

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1. Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1. Spesifikasi Bahan Baku

a. Aluminium Hidroksida

- Rumus Molekul : Al(OH)_3
- Fase : Padat
- Berat Molekul : 78 g/mol
- Densitas : 2,42 g/cm³
- Nilai pH : 8 – 10 (max.) pada (20 °C)
- Warna : Putih
- Bentuk : Kristal bubuk
- Bau : Tidak berbau
- Kelarutan : Tidak larut dalam air (20 °C)
- Titik Lebur : 300 °C (572 °F)

(MSDS, 2025)

b. Asam Sulfat

- Rumus Molekul : H_2SO_4
- Fase : Cair
- Berat Molekul : 98,07 g/mol
- Densitas : 1,84 g/cm³
- Nilai pH : ± 1 (20 °C, 1 atm)
- Warna : Jernih
- Bau : Menyengat (Khas)
- Kelarutan : Larut sempurna dalam air
- Titik Lebur : 10,4 °C
- Titik Didih : 290 °C

(MSDS, 2020)

2.1.2. Spesifikasi Produk

a. Aluminium Sulfat

- Rumus Molekul : $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- Fase : Padat

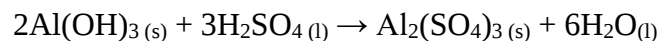
- Berat Molekul : 594 g/mol
- Densitas : 920 kg/m³ (bubuk)
- Nilai pH : > 3 (1% solusi pada 27 °C)
- Warna : Putih kecoklatan
- Bentuk : Kristal bubuk
- Bau : Tidak berbau
- Kelarutan : Larut dalam air (87 g/100 cc pada 27 °C)
- Titik Lebur : 770 °C

(MSDS, 2022)

2.2. Konsep Proses

2.2.1. Dasar Reaksi

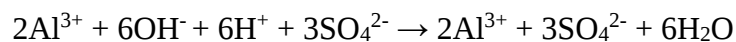
Reaksi pembentukan aluminium sulfat terjadi antara aluminium hidroksida padat dan asam sulfat cair. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



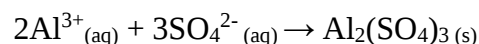
2.2.2. Mekanisme Reaksi

Reaksi pembentukan aluminium sulfat terjadi antara basa lemah $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan asam kuat H_2SO_4 yang kemudian terjadi reaksi netralisasi membentuk garam $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ dan air (H_2O).

Jika ditulis dalam bentuk ionik:



Kemudian ion-ion Al^{3+} dan SO_4^{2-} akan membentuk garam:



2.2.3. Kondisi Operasi

Reaksi netralisasi senyawa Asam Sulfat dan Aluminium Hidroksida merupakan reaksi antara fasa cair dan padat yang berlangsung secara eksotermis dan berlangsung dalam reaktor CSTR dengan kondisi operasi sebagai berikut :

Suhu : 150 – 180 °C

Tekanan : 5 atm

Mol : 2 aluminium hidroksida : 3 asam sulfat cair

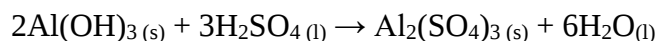
Konversi : 92 – 97 %

2.2.4. Reaksi

Reaksi yang terjadi dalam pembuatan aluminium sulfat menggunakan proses ini adalah reaksi antara aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$) dengan asam sulfat (H_2SO_4) dalam fase cair, di mana dua mol $\text{Al}(\text{OH})_3$ bereaksi dengan tiga mol H_2SO_4 membentuk satu mol aluminium sulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) dan enam mol air (H_2O). Reaksi ini bersifat eksotermis dan berlangsung dalam kondisi terkontrol di dalam reaktor berpengaduk kontinu (CSTR). Penggunaan H_2SO_4 yang telah diencerkan hingga konsentrasi 66% menyebabkan adanya air tambahan yang tidak ikut bereaksi, namun mempengaruhi neraca massa dan energi sistem. Produk reaksi berupa larutan aluminium sulfat kemudian diproses lebih lanjut melalui evaporasi, kristalisasi, pemisahan cair-padat, pengeringan, dan penghalusan hingga diperoleh aluminium sulfat dalam bentuk padat siap pakai.

