses tersebut maka akan menambah *cost* pembelian bahan baku dan alat serta membutuhkan energi yang lebih besar. Proses pembuatan triklorosilana dalam pra rencana pabrik ini dilakukan dengan menggunakan proses hidroklorinasi hidrogen klorida dilandaskan dengan beberapa pertimbangan yaitu:

1. Proses hidroklorinasi hidrogen klorida menggunakan bahan baku berupa HCl karena mudah di dapatkan dan pabrik yang produksi HCl terdapat di Indonesia.
2. Kelebihan dari proses hidroklorinasi hidrogen klorida adalah panas yang digunakan tidak terlalu tinggi sehingga dapat menghemat penggunaan energi dan proses ini dapat menggunakan katalis atau tanpa katalis.
3. Pabrik triklorosilana sebagai bahan baku polisilikon belum tersedia di Indonesia yang secara geografis terletak di sekitar garis khatulistiwa, sehingga pabrik triklorosilana dapat dikatakan berpotensi untuk dibangun.

1.5. Sifat Fisika dan Sifat Kimia

1.5.1. Bahan Baku

1. Metallurgical Grade Silicon

Rumus molekul	: Si
Berat molekul	: 60,08 g/mol
Densitas	: 2,3290 g/cm ³
Wujud	: Solid
Titik didih	: 3265 °C
Titik leleh	: 1414 °C
Kalor lebur	: 9.470 kal/mol
Kalor penguapan	: 85.745,714 kal/mol
Temperatur kritis	: 4920 °C
Tekanan kritis	: 1450 atm
C _p (298 K)	: 705 J/kg K
ΔH _f (298 K)	: 39,6 kJ/mol
Kelarutan	: 0,079 g/L dalam H ₂ O
Warna padatan	: Abu-abu tua

(Perry, 1997)

2. Boron

Rumus molekul	: B
Berat molekul	: 10,82
Densitas	: 2,08 g/cm ³
Wujud	: solid
Titik didih	: 2550 °C
Titik leleh	: 2300 °C
Kalor lebur	: 50,2 kJ/mol
Kalor penguapan	: 480 kJ/mol
C _p (298 K)	: 11,087 J/mol K
Kelarutan dalam air	: tidak larut dalam air

(Perry, 1997)

3. Alumunium

Rumus molekul : Al

Berat molekul : 26,97

Densitas : 2,7 g/cm³

Wujud : solid

Titik didih : 2056 °C

Titik leleh : 660 °C

Kalor lebur : 10,71 Kj/mol

Kalor penguapan : 294,0 Kj/mol

Temperatur kritis : 7,577 °C

Kelarutan dalam air : tidak larut

(Perry, 1997)

4. Besi

Rumus molekul : Fe

Berat molekul : 7,86 g/cm³

Densitas :

Wujud : solid

Titik didih : 2861 °C

Titik leleh : 1538 °C

Kalor lebur : 13,81 Kj/mol

Kalor penguapan :

Temperatur kritis : 8,227 °C

(Perry, 1997)

5. Hidrogen Klorida

Rumus molekul : HCl

Berat molekul : 36,461 g/mol

Densitas : 1,2 g/mL

Wujud : Gas

Titik didih : -85,05 °C

Titik leleh : -26 °C

Kalor lebur : 1,99 kJ/mol

Kalor penguapan : 16,1503 kJ/mol

Temperatur kritis : 50,35 °C

Tekanan kritis : 79,151 atm

C_p (298 K) : 29,14 J/mol K

ΔH_f (298 K) : -9,231 J/kmol

Kelarutan dalam air : Tercampur penuh

Bahaya : Korosif dan beracun

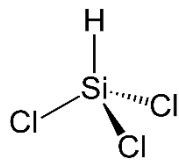
(National Institute of Standards and Technology, 2018)

1.5.2. Produk

1. Triklorosilana (TCS)

Rumus molekul : SiHCl₃

Rumus bangun :



