

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1. Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1. Spesifikasi Bahan Baku

2.1.1.1. Metil Format

Bahan baku yang digunakan pada proses ini berupa metil format dengan spesifikasi sebagai berikut (Dongying Eastchem Co., Ltd, 2025).:

Rumus molekul	: $C_2H_4O_2$ atau $HCOOCH_3$
Wujud	: Cair
Warna	: Bening tidak berwarna
Berat molekul	: 60,05 gr/mol
Titik lebur	: $-100^{\circ}C$
Titik didih	: $32-34^{\circ}C$
Densitas	: 0,974 gr/ml
Viskositas	: 0,330 cP
Kemurnian	: min. 97wt%

2.1.1.2. Air

Bahan baku yang digunakan untuk menghidrolisis adalah air, berikut spesifikasinya (Perry, 2019).:

Rumus molekul	: H_2O
Wujud	: Cair
Warna	: Tidak berwarna
Berat molekul	: 18 gr/mol
Titik lebur	: $0^{\circ}C$
Titik didih	: $100^{\circ}C$
Densitas	: 0,997 gr/ml
Viskositas	: 0,998cP

2.1.2. Spesifikasi Bahan Pembantu

Bahan pembantu berupa ekstraktan digunakan untuk membantu pemisahan senyawa azeotrop pada kolom distilasi, berikut spesifikasi sulfolane (Hefei TNJ Chemical Co., Ltd, 2025). :

Rumus molekul	: $C_4H_8O_2S$
---------------	----------------

Wujud	: Cair
Warna	: Tidak berwarna
Berat molekul	: 120,17 gr/mol
Titik lebur	: 20-26°C
Titik didih	: 285°C
Densitas	: 1,261 gr/ml
Viskositas	: 10,34 cP
Kemurnian	: 99%

2.1.3. Spesifikasi Produk Utama

Produk utama yang dihasilkan dari reaksi hidrolisis metil format adalah asam format dengan spesifikasi sebagai berikut (Reutemann and Kieczka, 2012).:

Rumus molekul	: CH ₂ O ₂ atau HCOOH
Wujud	: Cair
Warna	: Tidak berwarna
Berat molekul	: 46,03 gr/mol
Titik leleh	: 8,6°C
Titik didih	: 100,8°C
Densitas	: 1,214 gr/ml
Viskositas	: 1,804 cP
Kemurnian	: min. 85wt%
Impuritas	: H ₂ O maks 15wt%

2.1.4. Spesifikasi Produk Samping

Produk samping dari proses hidrolisis metil format adalah methanol dengan spesifikasi sebagai berikut (Ott *et al.*, 2012). :

Rumus molekul	: CH ₃ OH
Wujud	: Cair
Warna	: Tidak berwarna
Berat molekul	: 32 gr/mol
Titik leleh	: -97,8°C
Titik didih	: 64,65°C
Densitas	: 0,7867 gr/ml
Viskositas	: 0,5513 cP

Kemurnian	: 99wt%
Impuritas	: $\text{H}_2\text{O} \leq 0,8\text{wt\%}$; $\text{Acidity} \leq 0,2\text{wt\%}$

2.2. Konsep Proses

2.2.1. Dasar Reaksi

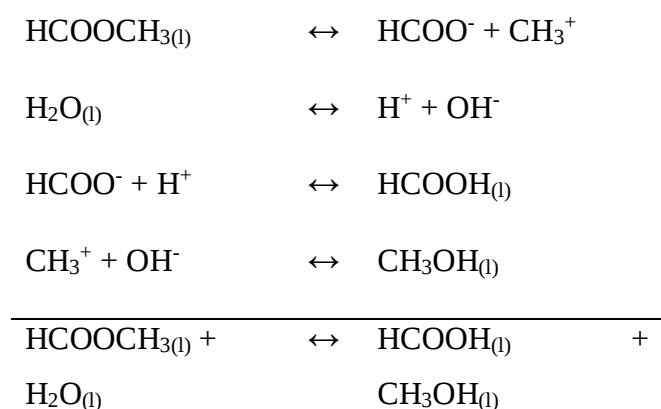
Proses pembuatan asam formiat menggunakan metil format dan air dengan reaksi hidrolisis metil format menghasilkan asam format dan metanol dalam suasana asam. Reaksi utama yang terjadi bersifat reversible dan endotermis (Reutemann and Kieczka, 2012). Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



Konstanta kesetimbangan hidrolisis metil format bergantung pada rasio molar terhadap ester. Jika rasio molar air:metil format adalah 1:1, konversi hanya 30%, tetapi jika rasio meningkat menjadi 5-6, konversi naik menjadi 60%. Dan memerlukan pemisahan untuk menghasilkan asam format pekat dengan energi seminimal mungkin untuk meningkatkan efisiensi (Reutemann and Kieczka, 2012).

2.2.2. Mekanisme Reaksi

Proses reaksi dalam pembuatan asam format terdiri dari beberapa tahap, salah satunya adalah penguraian metil format melalui reaksi hidrolisis dengan air. Reaksi ini menghasilkan senyawa asam format dan metanol (McKetta, 1985). Berikut adalah mekanisme reaksi hidrolisis metil format menjadi asam format:



2.2.3. Fase Reaksi

Dalam pembuatan asam formiat dari metil format dan air dilakukan dengan reaksi hidrolisis metil format menghasilkan asam format dan produk

samping metanol. Reaksi berlangsung dalam fase cair dan bersifat endotermis dapat dilihat dari nilai $\Delta H_R =$ positif. Karena reaksinya homogen fase cair tanpa katalis maka menggunakan reaktor jenis *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) (McKetta, 1985).

2.2.4. Kondisi Operasi

Pembuatan asam format menggunakan metode hidrolisis metil format berlangsung pada kondisi operasi yang relatif rendah yaitu dengan suhu 80°C dan tekanan 3 atm. Pada kondisi operasi ini fase berupa cair dan reaksi bersifat *reversible* (dapat balik) serta endotermis (membutuhkan panas). Supaya reaksi dapat berjalan ke arah pembentukan produk asam format, maka salah satu bahan baku diumpankan. Dipilih air sebagai umpan berlebih karena air memiliki nilai ekonomis yang tinggi dibandingkan metil format. Jika metil format dan air digunakan dalam rasio molar 1:1, konversinya hanya 30%, tetapi jika rasio molar air terhadap metil format ditingkatkan menjadi 5-6, konversi metil format meningkat menjadi 60% dengan bantuan autokatalis berupa asam format yang telah terproduksi sebelumnya untuk memberikan suasana asam (Reutemann and Kieczka, 2012).

2.2.5. Tinjauan Termodinamika

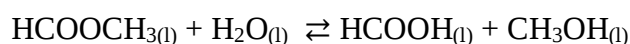
2.2.5.1. Panas Reaksi

Tinjauan mengenai panas reaksi (ΔH_R) difungsikan untuk mengetahui reaksi pada proses berlangsung secara eksotermis atau endotermis dengan cara mengurangi panas pembentukan (ΔH_f°) produk dengan reaktan pada kondisi 25°C dan 1 atm (Yaws, 1999). Berikut adalah perhitungan panas pembentukan reaksi hidrolisis pembentukan asam format:

Tabel 2.1 Harga panas pembentukan (ΔH_f°) masing-masing komponen (Yaws, 1999).