2.2.5. Tinjauan Termodinamika dan Kinetika

Reaksi utama dalam pembuatan aluminium sulfat adalah:



Reaksi ini bersifat eksotermis, dengan perubahan entalpi standar (ΔH°) sekitar $-158,8 \text{ kJ/mol}$ untuk 1 mol $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ yang terbentuk. Nilai ΔG° (energi bebas Gibbs) untuk reaksi negatif, yang menunjukkan bahwa reaksi berlangsung spontan secara termodinamika pada kondisi standar (25°C , 1 atm). Nilai perubahan entropi (ΔS°) juga cenderung positif karena terjadi peningkatan jumlah molekul dalam fase cair (dari reaktan padat + cair $\rightarrow$ produk larut + cair), yang berarti sistem menjadi lebih terdispersi.

Selain itu, aluminium hidroksida merupakan amfoter yang akan larut dalam asam kuat seperti H_2SO_4 , membentuk ion Al^{3+} yang sangat reaktif dalam suasana asam. Reaksi berlangsung lebih efisien pada suhu tinggi ($100 - 150^\circ\text{C}$) karena suhu mempercepat pelarutan dan membantu menjaga kelarutan $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ dalam air.

Secara kinetika, reaksi antara $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan H_2SO_4 berlangsung dalam fase heterogen (padat-cair), di mana laju reaksi ditentukan oleh beberapa tahapan, yaitu:

- Dispersi dan pengadukan untuk memperbesar kontak antar fase,
- Pelarutan $\text{Al}(\text{OH})_3$ ke dalam fase cair,

- Reaksi ionik antara Al^{3+} dan SO_4^{2-} membentuk kompleks $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ dalam larutan.

Laju reaksi dipengaruhi oleh beberapa faktor penting:

- Suhu: peningkatan suhu mempercepat reaksi melalui peningkatan difusi dan pelarutan padatan.
- Konsentrasi H_2SO_4 : semakin tinggi konsentrasi, reaksi semakin cepat, namun terlalu pekat bisa menyebabkan pembentukan lapisan pasif pada permukaan $\text{Al}(\text{OH})_3$.
- Ukuran partikel $\text{Al}(\text{OH})_3$: semakin halus, semakin besar luas permukaan $\rightarrow$ reaksi semakin cepat.
- Kecepatan pengadukan: meningkatkan kontak antar fase dan mencegah pengendapan lokal.

Proses dilakukan dalam CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) untuk menjamin pencampuran sempurna dan konversi reaksi mendekati 100%. Reaksi dikendalikan untuk menjaga suhu dan laju reaksi tetap optimal, serta mencegah pembentukan produk samping.

2.3. Langkah Proses

2.3.1. Tahap Persiapan Bahan Baku

Proses produksi aluminium sulfat diawali dengan penyiapan bahan baku utama, yaitu aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$) dan asam sulfat (H_2SO_4). Aluminium hidroksida disimpan di Gudang Bahan Baku (WH-1.01) pada kondisi suhu ruang. Sementara itu, asam sulfat dengan kemurnian 98% disimpan dalam Tangki Penyimpanan (TP-1.01).

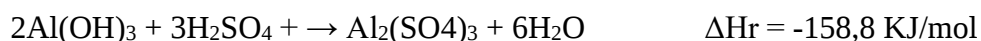
Sebelum digunakan dalam proses reaksi, asam sulfat diencerkan hingga mencapai konsentrasi 66% menggunakan air proses di dalam Tangki Pencampur (MI-1.01). Larutan asam sulfat 66% tersebut kemudian dipanaskan hingga suhu 180°C . Aluminium hidroksida dari gudang diangkut menggunakan Belt Conveyor (BC-1.01) dan dilanjutkan dengan Bucket Elevator (BE-1.01) menuju Reaktor Kontinu (CSTR-2.01), bersamaan dengan aliran asam sulfat yang telah dipanaskan..

2.3.2. Tahap Reaksi

Reaksi antara aluminium hidroksida dan asam sulfat berlangsung dalam Reaktor Kontinu Berpengaduk (CSTR-2.01) pada kondisi operasi suhu 150°C dan tekanan

5 atm. Aluminium hidroksida diumpankan secara kontinu ke dalam reaktor, sedangkan asam sulfat 66% dialirkan melalui sistem perpipaan setelah terlebih dahulu dipanaskan menggunakan Heater (H-1.01).

