

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1 Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1 Spesifikasi Bahan Baku

Proses produksi menggunakan bahan utama berupa methanol (CH_3OH) dengan spesifikasi sebagai berikut (National Center for Biotechnology Information, 2024):

- Rumus molekul = CH_3OH
- Wujud = Cair
- Berat molekul = 32 gr/mol
- Densitas = 0,792 gr/ml
- Viskositas = 0,539 cp
- Titik didih = $64,7^\circ\text{C}$
- Titik leleh = $-97,8^\circ\text{C}$
- Warna = Tidak berwarna
- Kemurnian = 99% berat
- Impuritas = $\text{H}_2\text{O} \leq 0,8\%$ berat ;
Acidity $\leq 0,2\%$ berat

Bahan baku utama pabrik adalah karbon monoksida (CO). Berikut merupakan spesifikasi karbon monoksida yang digunakan (Ullmann,2011):

- Rumus molekul = CO
- Wujud = Gas
- Berat molekul = 28,01 gr/mol
- Densitas = $1,145 \text{ kg/m}^3$ atau
- Viskositas = 0.018 mPa.s
- Titik didih = $-191,5^\circ\text{C}$
- Titik leleh = -205°C
- Warna = Tidak berwarna
- Kemurnian = 99% berat
- Impuritas = $\text{CO}_2, \text{H}_2, \text{N}_2$

Bahan baku setengah jadi pabrik adalah metil format (HCOOCH_3). Berikut merupakan spesifikasi metil format yang digunakan (Shenyu Energy (Shandong) Development Co. Ltd, 2024):

- Rumus molekul = HCOOCH_3
- Wujud = Cair
- Berat molekul = 60,05 gr/mol
- Densitas = 0,974 gr/cm³
- Viskositas = 0,330 cP
- Titik didih = 32°C
- Titik leleh = -100°C
- Warna = Tidak berwarna
- Kemurnian = minimum

Bahan baku lain yang digunakan adalah air (H_2O). Spesifikasi air adalah sebagai berikut menurut National Center for Biotechnology Information (2024):

- Rumus molekul = H_2O
- Wujud = Cair
- Berat molekul = 18 gr/mol
- Densitas = 1,000 g/cm³
- Viskositas = 0,998 cp
- Titik didih = 100°C
- Titik leleh = 0°C
- Warna = Tidak berwarna
- Kemurnian = 100%

Bahan baku lain yang digunakan sebagai katalis adalah Natrium Metoksida/Sodium Methoxide (NaOCH_3). Spesifikasi Natrium Metoksida adalah sebagai berikut menurut National Center for Biotechnology Information (2024):

- Rumus molekul = NaOCH_3
- Wujud = Padatan / larutan metanol
- Berat molekul = 54,02 gr/mol

- Warna = Tidak berwarna
- Kemurnian = 95%
- Impuritas = NaOH, air

2.1.2 Spesifikasi Produk Utama

Produk utama hasil proses di pabrik ini adalah asam format yang memiliki spesifikasi seperti berikut (Ullmann, 2011):

- Rumus molekul = HCOOH
- Wujud = Cair
- Berat molekul = 46,026 gr/mol
- Densitas (20 °C) = 1,185 gr/ml
- Viskositas = 1,804 cP
- Titik didih = 100,8 °C
- Titik leleh = 8,6 °C
- Warna = tidak berwarna
- Kemurnian = 85%
- Impuritas = H₂O ; 15%

2.1.3 Spesifikasi Produk Samping

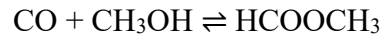
Proses produksi di sini menghasilkan produk samping berupa metanol dengan spesifikasi sebagai berikut (National Center for Biotechnology Information, 2024):