Komponen	ΔH_f° (kJ/mol)
HCOOCH ₃	-349,78
H ₂ O	-241,80
HCOOH	-378,61
CH ₃ OH	-201,17

Reaksi Hidrolisis Metil Format:



$$\Delta H^\circ_{\text{R } 298\text{K}} = \Delta H^\circ_{\text{f produk}} - \Delta H^\circ_{\text{f reaktan}}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{R } 298\text{K}} = (\Delta H^\circ_{\text{f HCOOH}} + \Delta H^\circ_{\text{f CH}_3\text{OH}}) - (\Delta H^\circ_{\text{f HCOOCH}_3} + \Delta H^\circ_{\text{f H}_2\text{O}})$$

$$\Delta H^\circ_{\text{R } 298\text{K}} = ((-378,61) + (-201,17)) - ((-349,78) + (-241,80))$$

$$\Delta H^\circ_{\text{R } 298\text{K}} = +11,80 \text{ kJ/mol}$$

Harga dari panas reaksi bernilai positif ($\Delta H^\circ_{\text{R}} > 0$) yang artinya pembentukan asam format secara hidrolisis berlangsung secara endotermis atau membutuhkan panas untuk mempertahankan suhu reaksi.

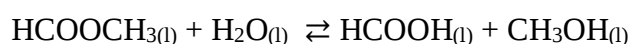
2.2.5.2. Energi Gibbs (ΔG°)

Reaksi hidrolisis antara metil format dan air menjadi produk asam format perlu ditinjau apakah reaksi berlangsung secara spontan atau tidak spontan, penentuan ini dilakukan melalui perhitungan energi bebas gibbs. Berikut adalah perhitungan energi gibbs reaksi hidrolisis pembentukan asam format:

Tabel 2.2 Harga energi gibbs ($\Delta G^\circ_{\text{f}}$) masing-masing komponen (Yaws, 1999).

Komponen	$\Delta G^\circ_{\text{f}}(\text{J/mol})$
HCOOCH ₃	-297,19
H ₂ O	-228,60
HCOOH	-351,00
CH ₃ OH	-162,51

Reaksi Hidrolisis Metil Format:



$$\Delta G^\circ_{298\text{K}} = \Delta G^\circ_{\text{f produk}} - \Delta G^\circ_{\text{f reaktan}}$$

$$\Delta G^\circ_{298\text{K}} = (\Delta G^\circ_{\text{f HCOOH}} + \Delta G^\circ_{\text{f CH}_3\text{OH}}) - (\Delta G^\circ_{\text{f HCOOCH}_3} + \Delta G^\circ_{\text{f H}_2\text{O}})$$

$$\Delta G^\circ_{298\text{K}} = ((-351,00) + (-162,51)) - ((-297,19) + (-228,60))$$

$$\Delta G^\circ_{298\text{K}} = +12,28 \text{ J/mol} = +0,01228 \text{ kJ/mol}$$

Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai sebesar 12,28 j/mol yang bernilai positif, sehingga reaksi berlangsung secara tidak spontan

dikarenakan temperature rendah sehingga perlu energi eksternal untuk terjadi reaksi.

2.2.5.3. Konstanta Keseimbangan Reaksi

Nilai konstanta keseimbangan reaksi (K) menunjukkan kecenderungan dari arah laju reaksi yang terjadi, apabila nilai K kurang dari satu maka akan cenderung terjadi reaksi balik, apabila nilai K mendekati atau sama dengan satu maka reaksi bersifat reversible, dan apabila nilai K lebih dari satu maka reaksi bersifat irreversible atau cenderung berjalan membentuk produk (Smith *et al.*, 1950). Perhitungan konstanta keseimbangan reaksi dari Smith *et al.* (1950) persamaan 13.11b sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\ln K_{298} &= - \frac{\Delta G^\circ}{RT} \\ \ln K_{298} &= - \frac{12,28 \text{ J/mol}}{8,314 \text{ J/mol.K} \times 298 \text{ K}} \\ \ln K_{298} &= - 4,96 \times 10^{-3} \\ K_{298} &= 0,99\end{aligned}$$

Nilai K pada suhu 25°C (298K) sebesar 0,99 dimana nilai ini mendekati satu artinya konstanta laju reaksi ke kanan sama dengan konstanta laju reaksi ke kiri. Supaya laju reaksi berjalan ke arah kanan (produk) maka perlu menggeser reaksi ke kanan dengan mengkondisikan reaktan berupa air secara berlebih. Reaksi hidrolisis metil format dilakukan pada suhu 80°C (353K) sehingga dengan persamaan 13.11b dari Smith *et al.* (1950) didapatkan nilai K sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\ln \frac{K_{353}}{K_{298}} &= - \frac{\Delta H_{298}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} \right) \\ \ln \frac{K_{353}}{0,99} &= - \frac{11800 \text{ J/mol}}{8,314 \text{ J/mol.K}} \left(\frac{1}{353} - \frac{1}{298} \right) \\ \ln \frac{K_{353}}{0,99} &= 0,7421 \\ \frac{K_{353}}{0,99} &= 2,1002 \\ K_{353} &= 2,0792\end{aligned}$$

Nilai konstanta kesetimbangan yang diperoleh lebih dari 1, hal ini menunjukkan bahwa reaksi yang terjadi bersifat irreversibel atau searah.

2.2.6. Tinjauan Kinetika

Tinjauan kinetika reaksi ditunjukkan untuk menentukan adanya pengaruh perubahan temperatur terhadap laju reaksi. Adapun menurut Naichen *et al.* (1998) konstanta kecepatan reaksi hidrolisis metil format untuk pembentukan asam format dengan produk samping methanol sebagai berikut:

$$-\frac{dC_F}{dt} = k_{CA}^{0,75} (C_F C_W - \frac{C_A C_M}{K})$$

Keterangan:

$$k = 2455 \times \exp\left(\frac{-6268}{T}\right)$$

C_F = konsentrasi metil format

C_A = konsentrasi asam format

C_W = konsentrasi air

C_M = konsentrasi metanol

K = kesetimbangan reaksi

2.3. Langkah Proses

Proses pembuatan asam format pada prarancangan pabrik ini dilakukan melalui hidrolisis metil format dengan air yang terdiri atas tiga tahap utama. Tahapan-tahapan dalam proses produksi meliputi:

1. Persiapan bahan baku
2. Hidrolisis metil format dengan air
3. Pemisahan menggunakan beberapa kolom distilasi, yaitu kolom distilasi pertama, kolom distilasi kedua, kolom distilasi ekstraktif dan kolom distilasi untuk regenerasi pelarut.