Di dalam reaktor, kedua bahan bereaksi menghasilkan larutan aluminium sulfat sesuai reaksi kimia sebagai berikut:



Produk reaksi berupa aluminium sulfat cair selanjutnya dipompa menuju unit evaporasi (E-2.01) untuk dilakukan proses penguapan. Pada unit ini, air dan SO_3 yang masih tersisa diuapkan pada suhu 110°C guna meningkatkan konsentrasi larutan. Larutan pekat aluminium sulfat kemudian dialirkan menuju unit kristalisasi (Crystallizer K-3.01).

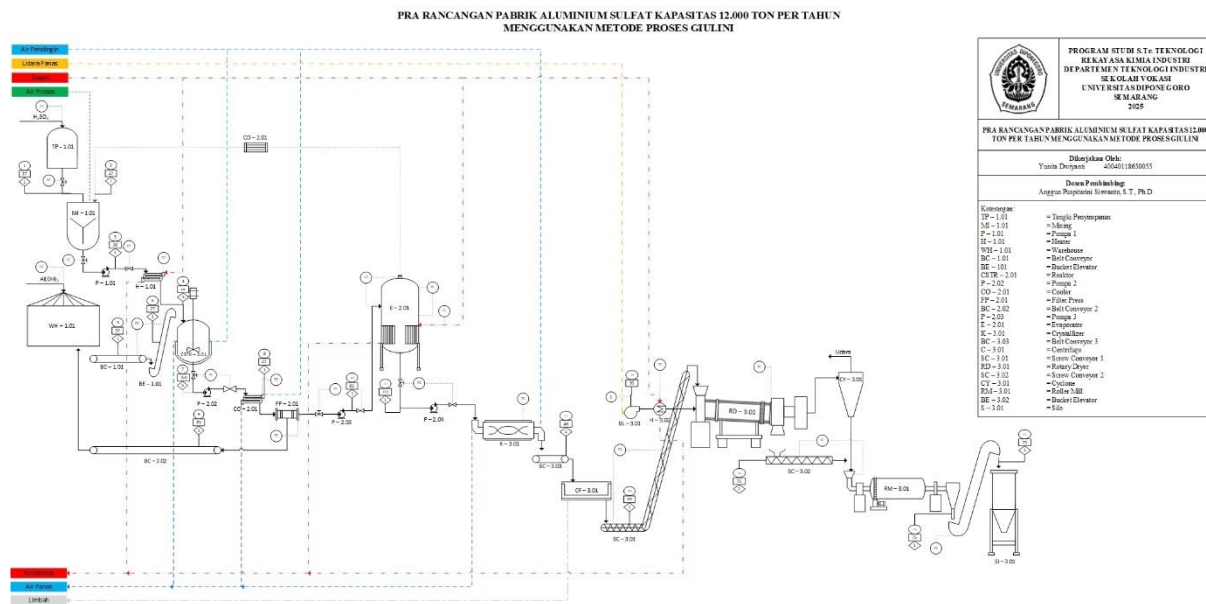
Proses kristalisasi dilakukan pada suhu 40°C , di bawah titik didih tetapi berada dalam kisaran titik pembekuan larutan, sehingga memungkinkan pembentukan kristal secara optimal. Kristal yang terbentuk kemudian dipisahkan dari mother liquor menggunakan Centrifuge (C-3.01). Kristal padat hasil pemisahan tersebut kemudian diangkut menggunakan Screw Conveyor (SC-3.01) menuju unit pengering.

2.3.3. Tahap Pengeringan dan Penanganan Produk

Pengeringan kristal aluminium sulfat dilakukan di dalam Rotary Dryer (RD-3.01), di mana udara panas bersuhu 75°C dari Blower (BL-3.01) dialirkan secara langsung ke dalam drum pengering untuk menguapkan sisa kelembaban pada kristal. Udara buangan yang mengandung partikel halus aluminium sulfat selanjutnya dialirkan menuju unit siklon (Cyclone CY-4131) untuk pemisahan dan pemulihan partikel.