- Rumus molekul = CH₃OH
- Wujud = Cair
- Berat molekul = 32 gr/mol
- Densitas = 0,792 gr/ml
- Viskositas = 0,539 cP
- Titik didih = 64,7°C
- Titik leleh = -97,8°C
- Warna = Tidak berwarna
- Kemurnian = 99% berat
- Impuritas = H₂O ≤ 0,8% berat ; Acidity ≤ 0,2% berat

2.2 Konsep Proses

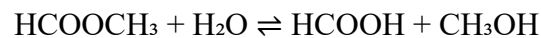
2.2.1 Dasar Reaksi

- Reaksi Karbonilasi



Reaksi karbonilasi ini merupakan reaksi pembentukan (sintesis) yang bersifat eksotermis. Reaksi berlangsung dengan menggabungkan CH_3OH (metanol) dengan CO (karbon monoksida) untuk membentuk produk utama. Sifat reaksi ini adalah reversibel dan memerlukan katalis. Produk yang dihasilkan dari reaksi karbonilasi ini adalah HCOOCH_3 (metil format) sebagai produk utama.

- Reaksi Hidrolisis Metil Format



Reaksi hidrolisis Metil format merupakan reaksi pemecahan senyawa ester oleh air yang menghasilkan asam karboksilat dan alkohol, dimana pada metil format produk yang dihasilkan adalah Formic acid dan Metanol. Metil format sendiri merupakan ester hasil reaksi antara asam format dan metanol, sehingga ketika direaksikan dengan air, ikatan ester akan terputus, gugus format (HCOO^-) berubah menjadi asam format, sedangkan gugus metil (CH_3^-) berubah menjadi metanol. Reaksi ini bersifat reversibel karena dapat berlangsung ke arah hidrolisis maupun esterifikasi, sehingga dalam operasi industri umumnya digunakan air berlebih agar kesetimbangan bergeser ke arah produk.

2.2.2 Mekanisme Reaksi

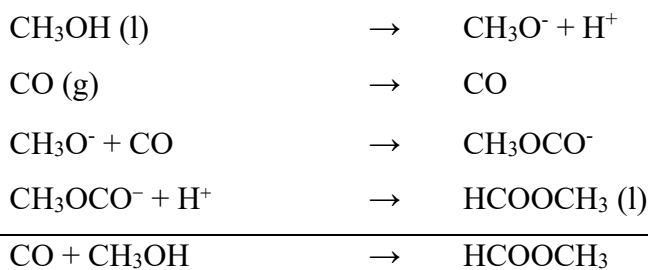
Menurut Ullman mekanisme reaksi ini berlangsung melalui beberapa tahap yaitu:

1. Tahap pertama adalah aktivasi gugus karbonil, di mana atom oksigen pada gugus karbonil ($\text{C}=\text{O}$) dari metil format (HCOOCH_3) mengalami protonasi atau berinteraksi dengan katalis, sehingga atom karbon karbonil menjadi lebih elektrofilik dan rentan terhadap serangan nukleofil.
2. Tahap kedua adalah serangan nukleofil oleh air, molekul H_2O bertindak sebagai nukleofil menyerang atom karbon karbonil yang telah teraktivasi, membentuk

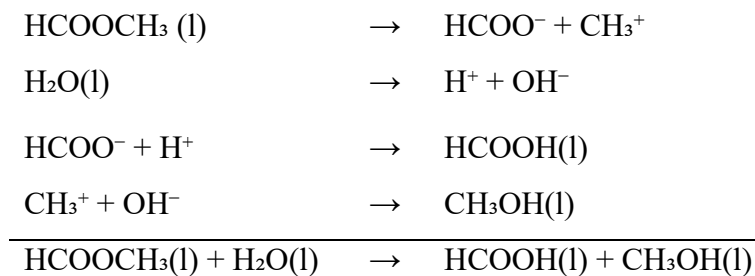
intermediate tetrahedral. Pada tahap ini, hibridisasi atom karbon berubah dari sp^2 menjadi sp^3 dan ikatan rangkap C=O berubah menjadi ikatan tunggal C-OH.