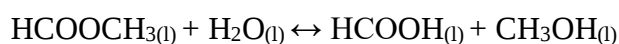
2.3.1. Persiapan Bahan Baku

Pada tahap awal proses, metil format dari tangki penyimpanan (F-110) dialirkan menggunakan pompa (L-111) menuju reaktor pertama (R-210) dengan kondisi operasi awal 1 atm dan suhu 30°C. Selanjutnya keluaran tangki penyimpanan (F-110) dialirkan menggunakan pompa (L-111) untuk menaikkan tekanannya menjadi 3 atm, kemudian melewati *heat exchanger* (E-112) untuk meningkatkan suhunya hingga mencapai 80°C. Sehingga kondisi saat masuk

kedalam reaktor yaitu 80°C dan 3 atm. Secara bersamaan, bahan baku air yang diperoleh dari proses *pretreatment* di bagian utilitas dan disimpan dalam tangki penyimpanan (F-120) dialirkan dengan kondisi serupa, dipompa menggunakan pompa (L-121) menuju *heat exchanger* (E-03) sehingga kondisinya naik menjadi 80°C dan 3 atm. Suhu dan tekanan air disesuaikan agar sesuai dengan kebutuhan reaksi sebelum akhirnya dialirkan menuju reaktor (R-210).

2.3.2. Hidrolisis Metil Format

Tahap hidrolisis merupakan proses utama dalam produksi asam format. Hidrolisis ini dilakukan dengan mereaksikan metil format dengan air untuk menghasilkan asam format dengan produk samping berupa metanol. Reaktor yang digunakan dalam proses hidrolisis metil format adalah *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR). Pemilihan reaktor ini berdasarkan pada sistem fase cair-cair serta kemampuannya beroperasi dalam kondisi *steady-state* pada tekanan 3 atm dan suhu 80°C. Di dalam reaktor, terjadi reaksi antara metil format (C₂H₄O₂) dan air (H₂O) yang menghasilkan asam format (HCOOH) sebagai produk utama serta metanol (CH₃OH) sebagai produk sampingan. Reaksi yang berlangsung adalah sebagai berikut:



Reaksi ini bersifat reversibel dan endotermis, sehingga diperlukan salah satu reaktan dalam jumlah berlebih untuk mendorong kesetimbangan ke arah pembentukan produk. Pada pabrik ini, rasio metil format dan air yang digunakan adalah 1:1,5 mol pada reaktor pertama (R-210), dan 1:5 mol pada reaktor kedua (R-230). Proses hidrolisis metil format berlangsung dalam dua tahap reaksi. Pada tahap pertama, metil format dan air dari tangki penyimpanan masing-masing dialirkan ke dalam reaktor (R-210), di mana reaksi berlangsung pada suhu 80°C dan tekanan 3 atm dengan tingkat konversi 30% terhadap metil format. Reaktor ini dilengkapi dengan jaket pemanas untuk menjaga kondisi isothermal selama proses berlangsung. Setelah keluar dari reaktor (R-210), produk reaksi kemudian dialirkan menuju *cooler* (E-212) dan *expansion valve* (K-213) untuk diturunkan suhunya menjadi 30°C dan tekanannya menjadi 1 atm. Selanjutnya, aliran ini masuk ke dalam mixer, yang berfungsi untuk mencampurkan kembali produk dari reaktor pertama dengan metil format dan

air hasil distilasi sebelum masuk ke tahap reaksi berikutnya. Setelah proses pencampuran selesai, aliran tersebut dialirkan dengan pompa (L-221) dan dipanaskan kembali menggunakan *heat exchanger* (E-222) sehingga menjadi suhu 80°C dan tekanan 3 atm, sebelum akhirnya masuk ke reaktor kedua (R-230). Pada tahap kedua ini, rasio metil format dan air ditingkatkan menjadi 1:5, sehingga konversi reaksi meningkat hingga 60%. Reaksi dalam reaktor (R-230) dibantu oleh autokatalis berupa asam format berkadar rendah, yang menciptakan lingkungan asam dan mempercepat reaksi. Setelah proses reaksi selesai, campuran produk yang terdiri dari asam format, metil format yang tersisa, metanol, dan air dipisahkan dan dipekatkan melalui tiga kolom distilasi, yaitu Kolom Distilasi I (D-310), Kolom Distilasi II (D-410), dan Kolom Distilasi Ekstraktif (D-510) dan Kolom Distilasi Regenerasi Pelarut (D-610). Setiap kolom distilasi dilengkapi dengan kondensor dan reboiler untuk menjaga kestabilan proses pemisahan, sehingga diperoleh asam format dengan konsentrasi yang diinginkan.

2.3.3. Pemisahan Pada Kolom Distilasi Pertama

Hasil proses hidrolisis metanol dengan air dari reaktor (R-230) dialirkan ke kolom distilasi pertama (D-310). Sebelum memasuki kolom distilasi, aliran terlebih dahulu melewati *heat exchanger* (E-232) untuk meningkatkan suhu hingga 96,5°C dan *expansion valve* (K-233) untuk menurunkan tekanan menjadi 1,55 atm. Penurunan tekanan ini bertujuan untuk mengurangi kemungkinan reaksi balik antara asam formiat dan metanol, karena pada tekanan lebih rendah, titik didih zat juga menurun, sehingga lebih mudah dipisahkan melalui distilasi. Aliran ini dikondisikan dalam fase cair yang tepat jenuh sebelum masuk ke dalam kolom distilasi (D-310). Kolom distilasi (D-310) beroperasi pada tekanan 1,54-1,56 atm, dengan suhu bagian atas sekitar 69,72°C dan suhu bagian bawah sekitar 113,36°C. Dalam kolom ini, terjadi pemisahan metil format dan metanol dari air dan asam formiat berdasarkan perbedaan titik didihnya. Metil format dan metanol yang memiliki titik didih lebih rendah akan menjadi distilat (produk atas), sementara air dan asam formiat akan menjadi produk bawah. Distilat yang diperoleh kemudian dikondensasikan dalam kondensor (E-3111) menggunakan media pendingin cooling water pada suhu sekitar 37°C yang menyebabkan uap terkondensasi menjadi cairan. Cairan

yang terbentuk (kondensat) ini dialirkan ke tangki akumulator (F-312), dimana sebagian dipompa untuk dikembalikan ke kolom sebagai refluks untuk meningkatkan efisiensi pemisahan dan sisanya dialirkan sebagai distilat menuju distilasi berikutnya (D-410). Hasil produk bawah kolom distilasi (D-310) yang mengandung air dan asam formiat dialirkan ke reboiler (E-314). Reboiler ini menggunakan steam sebagai sumber panas, di mana panas dari steam ditransfer ke cairan dalam reboiler sehingga sebagian menguap dan uap yang terbentuk dikembalikan ke bawah kolom distilasi (D-310) untuk mempertahankan keseimbangan fase cair dan uap di dalam kolom. Sementara cairan yang tersisa dipompa menuju kolom distilasi ekstraktif (D-510) untuk proses pemurnian akhir.