Produk kering kemudian diangkut menggunakan Screw Conveyor (SC-3.02) ke dalam Roller Mill (RM-3.01) untuk proses penghalusan ukuran partikel sesuai spesifikasi produk. Produk akhir dalam bentuk serbuk halus selanjutnya ditransportasikan menggunakan Bucket Elevator (BE-3.02) menuju Silo Penyimpanan (S-3.01) sebagai tempat penampungan akhir sebelum distribusi.

2.4. Diagram Alir



2.5. Neraca Massa dan Neraca Energi

2.5.1. Neraca Massa

Kapasitas Produksi : 12.000 ton/tahun

Waktu kerja/tahun : 330 hari

$$\frac{12.000 \text{ ton}}{\text{tahun}} \times \frac{1 \text{ tahun}}{330 \text{ hari}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} = 1.515,15 \text{ Kg/jam}$$

Jumlah bahan baku

H₂SO₄ : 1302,49 Kg/jam

H₂SO₄(98%) : 1329,08 Kg/jam

Al(OH)₃ : 691,12 Kg/jam

Al(OH)₃(99.9%) : 691,81 Kg/jam

Satuan Operasi : Kg/jam

1. Mixing

Dalam proses mixing, H₂SO₄ diencerkan terlebih dahulu menggunakan air proses hingga menjadi konsentrasi 66% yang kemudian akan digunakan untuk reaksi pembentukan aluminium sulfat di dalam reactor.

H₂SO₄ 66% : H₂SO₄(98%)/0,66

: 1302,49/0,66

: 1973,48 Kg/jam

H₂O proses : 1973,48 – 1392,08 Kg/jam

: 644,40 Kg/jam

Berdasarkan perhitungan neraca massa dari Doloksaribu (2022), pembuatan aluminium sulfat dengan kapasitas 50.000 ton/tahun dengan proses yang sama yaitu giulini, didapatkan nilai neraca massa yang tersaji pada tabel 2.

Tabel 2. Neraca Massa Mixing

Komponen	Masuk (Kg/jam)			Keluar (Kg/jam)
	Recycle	F1	F2	F3
H ₂ SO ₄	471,920	5.427,1		5.899,00
H ₂ O	1.636	110,76	1.291,87	3038,88
Total		8.937,8752		8.937,8752

2. Reaktor CSTR

Didalam reaktor ini direaksikan antara H₂SO₄ 66% dengan Al(OH)₃ 99,9%. Berdasarkan kapasitas 12.000 ton/tahun, aluminium sulfat yang dihasilkan adalah sebanyak 1.515,15 Kg/mol. Namun berdasarkan Doloksaribu (2022), neraca massa yang didapatkan yaitu:

Tabel 2. Neraca Massa Reaktor

Komponen	Masuk (Kg/jam)			Keluar (Kg/jam)
	F6 Recycle	F3	F4	F5
H ₂ SO ₄		5.899,00		471,920
Al(OH) ₃	250,41		2.879,67	250,41
H ₂ O		3038,88	2,88	5.035,38
Al ₂ (SO ₄) ₃				6.313,13
Total		12,070.84		12,070.84

3. Filter Press

Pada Filter Press, dipisahkan Al(OH)₃ hasil reaksi dari filtrat. Berdasarkan Doloksaribu (2022), neraca massa yang didapatkan yaitu:

Tabel 2. Neraca Massa Filter Press

Komponen	Masuk (Kg/jam)	Keluar (Kg/jam)

	F5	F6	F7
H ₂ SO ₄	471,920		471,920
Al(OH) ₃	250,41	250,41	0
H ₂ O	5.035,38		5.035,38
Al ₂ (SO ₄) ₃	6.313,13		6.313,13
Total	12,070.84	12,070.84	

4. Evaporator

Pada evaporator H₂O di uapkan untuk memekatkan Aluminium Sulfat. Tabel berikut ini menunjukkan neraca massa evaporator yang memiliki basis 6.313,131 (Doloksaribu, 2022).