Berat molekul : 134,44 g/mol

Densitas : 1,3417 g/cm³

Wujud : Liquid

Titik didih : 31,80 °C

Titik leleh : -126,6 °C

Kalor penguapan : 27,2 kJ/mol

Temperatur kritis : 205,85 °C

Tekanan kritis : 41,2 atm

C_p (298 K) : 0,5596 J/g°C

ΔH_f (298 K) : -539,3 kJ/mol

Kelarutan dalam air : Dekomposisi

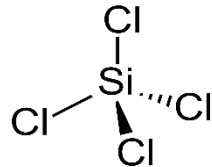
Bahaya : Korosif dan mudah terbakar

(Chase, 1998)

2. Tetraklorosilana (STC)

Rumus molekul : SiCl_4

Rumus bangun :



Berat molekul : 169,90 g/mol

Densitas : 1,48 g/cm³

Wujud : Liquid

Titik didih : 57,65 °C

Titik leleh : -68,74 °C

Kalor lebur : 7,72 kJ/mol

Kalor penguapan : 30,2 kJ/mol

Temperatur kritis : 233,9 °C

Tekanan kritis : 37 atm

C_p (298 K) : 145 J/mol K ΔH_f (298 K) : -687 kJ/mol

Kelarutan dalam air : Bereaksi

(National Library of Medicine, 2004)

3. Hidrogen

Rumus molekul : H_2

Berat molekul : 2,016 g/mol

Densitas : 38,487 mol/dm³

Wujud : Gas

Titik didih : -252,7 °C

Titik leleh : -259,1 °C

Kalor Lebur : 0,12 kJ/mol

Kalor penguapan : 0,90 kJ/mol

Temperatur kritis : -239,95 °C

Tekanan kritis : 12,83 atm

C_p (298 K) : 14,31 kJ/kg K

ΔH_f (298 K) : 218 kJ/kmol

(National Library of Medicine, 2004)

4. Air

Rumus molekul : H₂O

Berat molekul : 18,015 g/mol

Densitas : 0,998 gr/cm³

Wujud : Liquid

Titik didih : 100 °C

Titik leleh : 0 °C

Kalor lebur : 6,009 kJ/mol

Kalor penguapan : 40,656 kJ/mol

Temperatur kritis : 373,95 °C

Tekanan kritis : 217,75 atm

C_p (298 K) : 4182 J/kg°C

ΔH_f (298 K) :- 241,997 kJ/mol

(National Library of Medicine, 2004)

DAFTAR PUSTAKA

- Akiyoshi, A., Dan Aimoto, T. 2016. Process Producing Trichlorosilane. US 9,321,653 B2, Japan.
- Alibaba. 2021. Daftar Harga Bahan. (Online): Alibaba.com (Diakses pada 22 Desember 2023).
- Astriyanto, T. 2010. Analisis Lokasi Usaha Sector Informal Bidang Perdagangan dan Jasa di Lingkungan Kampus Universitas Negeri Semarang Desa Sekaran Kecamatan Gunungpati Kota Semarang. *Skripsi*. Universitas Negeri Semarang.
- Badan Pusat Statistika. 2020. (Online). <https://bps.co.id>. (Diakses pada 23 Desember 2023).
- Bank Indonesia. 2022. Suku Bunga Penjaminan. (Online). <https://www.bi.go.id/id/moneter/suku-bunga-penjaminan/Contents/Default.aspx>. (Diakses pada Tanggal 7 September 2023).
- Boundy, B., Diegel S. W., Wright, L., dan David, S. C. 2011. *Biomass Energy Data Book 4th Edition*. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory.
- Brownwell, L. E., dan Young, E. H. 1959. *Process Equipment Design*. New York: John Wiley & Sons.
- Chadwick, E. G., Beloshapkin, S., dan Tanner, D. A. 2012. Microstructural Characterisation of Metallurgical Grade Porous Silicon Nanosponge Particles. *Journal of Material Science*. 47(5):2396-2404.
- Chase, M. W. 1998. NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition. *Journal Physical Chem Ref Data Monograph 9*. 1-1951.
- Coulson dan Richardson's. 1999. *Chemical Engineering Volume 3 3rd Edition*. NewYork: Butterworth: Heineman.
- Coulson dan Richardson's. 2005. *Chemical Engineering Volume 6 4th Edition*. NewYork: Butterworth: Heineman.