2.3.4. Pemisahan Pada Kolom Distilasi Kedua

Pada tahap distilasi kedua, produk atas dari distilasi pertama yang mengandung metanol dan metil format akan dialirkan ke kolom distilasi kedua (D-410). Proses pemisahan dalam kolom ini bertujuan untuk memisahkan metil format dan metanol yang berasal dari produk bawah kolom distilasi pertama (D-310). Kolom distilasi kedua (D-410) beroperasi pada tekanan sekitar 1,53-1,55 atm, dengan suhu bagian atas mencapai 48,56°C, sementara suhu bagian bawah mencapai 71,11°C. Metil format memiliki titik didih lebih rendah akan menguap lebih cepat dan naik ke bagian atas kolom. Sedangkan metanol yang memiliki titik didih lebih tinggi akan tetap berada di bagian bawah kolom dan keluar sebagai produk bawah. Uap distilat yang terbentuk, yaitu metil format, kemudian dialirkan ke kondensor (E-411), di mana proses pendinginan dilakukan menggunakan cooling water. Uap yang terkondensasi selanjutnya dikumpulkan dalam tangki akumulator (F-412) sebelum dipompakan ke mixer (M-220). Di dalam mixer, metil format yang telah di-*recycle* akan di-*mixing* dengan asam format berkonsentrasi rendah yang telah diproduksi sebelumnya dan air, lalu mengalami reaksi hidrolisis dalam reaktor R-230. Sementara itu, produk bawah dari kolom distilasi (D-410) berupa metanol, yang kemudian dialirkan melalui reboiler (E-414). Reboiler ini menggunakan *low pressure steam* (LPS) sebagai media pemanas untuk menjaga keseimbangan pemisahan dalam kolom distilasi. Setelah melewati reboiler, metanol selanjutnya didinginkan dalam *cooler* (E-416) menggunakan media pendingin *cooling*

water. Sebagian besar metanol yang dihasilkan akan disimpan dalam tangki penyimpanan metanol (F-72) sebagai produk samping.

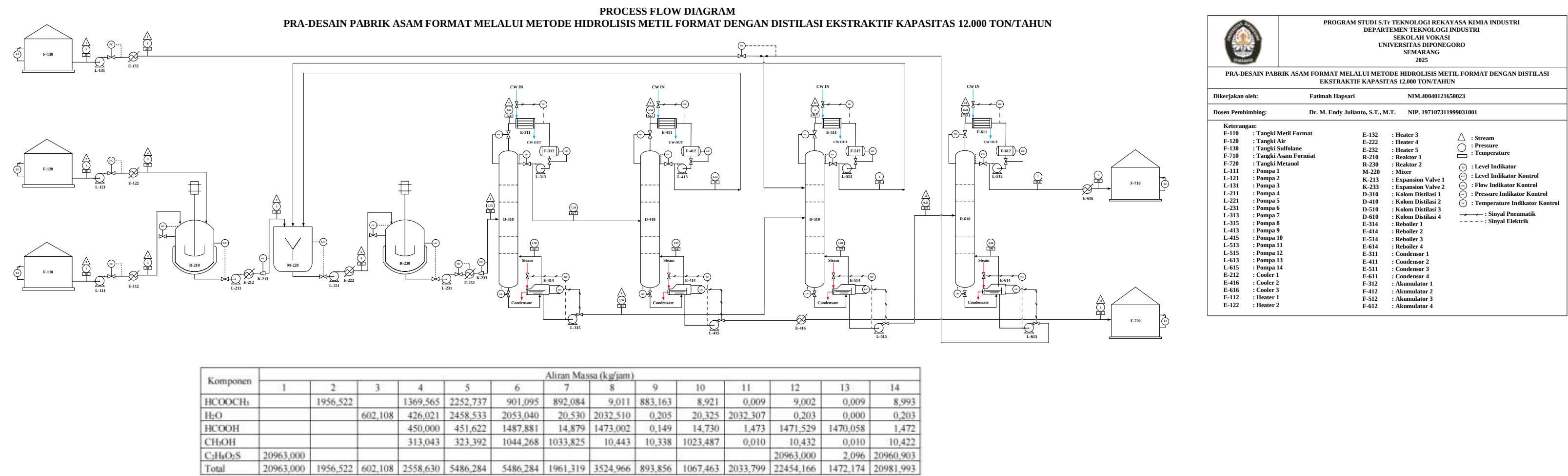
2.3.5. Pemisahan Pada Kolom Distilasi Ekstraktif

Pada tahap distilasi ekstraktif (D-03), produk bawah dari distilasi pertama yang mengandung asam format dan air akan dialirkan ke kolom distilasi ekstraktif (D-510). Kolom distilasi ekstraktif ini berfungsi untuk memisahkan air dari campuran azeotropik asam format-air dengan bantuan sulfolane sebagai pelarut dari kolom distilasi pertama (D-310). Kolom distilasi ekstraktif (D-510) ini beroperasi pada tekanan 1 atm, dengan temperatur kolom bagian atas sekitar 97,09°C dan temperatur kolom bagian bawah sekitar 174,40°C. Untuk meningkatkan volatilitas air, sulfolane digunakan sebagai pelarut ekstraktif yang dimasukkan pada stage 14 dengan suhu 119,12°C dan tekanan 1 atm. Sulfolane bertindak sebagai agen pemisah dengan menurunkan kelarutan air dalam asam format, sehingga air lebih mudah menguap dan naik ke bagian atas kolom. Pada suhu 97,09°C, air dikondensasikan dalam kondensor dan keluar sebagai distilat dengan kemurnian 99.99%, sementara campuran asam format dan sulfolane yang tertinggal di bagian bawah kolom pada suhu 174,40°C dialirkan ke kolom regenerasi. Uap yang keluar dari puncak kolom ini akan masuk ke dalam kondensor (E-511) untuk didinginkan menggunakan media pendingin *cooling water*. Kemudian, kondensat berupa air yang dihasilkan akan di-recycle ke mixer (M-220) untuk dikembalikan ke dalam reaktor (R-230). Pada bagian bawah kolom, terdapat reboiler untuk memanaskan kolom distilasi yang menggunakan medium pressure steam (MPS) sebagai media pemanas. Alasan digunakannya MPS pada kolom distilasi ini adalah karena tekanan kolom distilasi ini berada di atas 1 atm, sehingga titik didih asam format menjadi tinggi, yaitu di atas 160°C. Oleh karena itu, untuk memanaskan asam format ini dibutuhkan MPS yang memiliki tekanan 6 atm dan temperatur sekitar 166,4°C. Produk bawah yang dihasilkan dari kolom distilasi ekstraktif adalah asam format yang kurang volatil dibanding air tetap berada di bagian bawah kolom dan sulfolane. Karena itu, campuran ini dialirkan kembali menuju kolom regenerasi untuk pemisahan lebih lanjut.