Tabel 2. Neraca Massa Evaporator

Komponen	Masuk (Kg/jam)	Keluar (Kg/jam)	
	F7	F8	F9
H ₂ SO ₄	471,920	471,920	
H ₂ O	5.035,38	1.636	3.399,38
Al ₂ (SO ₄) ₃	6.313,13		6.313,13
Total	11,820.43	11,820.43	

5. Kristalizer

Pada kristalizer ini kemudian Aluminium Sulfat di kristalkan (Doloksaribu, 2022)

Tabel 2. Neraca Massa Kristalizer

Komponen	Masuk (Kg/jam)	Keluar (Kg/jam)
	F11	F12
H ₂ SO ₄	3.399,378	3.268
Al ₂ (SO ₄) ₃	6.313,131	126,263
Al ₂ (SO ₄) ₃ .14H ₂ O		6.317,862
Total	9.712,510	9.712,510

6. Centrifuge

Centrifuge digunakan untuk memisahkan produk dengan mother liquid. Neraca massa yang didapatkan oleh Doloksaribu (2022) adalah:

Tabel 2. Neraca Massa Centrifuge

Komponen	Masuk (Kg/jam)	Keluar (Kg/jam)	
	F12	F12	F13
H ₂ SO ₄	3.268,38	2.941,55	326,84
Al ₂ (SO ₄) ₃	126,26	113.64	12,63
Al ₂ (SO ₄) ₃ .14H ₂ O	6.317,86		6.317,86
Total	9.712,510	9.712,510	

7. Rotary Dryer

Didalam rotary dryer kadar air pada kristal Aluminium Sulfat basah dikurangi. Hasil neraca massa dari Doloksaribu (2022) adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Neraca Massa Rotary Dryer

Komponen	Masuk (Kg/jam)		Keluar (Kg/jam)	
	F15	F16	F17	F18
H ₂ O	326.84		323,49	3,35
Al ₂ (SO ₄) ₃	6.317,86			6.317,86
Al ₂ (SO ₄) ₃	12,64			12,63
Udara Panas		6.469,9	6.469,9	
Total	9.712,510		13.127,19	

2.5.2. Neraca Energi

ΔH reaksi : -158,8 kJ/mol produk

Pemanasan H₂SO₄ larutan (30 → 150°C), $C_p \approx 2,63$:

Pemanasan Al(OH)₃ (25 → 150°C), $C_p = 1,1$:

Total panas masuk : 718.025 kJ/jam

Energi reaksi : -703.497 kJ/jam

Berdasarkan dari perhitungan neraca energi dari Doloksaribu (2022), didapatkan perhitungan seperti pada tabel berikut ini:

Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai panas (Q) adalah:

- Panas

Latent Q =

$$m \times \lambda$$

- Panas sensible

$$Q = m \times c_p \times \Delta T$$

- Data Cp berdasarkan fungsi temperature dapat dilihat sebagai berikut:

Komponen	A	B	C	D	e
N ₂ (g)	29,342	-3,539×10 ⁻³	1,0076×10 ⁻⁵	-4,3116×10 ⁻⁹	2,5935×10 ⁻¹³
O ₂ (g)	29,526	-8,8999×10 ⁻³	3,3236×10 ⁻⁵	-3,2629×10 ⁻⁸	8,8607×10 ⁻¹²
H ₂ O (l)	92,053	-3,9953×10 ⁻²	-2,1103×10 ⁻⁴	5,3469×10 ⁻⁷	-
H ₂ SO ₄ (l)	26,004	7,03×10 ⁻¹	-1,39×10 ⁻³	1,03×10 ⁻⁶	-
H ₂ O (g)	33,933	-8,42×10 ⁻³	2,99×10 ⁻⁵	-1,78×10 ⁻⁸	3,6934×10 ⁻¹²

(Sumber : Yaws, 1990)