- Couper, J. R., Penney, W. R., James, dan Walas, S. M. 2010. *Chemical Process Equipment Selection and Design Edisi 2*. New York: Butterworth-Heinemann.
- Dropka, N., Hesse, K., dan Lanh, H. D. 2006. Kinetic Studies on Trichlorosilane Synthesis. *Paper*. Trondheim, Norway.
- Emis. 2020. *Cyclone*. (Online). <https://emis.vito.be/en/bat/tools-overview/sheets/cyclone>. (Diakses pada 11 Oktober 2023).
- Evans, F. L. 1974. *Equipment Design for Refineries and Chemical Plant 2nd Edition*. Houston: Gulf Publishing Company Book.
- Felder, R. M. dan Rousseau, R. W. 2005. *Elementary Principles of Chemical Engineering 3rd Edition*. New York: John Wiley and Sons.
- Fogler, H. S. 2016. *Elements of Chemical Reaction Engineering 5th Edition*. New York: Prentice Hall.
- Gandhi, S.D., dkk. 2017. Process for Producing Trichlorosilane. US 9,796,594 B2, US.
- Google. 2021. Google Maps. (Online). <http://google.maps.com>. (Diakses pada Tanggal 4 September 2023).
- Hirota, K., dan Ogihara, K. 2020. Method for Production of Trichlorosilane and Device for Producing Trichlorosilane. US Patent 2020/0339427 A1, Yamaguchi.
- Hoel, dkk. 2008. Method for Production of Trichlorosilane and Silicon for Use In the Production of Trichlorosilane. US Patent 7,462,341, B2, Norway.
- Iqbal, M. 2020. Di Tengah Pandemi, Serang "Lepas" Predikat Pengangguran Terbanyak.(Online). <https://banten.idntimes.com/news/banten/muhammad-iqbal-15/di-tengah-pandemik-serang-lepas-predikat-pengangguran-terbanyak/1>.(Diakses pada 4 September 2023).
- Ismail, S. 1999. *Alat Industri Kimia*. Indralaya: Universitas Sriwijaya.
- Kern, D. Q. 1965. *Process Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill Book, Co.
- Kompas. 2021. Daftar UMK Serang. (Online): <https://money.kompas.com>. (Diakses pada 18 Oktober 2023).

- Kunni, D., dan Levenspiel, O. 1991. *Fluidization Engineering* 2nd Edition. Boston: Butterwooth-Heinemann.
- Levenspiel, O. 1999. *Chemical Reaction Engineering* 3rd Edition. Oregon: John Wiley and Sons.
- Ludwig, E. E. 1999. *Applied Design for Chemical and Petrochemical Plants Vol.1,2,3* 3rd ed. Texas: Gulf Publishing Co.
- Macrotrends. 2021. *Natural Gas Prices*. (Online): <https://www.macrotrends.net/2478/natural-gas-prices-historical-chart>. (Diakses pada 20 November 2023).
- Matche. 2021. Data Harga Peralatan. (Online): <http://www.Matche.com>. (Diakses pada 20 November 2023).
- McAuley, K. B., Talbot, J. P., dan Harris, T. J. 1994. A Comparison of Two-Phase and Well-Mixed Models for Fluidized-Bed Polyethylene Reactors. *Journal of Chemical Engineering Science*. 49(3):2035-2045.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., dan Harriott, P. 1993. *Unit Operation of Chemical Engineering* 5th Edition. New York: McGraw-Hill.
- Megyesy, E. F. 2001. *Pressure Vessel Handbook* 12th Edition. Oklahoma: University of Tulsa. Moran: Sean.
- National Institute of Standards and Technology. 2018. Hydrogen Chloride. (Online): <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7647010&Mask=4>. (Diakses pada 16 Oktober 2023).
- National Library of Medicine. 2004. Hydrogen. (Online): <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Hydrogen>. (Diakses pada 9 Oktober 2023).
- National Library of Medicine. 2004. Silicone Tetrachloride. (Online): <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Silicon-tetrachloride>. (Diakses pada 12 Oktober 2023).
- National Library of Medicine. 2004. Water. (Online): <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Water>. (Diakses pada 20 September 2023).