2.3.6. Pemisahan Pada Kolom Distilasi Regenerasi Ekstraktan

Setelah melalui proses distilasi ekstraktif, campuran asam format dan sulfolane yang terkumpul di bagian bawah kolom dialirkan menuju kolom distilasi regenerasi pelarut (D-610) untuk dilakukan pemisahan lebih lanjut. Proses ini berlangsung pada tekanan yang lebih rendah, yaitu 0,25 atm, guna mencegah korosi serta degradasi sulfolane. Dengan adanya tekanan yang lebih rendah, titik didih asam format menurun, sehingga asam format lebih mudah menguap dan naik ke bagian atas kolom. Uap ini kemudian dikondensasikan dalam kondensor (E-611), yang menggunakan *cooling water* sebagai media pendingin, sehingga asam format yang telah dipisahkan dapat keluar sebagai distilat dengan kemurnian 99,99%. Sementara itu, sulfolane tetap berada di bagian bawah kolom karena memiliki titik didih yang jauh lebih tinggi, yaitu 287,3°C. Pada kondisi ini, sulfolane tetap dalam fase cair dengan suhu 229°C dan tekanan antara 0,26 atm. Di bagian bawah kolom, terdapat reboiler yang berfungsi untuk menyediakan panas guna mempertahankan suhu operasi dan memastikan pemisahan berlangsung optimal. Reboiler ini menggunakan medium pressure steam (MPS) sebagai sumber panas, mengingat suhu operasi sulfolane harus dijaga di bawah 230°C untuk mencegah degradasi. Setelah pemisahan selesai, sulfolane murni dengan kemurnian 99,97% dipompa kembali ke kolom distilasi ekstraktif untuk digunakan kembali, sedangkan asam format murni 99,99% keluar dari bagian atas kolom sebagai produk akhir yang masuk melewati heat exchanger (E-616) untuk diturunkan suhunya menjadi suhu ruang dan ditampung pada tangki penyimpanan (F-710).

2.4.Diagram Alir Proses



Gambar 2.1 Diagram Alir

2.5. Neraca Massa

Produksi asam format	= 12.000 ton/tahun
Operasi	= 330 hari
Basis operasi	= 1 jam operasi
Kapasitas produkis	= $\frac{12.000 \text{ ton} \times 1000 \text{ kg} \times 1 \text{ tahun} \times 1 \text{ hari}}{1 \text{ tahun} \times 1 \text{ ton} \times 330 \text{ hari} \times 24 \text{ jam}} = 1515,1515$
Kemurnian produk	= 99%
HCOOH	= 1500 kg/jam
H ₂ O	= 15,1515 kg/jam

2.5.1 Neraca Massa Reaktor (R-210)

Tabel 2.3 Neraca Massa Total Reaktor (R-210)

Komponen	Input		Output
	F2	F3	F4
HCOOHCH ₃ (l)	1956,522		1369,565
H ₂ O(l)		602,108	426,021
HCOOH(l)			450,000
CH ₃ OH(l)			313,043
Total	2558,630		2558,630

2.5.2 Neraca Massa Mixer (M-220)

Tabel 2.4 Neraca Massa Mixer (M-220)

Komponen	Input			Output
	F4	F9	F11	F5
HCOOHCH ₃ (l)	1369,565	883,163	0,009	2252,737
H ₂ O(l)	426,021	0,205	2032,307	2458,533
HCOOH(l)	450,000	0,149	1,47300218	451,622
CH ₃ OH(l)	313,043	10,338	0,010	323,392
Total		5486,284		5486,284

2.5.3 Neraca Massa Reaktor (R-230)

Tabel 2.5 Neraca Massa Total Reaktor (R-230)

Komponen	Input		Output
	F5		F6
HCOOHCH ₃ (l)	2252,737		901,095
H ₂ O(l)	2458,533		2053,040
HCOOH(l)	451,622		1487,881
CH ₃ OH(l)	323,392		1044,268
Total	5486,284		5486,284

2.5.4 Neraca Massa Kolom Distilasi (D-310)

Tabel 2. 6 Neraca Massa Total Distilasi (D-310)

Komponenten	Input	Output	
	F6	F7	F8
HCOOHCH3(l)	901,095	892,084	9,011
H2O(l)	2053,040	20,530	2032,510
HCOOH(l)	1487,881	14,879	1473,002
CH3OH(l)	1044,268	1033,825	10,443
Total	5486,284	5486,284	

2.5.5 Neraca Massa Kolom Distilasi (D-410)

Tabel 2. 7 Neraca Massa Total Distilasi (D-410)

Komponen	Input	Output	
	F7	F9	F10
HCOOHCH3(l)	887,532	883,163	8,921
H2O(l)	29,584	0,205	20,325
HCOOH(l)	14,826	0,149	14,730
CH3OH(l)	1030,146	10,338	1023,487
Total	1048,704	1048,704	

2.5.6 Neraca Massa Kolom Distilasi (D-510)

Tabel 2. 8 Neraca Massa Total Distilasi (D-510)

Komponen	Input		Output	
	F1	F8	F11	F12
HCOOHCH ₃ (l)		9,011	0,009	9,002
H ₂ O(l)		2032,510	2032,307	0,203
HCOOH(l)		1473,002	1,473	1471,529
CH ₃ OH(l)		10,443	0,010	10,432
C ₄ H ₈ O ₂ S(l)	20963,000		0,000	20963,000
Total	22446,445	22446,445		

2.5.7 Neraca Massa Kolom Distilasi (D-610)

Tabel 2.9 Neraca Massa Total Distilasi (D-610)

Komponen	Input	Output	
	F12	F13	F14
HCOOHCH3(l)	9,002	0,009	8,993
H2O(l)	0,203	0,000	0,203
HCOOH(l)	1471,529	1470,058	1,472
CH3OH(l)	10,432	0,010	10,422
C4H8O2S(l)	20963,000	2,096	20960,903
Total	22454,166	22454,166	

2.5.8 Neraca Massa Overall

Tabel 2.10 Neraca Massa Overall

Komponen	Massa (kg)	
	Input	Output
Reaktor 1		
HCOOH ₃ (l)	1956,522	
H ₂ O(l)	602,108	
Kolom distilasi 2		
HCOOHCH ₃ (l)		8,921
H ₂ O(l)		20,325
HCOOH(l)		14,730
CH ₃ OH(l)		1023,487
Kolom distilasi 3		
C ₄ H ₈ O ₂ S(l)	2,096	
Kolom distilasi 4		
HCOOHCH ₃ (l)		9,002
H ₂ O(l)		0,203
HCOOH(l)		1471,529
CH ₃ OH(l)		10,432
HCOOHCH ₃ (l)		2,096
TOTAL	2560,7261	2560,7261

2.6. Neraca Panas

2.6.1. Neraca Panas HE (E-112)

Tabel 2.11 Neraca Panas HE (E-112)

Komponen	Q masuk	Qkeluar
HCOOCH ₃	18634,67	213755,45
Q Pemanas	195120,78	
Total	213755,45	213755,45

2.6.2. Neraca Panas HE (E-122)

Tabel 2.12 Neraca Panas HE (E-122)

Komponen	Q masuk	Qkeluar
H ₂ O	12627,09	138363,47
Q Pemanas	125736,38	
Total	138363,47	138363,47

2.6.3. Neraca Panas Reaktor (R-210)

Tabel 2.13 Neraca Panas Reaktor (R-210)

Komponen	Q masuk	Qkeluar
HCOOCH ₃	213755,45	149628,82
H ₂ O	138363,47	97898,96
HCOOH		54581,92
CH ₃ OH		44460,12
Q Reaksi	-115434,7826	
Q Pemanas	109885,69	
Total	346569,82	346569,82

2.6.4. Neraca Panas Cooler (E-212)

Tabel 2.14 Neraca Panas Cooler (E-212)

Komponen	Q masuk	Qkeluar
HCOOCH ₃	149628,82	13044,27
H ₂ O	97898,96	8934,29
HCOOH	54581,92	4827,26
CH ₃ OH	44460,12	3920,04
Q Pendingin		315843,97
Total	346569,82	346569,82