3. Tahap ketiga adalah pembentukan intermediate tetrahedral yang memiliki struktur dengan empat gugus terikat pada atom karbon pusat: gugus -OH dari air yang menyerang, gugus -OCH₃ (metoksi) dari ester awal, gugus -H dari formil, dan gugus -OH yang terprotonasi. Intermediate ini bersifat tidak stabil dan akan mengalami rearrangement.
4. Tahap keempat adalah pemutusan ikatan C-O ester, intermediate tetrahedral mengalami eliminasi dengan melepaskan gugus alkoksi (OCH₃⁻). Ikatan antara karbon karbonil dengan oksigen dari gugus metoksi terputus, dan terbentuk kembali ikatan rangkap C=O pada gugus asam format.
5. Tahap kelima adalah protonasi gugus alkoksi, ion metoksida (OCH₃⁻) yang terlepas segera terprotonasi oleh proton dari pelarut atau katalis asam membentuk metanol (CH₃OH) sebagai produk akhir.
6. Tahap keenam adalah pembentukan produk akhir, terbentuk dua produk yaitu HCOOH (asam format) dan CH₃OH (metanol).

Berikut mekanisme reaksi karbonilasi metanol:



Berikut mekanisme reaksi hidrolisis metil format:



2.2.3 Fase Reaksi

Reaksi karbonilasi metanol berlangsung dengan metanol dalam fasa cair terdisosiasi menjadi ion metoksida dan ion hidrogen dalam fasa cair. Karbon monoksida dalam fasa gas diaktivasi melalui koordinasi dengan katalis. Ion metoksida dalam fasa cair menyerang karbon monoksida dalam fasa gas membentuk intermediate dalam fasa cair, yang selanjutnya bereaksi dengan ion hidrogen dalam fasa cair membentuk produk akhir metil format dalam fasa cair.

Reaksi hidrolisis metil format berlangsung dengan metil format dalam fasa cair terdisosiasi menjadi ion format dan ion metil dalam fasa larutan. Molekul air dalam fasa cair mengalami autoionisasi menjadi ion hidrogen dan ion hidroksida dalam fasa larutan. Ion format dalam fasa larutan bereaksi dengan ion hidrogen dalam fasa larutan membentuk asam format dalam fasa cair, sementara ion metil dalam fasa larutan bereaksi dengan ion hidroksida dalam fasa larutan membentuk metanol dalam fasa cair.

2.2.4 Kondisi Operasi

Menurut (Ullman, 2011) reaksi karbonilasi berlangsung dalam sistem dua fase gas-cair, dengan metanol berada pada fase cair dan karbon monoksida pada fase gas. Karbonilasi dilakukan menggunakan katalis basa, umumnya natrium metoksida, yang digunakan dalam jumlah kecil. Untuk meningkatkan laju reaksi dan konversi, diperlukan tekanan parsial karbon monoksida yang tinggi, sehingga reaksi dioperasikan pada tekanan 45 Bar. Suhu reaksi relatif moderat, yaitu 86°C, karena reaksi bersifat eksotermis dan suhu yang terlalu tinggi dapat menurunkan kestabilan metil format.

Tahap kedua reaksi hidrolisis metil format yang bertujuan menghasilkan asam format dan meregenerasi metanol. Reaksi ini berlangsung dalam fase cair dengan menggunakan air sebagai reaktan dan dijalankan tanpa penambahan katalis asam kuat. Hidrolisis berlangsung secara autokatalitik oleh asam format yang terbentuk selama reaksi. Untuk mempercepat reaksi dan mencapai kesetimbangan, proses dioperasikan pada suhu yang lebih tinggi dibanding tahap karbonilasi, yaitu 90°C, dengan tekanan 1,5 Bar untuk mempertahankan kondisi cair. Air digunakan dalam jumlah berlebih untuk menggeser kesetimbangan ke arah pembentukan asam format. Metanol hasil

hidrolisis kemudian dipisahkan dan direcycle ke tahap karbonilasi, sehingga membentuk suatu sistem proses yang terintegrasi dan efisien.