- Perry, R. H. 1997. *Perry's Chemical Engineers' Handbook 7th Edition*. New York: McGraw Hill Companies.
- Perry, R., dan Green, D., 1999. *Perry's Chemical Engineer's Handbook, 8th Edition*. United State: McGraw-Hill Book Co.
- Peter, M. X ., Timmerhaus, K.D dan West, R. E. 2021. Equipment Cost. (Online): <http://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/>. (Diakses pada 22 November 2023).
- Petters, M. S. dan Timmerhaus, K. D. 2003. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers, Edisi 4*. Singapore: McGraw Hill.
- Petters, M. S., Timmerhaus, K. D., dan West, R. D. 2004. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers, Edisi 5*. Boston: McGraw Hill.
- Petters, M., dan Timmerhaus, K., 1991. *Plant Design and Economics for Chemical Engineer, 4th Edition*. New York: Mc Graw - Hill Book Co.
- Putriawanti. 2019. Peta Rencana Pola Ruang Kota Serang. (Online): <https://www.scribd.com/document/433248298/Peta-Rencana-Pola-Ruang-Kota-Serang>. (Diakses pada 13 September 2023).
- Qomariah, N. L., & Dewajani, H. (2022). Penentuan kapasitas produksi dan seleksi proses pra rancangan pabrik kimia sabun cair berbasis minyak kelapa sawit kapasitas 40.000 ton/tahun. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, 8(4), 815-824.
- Rumah123. 2021. Harga Properti serang. (Online): <https://www.rumah123.com/properti/serang>. (Diakses pada 22 November 2023).
- Scheel, J.H., dan Tsoguda, F. 2003. *Crystal Growth Technology*. Switzerland: Wiley.
- Smith, J. M., dan Van Ness, H. C. 2001. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics 6th Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Sudarsita, I. W. 2015. Performansi Co-Gasifikasi Bahan Bakar Batubara dan Sabut Kelapa Sistem Sirkulasi *Fluidized Bed*. *Skripsi*. Universitas Udayana.

- Tazmania. 2019. *Semikonduktor Indonesia Club*. (Online).
https://www.academia.edu/36702535/Semikonduktor_indonesi_club. (Diakses pada 15 Oktober 2023).
- Tokuyama. 2011. *High-purity Trichlorosilane*. (Online).
<https://www.tokuyama.co.jp/eng/products/specialtyproducts/trichlorosilane.html#:~:text=Special%20characteristics,hydrogen%20chloride%20gas%20and%20silica>. (Diakses pada 29 Oktober 2023).
- Treybal, R. E. 1981. *Mass Transfer Operation*. Singapore: McGraw-Hill.
- Ulrich, G. D. 1976. *A Guide To Chemical Engineering Process Design and Economics*. New York: John Wiley & Sons
- Walas, S. M. 1988. *Chemical Process Equipment Selection and Design, 3rd editions*. United States of America: Butterworth.
- Walas, S. M. 1990. *Chemical Process Equipment Selection and Design*. New York: Butterworth-Heinemann.
- Wignjosoebroto, S. 2009. *Tata Letak Pabrik dan Pemandahan Bahan*. Edisi ketiga. Surabaya: Widya Guna.
- Winkle, V. 1967. *Distillation*. New York: Mc Graw Hill.
- Yaws, C. L. 1999. *Chemical Properties Handbook*. New York: McGraw Hill.