2.6.5. Neraca Panas Mixer (M-220)

Tabel 2.15 Neraca Panas Mixer (M-220)

Komponen	Q masuk	Qkeluar
HCOOCH ₃	21456,47	60131,09
H ₂ O	306351,56	143352,13
HCOOH	4941,32	13553,43
CH ₃ OH	4050,43	11328,85
Q Terserap	-108434,29	
Total	228365,49	228365,49

2.6.6. Neraca Panas HE (E-222)

Tabel 2.16 Neraca Panas HE (E-222)

Komponen	Q masuk	Qkeluar
HCOOCH ₃	60131,09	246117,84
H ₂ O	143352,13	564966,93
HCOOH	13553,43	54778,64
CH ₃ OH	11328,85	45929,89
Q Pemanas	683427,81	
Total	911793,30	911793,30

2.6.7. Neraca Panas Reaktor (R-230)

Tabel 2.17 Neraca Panas Reaktor (R-230)

Komponen	Q masuk	Qkeluar
HCOOCH ₃	246117,84	98447,14
H ₂ O	564966,93	471785,35
HCOOH	54778,64	180469,79
CH ₃ OH	45929,89	148312,57
Q Reaksi	-265823,013	
Q Pemanas	253044,56	
Total	899014,85	899014,85

2.6.8. Neraca Panas HE (E-232)

Tabel 2.18 Neraca Panas HE (E-232)

Komponen	Q masuk	Qkeluar
HCOOCH ₃	98447,14	117475,06
H ₂ O	471785,35	557604,28
HCOOH	180469,79	214461,79
CH ₃ OH	148312,57	176510,24
Q Pemanas	167036,52	
Total	1066051,37	1066051,37

2.6.9. Neraca Panas Distilasi (D-310)

Tabel 2.19 Neraca Panas Distilasi (D-310)

Komponen	Q masuk		Qkeluar
HCOOCH ₃	117475,06	67502,71	1382,2012
H ₂ O	557604,28	3318,01	642792,41
HCOOH	214461,79	1257,31	248604,11
CH ₃ OH	176510,24	102106,05	2070,6369
Q kondensor		4047078,058	
Q reboiler	4050060,13		
Total	5116111,50		5116111,50

2.6.10. Neraca Panas Distilasi (D-410)

Tabel 2.20 Neraca Panas Distilasi (D-410)

Komponen	Q masuk		Qkeluar
HCOOCH ₃	67502,70739	8411,587874	914,9017
H ₂ O	3318,014204	4,305526151	4397,8303
HCOOH	1257,311164	1,596085792	1679,2545
CH ₃ OH	102106,048	129,459121	136565,82
Q kondensor		972777,7763	

Q reboiler	950698,45	
Total	1124882,53	1124882,53

2.6.11. Neraca Panas Cooler (E-416)

Tabel 2.21 Neraca Panas Cooler (E-416)

Komponen	Q masuk	Qkeluar
HCOOCH ₃	914,90	84,97
H ₂ O	4397,83	426,25
HCOOH	1679,25	158,01
CH ₃ OH	136565,82	12816,45
Q Pendingin		130072,12
Total	143557,80	143557,80

2.6.12. Neraca Panas HE (E-132)

Tabel 2.22 Neraca Panas HE (E-132)

Komponen	Q masuk	Qkeluar
C ₄ H ₈ O ₂ S(l)	147241,56	3035228,93
Q Pemanas	2887987,38	
Total	3035228,93	3035228,93

2.6.13. Neraca Panas Distilasi (D-510)

Tabel 2.23 Neraca Panas Distilasi (D-510)

Komponen	Q masuk		Qkeluar
HCOOCH ₃	1382,20	0,62	2883,1704
H ₂ O	642792,41	297412,97	124,74996
HCOOH	248604,11	112,46	497671,75
CH ₃ OH	2070,64	0,93	4220,0068
C ₄ H ₈ O ₂ S	3035228,93	0,01	4513538,8
Q kondensor		796404,1799	
Q reboiler	2182291,35		
Total	6112369,6		6112369,6

2.6.14. Neraca Panas Distilasi (D-610)

Tabel 2.24 Neraca Panas Distilasi (D-610)

Komponen	Q masuk		Qkeluar
HCOOCH ₃	2883,170355	0,592129779	3791,667
H ₂ O	124,749957	0,028684359	157,3912
HCOOH	497671,7543	108155,1531	638,12939
CH ₃ OH	4220,006809	0,896696412	5470,2044
C ₄ H ₈ O ₂ S	4513538,793	100,6245422	5700142,6

Q kondensor	468669,0126	
Q reboiler	1268687,78	
Total	6287126,3	6287126,3

2.6.15. Neraca Panas Cooler (E-616)

Tabel 2.25 Neraca Panas Cooler (E-616)

Komponen	Q masuk	Qkeluar
HCOOCH ₃	0,592129779	0,085737948
H ₂ O	0,028684359	0,004262471
HCOOH	108155,1531	15769,66264
CH ₃ OH	0,896696412	0,130636022
C ₄ H ₈ O ₂ S	100,6245422	14,72415563
Q Pendingin		92472,69
Total	108257,30	108257,30

2.6.16. Neraca Panas Overall

Tabel 2.26 Neraca Panas Overall

Komponen	Q masuk	Qkeluar
HE (E-112)		
HCOOCH ₃	18634,67	
Q Pemanas	195120,78	
HE (E-122)		
H ₂ O	12627,09	
Q Pemanas	125736,38	
Reaktor (R-210)		
Q Reaksi	-115434,783	
Q Pemanas	109885,69	
HE (E-212)		
HCOOCH ₃		
H ₂ O		
Q Pendingin		315843,97
Mixer (M-220)		
HCOOCH ₃		
H ₂ O		
Q Terserap	-108434,29	
HE (E-222)		
Q Pemanas	683427,81	
Reaktor (R-230)		
Q Reaksi	-265823,0129	

Q Pemanas	253044,5617	
HE (E-232)		
Q Pemanas	167036,51	
Distilasi (D-310)		
Q kondensor		4047078,05
Q reboiler	4050060,13	
Distilasi (D-410)		
Q kondensor		972777,8
Q reboiler	950698,4	
HE (E-416)		
HCOOCH ₃		85,0
H ₂ O		426,2
HCOOH		158,0
CH ₃ OH		12816,5
Q Pendingin		130072,1
HE (E-132)		
C ₄ H ₈ O ₂ S(l)	147241,56	
Q Pemanas	2887987,38	
Distilasi (D-510)		
Q kondensor		796404,18
Q reboiler	2182291,35	
Distilasi (D-610)		
Q kondensor		468669,01
Q reboiler	1268687,78	
HCOOCH ₃		3791,67
H ₂ O		157,39
HCOOH		638,13
CH ₃ OH		5470,20
C ₄ H ₈ O ₂ S		5700142,56
HE (E-616)		
HCOOCH ₃		0,086
H ₂ O		0,004
HCOOH		15769,663
CH ₃ OH		0,131
C ₄ H ₈ O ₂ S		14,724
Q Pendingin		92472,688
TOTAL	12562788	12562788

2.7. Tata Letak dan Pemetaan Pabrik

Tata letak dan pemetaan pabrik adalah salah satu bagian penting dalam prarancangan pabrik. Tata letak pabrik yang efisien sangat penting dalam meningkatkan produktivitas, mengurangi biaya operasional, dan memastikan kelancaran proses produksi. Perencanaan tata letak dan pemetaan pabrik harus mempertimbangkan berbagai faktor seperti aliran material, keamanan, efisiensi energi, serta kenyamanan pekerja. Pemetaan tata letak pabrik meliputi dua aspek utama, yaitu laout pabrik dan layout peralatan proses. Layout pabrik mencakup keseluruhan struktur dan pembagian zona dalam pabrik, sedangkan layout peralatan proses berfokus pada penempatan mesin dan peralatan dalam area produksi.