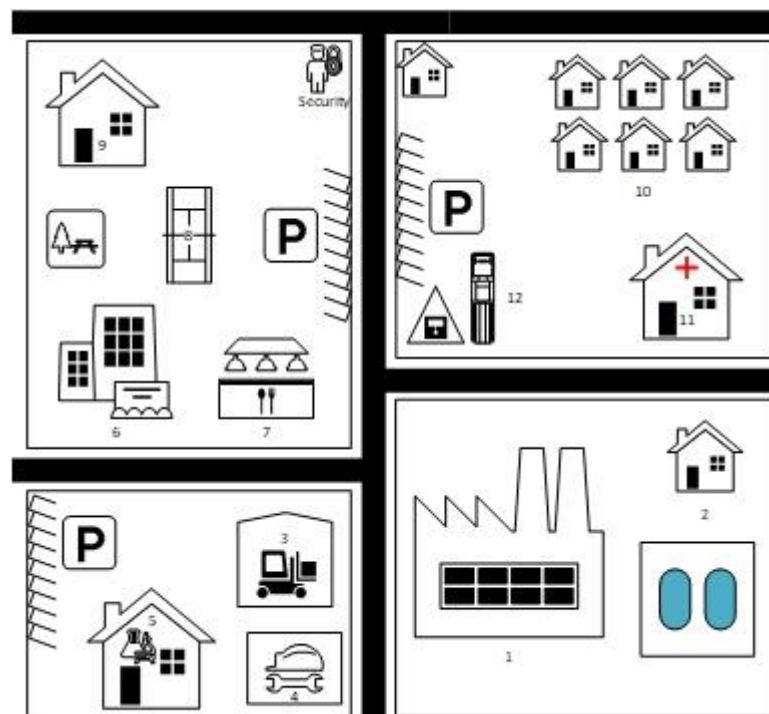
2.6. Tata Letak Pabrik dan Pemetaan

Tata letak pabrik merupakan bagian penting dalam perencanaan dan pengaturan alur proses produksi di dalam suatu fasilitas industri. Tujuannya adalah untuk menciptakan hubungan yang optimal antara pekerja, peralatan, serta aliran bahan, dari bahan baku hingga menjadi produk jadi. Desain tata letak ini sangat memengaruhi efisiensi operasional, biaya produksi, serta keselamatan kerja. Oleh sebab itu, penataan area dalam pabrik perlu dilakukan dengan teliti guna menghindari kendala di masa depan.

Perancangan tata letak yang efisien mencakup penempatan area proses, penyimpanan bahan, dan area pemindahan secara strategis, dengan mempertimbangkan sejumlah aspek berikut (Peter, M.S., dan Timmerhaus, K.D., 2004):

1. Urutan operasi produksi dan kemudahan akses. Bila suatu produk membutuhkan tahap pengolahan lanjutan, maka unit-unit proses ditempatkan berurutan agar sistem perpipaan dan penempatan pompa menjadi lebih sederhana.
2. Rencana pengembangan pabrik baru maupun ekspansi area yang sudah ada.
3. Penempatan fasilitas logistik secara ekonomis, termasuk bahan baku, bahan pendukung, serta utilitas seperti air, uap, listrik, bahan bakar, bengkel pemeliharaan, dan sarana pendukung lainnya.
4. Kesesuaian bangunan dengan kebutuhan proses, baik dari sisi luas, kondisi struktural, maupun standar konstruksi.
5. Aspek kesehatan, keamanan, dan keselamatan, termasuk potensi bahaya seperti kebakaran atau ledakan.
6. Sistem pengelolaan limbah yang memadai.

7. Tersedianya ruang untuk membongkar dan membersihkan peralatan saat shutdown tanpa mengganggu unit lain.
8. Kemudahan pemeliharaan dan perbaikan peralatan.
9. Fleksibilitas dalam desain tata letak, guna mengantisipasi perubahan proses atau penggantian mesin tanpa memerlukan biaya besar.
10. Penyediaan area layanan umum seperti kantin, tempat ibadah, dan parkir yang mudah diakses dari area kerja.



Gambar 2. Tata letak pabrik Aluminium Sulfat

Keterangan:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1. Area Proses | 7. Kantin dan Koperasi |
| 2. Utilitas | 8. Lapangan Olahraga |
| 3. Warehouse | 9. Kantor Diklat dan K3 |
| 4. Bengkel | 10. Mess/Perumahan Karyawan |
| 5. Laboratorium dan Ruang Kontrol | 11. Poliklinik |
| 6. Kantor Administrasi | 12. Unit Pemadam |

Tata letak peralatan, bangunan, dan fasilitas lainnya sangat berpengaruh terhadap investasi awal, efisiensi produksi, serta keselamatan kerja. Penataan yang baik dapat memberikan sejumlah manfaat seperti:

1. Mengurangi jarak perpindahan bahan, sehingga mempermudah penanganan material.
2. Menyediakan ruang kerja yang cukup luas untuk perawatan dan perbaikan peralatan.
3. Menurunkan biaya produksi.
4. Meningkatkan keselamatan kerja.
5. Mengoptimalkan efisiensi proses.
6. Mempermudah pengawasan terhadap proses produksi.