2.7.1. Lay Out Pabrik

Untuk mencapai kondisi optimal terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam perancangan tata letak pabrik, antara lain:

1. Kemudahan operasi dan produksi

Tata letak pabrik harus mendukung kelancaran proses produksi serta mempermudah pemeliharaan peralatan dan pengawasan hasil produksi.

2. Perencanaan ekspansi

Perluasan pabrik harus direncanakan sejak awal untuk menghindari kendala keterbatasan ruang di masa depan.

3. Keamanan dan keselamatan

Tata letak pabrik harus mempertimbangkan aspek keamanan terhadap risiko yang kemungkinan terjadi seperti kebakaran, ledakan, atau kebocoran gas beracun. Oleh karena itu perlu disediakan peralatan keselamatan seperti *hydrant*, penampungan air yang memadai, alat penahan ledakan, serta sensor gas beracun. Tangki penyimpanan bahan baku atau produk berbahaya harus ditempatkan di area khusus agar dapat diawasi dengan baik.

4. Sistem konstruksi

Pabrik dirancang dengan sistem konstruksi terbuka (*outdoor*) untuk mengurangi biaya pembangunan serta menyesuaikan dengan kondisi iklim Indonesia yang memungkinkan penggunaan konstruksi terbuka.

5. Efisiensi lahan

Efisiensi lahan dilakukan karena keterbatasan lahan dengan memanfaatkan ruang harus diatur secara efisien agar dapat menampung seluruh fasilitas yang dibutuhkan.

6. Pengelolaan limbah

Sistem pengolahan limbah harus dirancang dengan baik agar tidak mencemari lingkungan atau mengganggu operasional pabrik.

7. Instalasi dan utilitas

Pemasangan dan distribusi utilitas seperti gas, steam, dan listrik harus dirancang secara optimal untuk mendukung kelancaran produksi serta perawatan peralatan.

Secara umum, pabrik dibagi menjadi beberapa area utama, yaitu:

1. Area administrasi, laboratorium dan fasilitas pendukung

- Administrasi sebagai pengelola aktivitas administrasi dan keuangan guna memastikan kelancaran operasional pabrik.
- Laboratorium sebagai pusat pengendalian kualitas dan kuantitas bahan baku serta produk akhir.
- Fasilitas pendukung berupa fasilitas karyawan yang meliputi poliklinik, kantin, aula, tempat parkir, pos keamanan, dan tempat ibadah.

2. Area proses dan ruang kontrol

- Area proses sebagai pusat produksi yang menampung peralatan dan sistem kendali proses. Area ini ditempatkan dibagian tengah pabrik agar tidak mengganggu operasional lainnya serta dirancang untuk mempermudah pemindahan bahan baku dari tangki penyimpanan, pengawasan, dan pemeliharaan peralatan. Jarak minimal area proses dengan bagian lain adalah 15 meter.
- Ruang kontrol sebagai pusat pemantauan dan pengendalian kondisi operasi seperti tekanan dan suhu untuk memastikan proses berjalan sesuai standar.

3. Area pemeliharaan

Area pemeliharaan sebagai tempat penyimpanan suku cadang serta lokasi perbaikan dan perawatan seluruh peralatan proses produksi.

4. Area utilitas

Area utilitas menyediakan fasilitas penunjang produksi seperti air, steam, dan listrik. Letaknya dekat dengan area proses untuk menghemat sistem perpipaan, namun tetap harus memiliki jarak minimal 15 meter untuk menghindari potensi risiko bahaya.

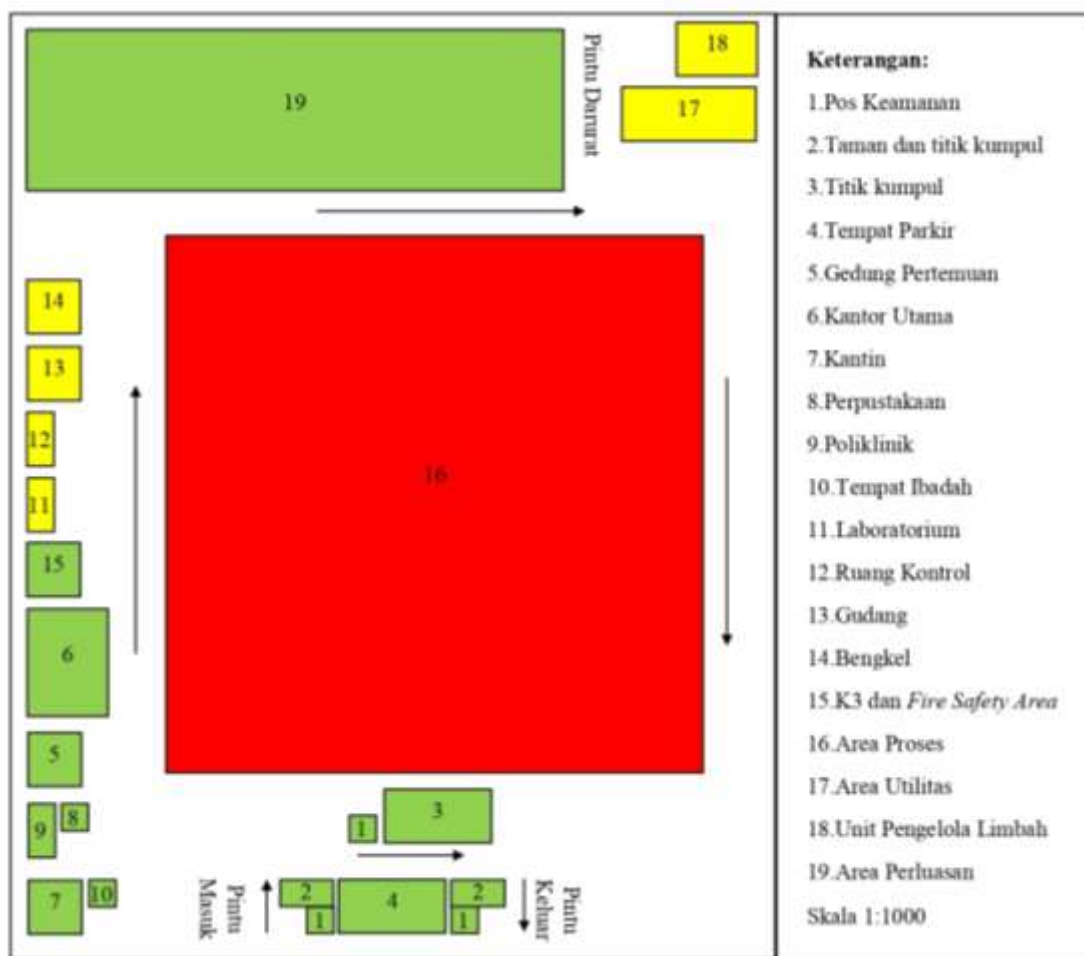
5. Area pengolahan limbah

Area pengolahan limbah dirancang untuk mengolah dan membuang limbah yang dihasilkan selama proses produksi.

Tabel 2.27 Luas Bagian-Bagian Pabrik

No.	Bangunan	Lebar (m)	Panjang (m)	Luas (m ²)
1.	Pos Keamanan	5	5	25
2.	Taman dan titik kumpul	5	10	50
3.	Titik kumpul	10	20	200
4.	Tempat Parkir	10	20	200
5.	Gedung Pertemuan	10	10	100
6.	Kantor Utama	20	15	300
7.	Kantin	10	10	100
8.	Perpustakaan	5	5	25
9.	Poliklinik	10	5	50
10.	Tempat Ibadah	5	5	25
11.	Laboratorium	10	5	50
12.	Ruang Kontrol	10	5	50
13.	Gudang	10	10	100
14.	Bengkel	10	10	100
15.	K3 dan <i>Fire Safety Area</i>	10	10	100

16.	Area Proses	100	100	10000
17.	Area Utilitas	10	25	250
18.	Unit Pengelola Limbah	10	15	150
19.	Area Perluasan	30	100	3000
Total				14875



Gambar 2.2 Layout Pabrik Asam Format

2.7.2. Lay Out Peralatan Proses

Efisiensi dalam perancangan tata letak peralatan pabrik sangat penting untuk memastikan kelancaran proses produksi, keselamatan pekerja, dan efektivitas biaya.

Berikut adalah beberapa faktor utama yang perlu diperhatikan dalam perancangannya:

a. Alur bahan baku dan produk yang optimal

Perencanaan yang baik dalam alur bahan baku dan produk dapat meningkatkan efektivitas produksi serta mengurangi pemborosan waktu dan biaya. Selain itu, alur yang optimal juga membantu menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman dan teratur.

b. Sirkulasi udara yang lancar

Sistem ventilasi yang baik sangat penting untuk menjaga kualitas udara dan mencegah akumulasi gas berbahaya. Selain itu, arah angin dominan perlu dipertimbangkan untuk memastikan distribusi udara yang merata dan mengurangi risiko pencemaran udara dalam area kerja.

c. Pencahayaan yang cukup

Pabrik harus memiliki pencahayaan yang memadai, terutama di area kerja yang memiliki risiko tinggi. Pencahayaan yang baik tidak hanya meningkatkan visibilitas pekerja, tetapi juga mengurangi potensi kecelakaan akibat kurangnya penerangan.

d. Aksesibilitas dan keamanan pekerja

Tata letak pabrik harus memungkinkan pekerja untuk bergerak dengan cepat dan aman di sekitar peralatan, terutama dalam kondisi darurat. Jalur evakuasi dan akses terhadap alat keselamatan harus selalu tersedia dan tidak terhalang oleh peralatan atau material produksi.

e. Kemudahan akses bagi alat berat

Ruang yang cukup harus disediakan untuk memudahkan alat berat seperti forklift atau crane dalam menjangkau peralatan proses. Hal ini penting untuk efisiensi operasional, pemeliharaan peralatan, dan penanganan gangguan yang mungkin terjadi.

f. Keamanan yang terjamin

Penempatan peralatan harus dilakukan dengan mempertimbangkan aspek keselamatan kerja. Jika terjadi keadaan darurat seperti kebakaran, akses kendaraan pemadam kebakaran harus tersedia tanpa hambatan. Selain itu, tata letak yang baik harus:

1. Memastikan proses produksi berjalan lancar;
2. Mengoptimalkan penggunaan ruang yang tersedia;
3. Mengurangi biaya operasional dan transportasi dalam pabrik;
4. Meminimalkan penggunaan alat angkut mahal melalui efisiensi alur produksi;
5. Meningkatkan kenyamanan dan kepuasan kerja karyawan.

g. Ruang yang memadai untuk perawatan

Mesin dan peralatan produksi membutuhkan ruang yang cukup untuk perawatan rutin dan perbaikan. Misalnya, heat exchanger memerlukan akses yang cukup luas untuk membersihkan tube secara optimal.

h. Fleksibilitas untuk pengembangan di masa depan

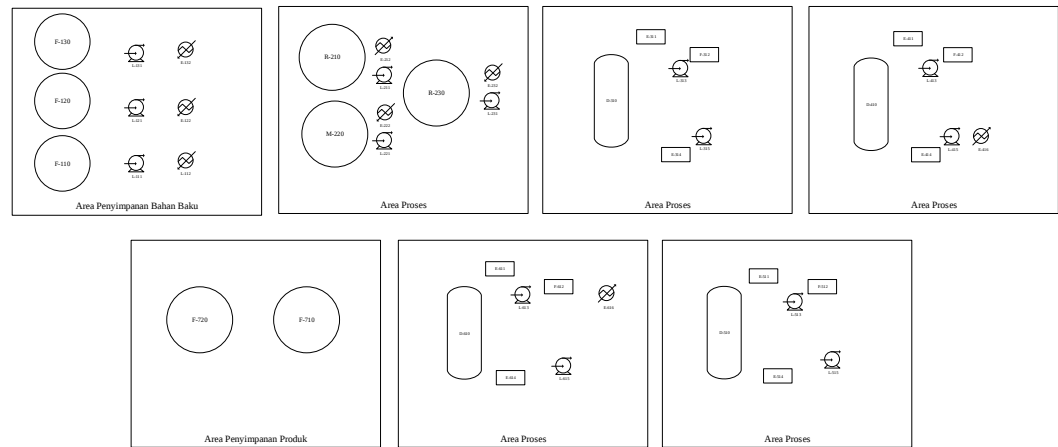
Pabrik harus dirancang agar dapat menyesuaikan dengan perkembangan di masa mendatang. Ruang tambahan untuk ekspansi unit produksi harus dipertimbangkan sejak awal perancangan tata letak.

i. Efisiensi dalam Aspek Ekonomi

Penempatan peralatan harus mempertimbangkan penghematan biaya, baik dalam tahap konstruksi maupun operasional. Ini dapat dilakukan dengan meminimalkan panjang pipa, mengurangi kebutuhan material tambahan, dan mengoptimalkan distribusi peralatan.

j. Jarak Aman Antar Peralatan

Peralatan yang beroperasi pada suhu dan tekanan tinggi harus ditempatkan pada jarak aman dari mesin lain untuk mengurangi risiko jika terjadi insiden, seperti kebakaran atau ledakan. Dengan demikian, keamanan operasional dapat lebih terjamin.



Gambar 2.3 *Layout* Alat Proses