2.2.5 Tinjauan Thermodinamika

1) Panas Reaksi

Untuk mengetahui sifat reaksi eksotermis atau endotermis, panas reaksi atau ΔHR pada proses perlu dihitung. Nilai tersebut didapat dari pengurangan panas pembentukan produk dengan reaktan pada kondisi 1 atm dan 25°C (Yaws, 1999). Berikut perhitungan panas reaksi dari proses yang dijalankan:

Tabel 2. 1 Harga ΔH_f Masing-Masing Komponen Reaksi (Yaws, 1999)

Komponen	ΔH°_f (kJ/mol)
CH ₃ OH (l)	-201,17
CO (g)	-110,54
HCOOCH ₃ (l)	-349,78
H ₂ O (g)	-241,80
HCOOH (l)	-378,61

Reaksi Karbonilasi Metanol: $\text{CH}_3\text{OH} + \text{CO} > \text{HCOOCH}_3$

Maka,

$$\Delta HR_{298K} = \Delta H^{\circ}_f \text{ produk} - \Delta H^{\circ}_f \text{ reaktan}$$

$$\Delta HR_{298K} = (\Delta H^{\circ}_f \text{HCOOCH}_3) - (\Delta H^{\circ}_f \text{CH}_3\text{OH} + \Delta H^{\circ}_f \text{CO})$$

$$\Delta HR_{298K} = (-349,78) - (-201,17 + -110,54)$$

$$\Delta HR_{298K} = -38,07 \text{ kJ/mol}$$

Karena harga ΔHR_{298K} bernilai negatif, dapat diketahui bahwa reaksi bersifat eksotermis.

Reaksi Hidrolisis Metil Format: $\text{HCOOCH}_3(\text{l}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) > \text{HCOOH}(\text{l}) + \text{CH}_3\text{OH}(\text{l})$

Maka,

$$\Delta HR_{298K} = \Delta H^{\circ}_f \text{ produk} - \Delta H^{\circ}_f \text{ reaktan}$$

$$\Delta HR_{298K} = (\Delta H^{\circ}_f \text{HCOOH} + \Delta H^{\circ}_f \text{CH}_3\text{OH}) - (\Delta H^{\circ}_f \text{HCOOCH}_3 + \Delta H^{\circ}_f \text{H}_2\text{O})$$

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

$$\Delta H_{R 298K} = +11,08 \text{ kJ/mol}$$

Karena harga $\Delta H_{R 298K}$ bernilai positif, dapat diketahui bahwa reaksi bersifat endotermis.

2) Energi Gibbs

Energi gibbs besaran yang digunakan untuk mengukur usaha maksimum yang dapat dilakukan oleh sistem termodinamika pada kondisi operasi yang konstan (Yaws, 1999). Berikut perhitungan energi gibbs dari proses yang dijalankan:

Tabel 2. 2 Harga ΔG° Masing-Masing Komponen Reaksi (Yaws, 1999)

Komponen	ΔG° (kJ/mol)
CH ₃ OH (l)	-162,51
CO (g)	-137,28
HCOOCH ₃ (l)	-297,19
H ₂ O (g)	-228,60
HCOOH (l)	-351,00

Reaksi Karbonilasi Metanol: CH₃OH + CO > HCOOCH₃

Maka,

$$\Delta G_{298K} = \Delta G^{\circ} \text{ produk} - \Delta G^{\circ} \text{ reaktan}$$

$$\Delta G_{298K} = (\Delta G^{\circ} \text{ HCOOCH}_3) - (\Delta G^{\circ} \text{ CH}_3\text{OH} + \Delta G^{\circ} \text{ CO})$$

$$\Delta G_{298K} = (-297,19) - (-162,51 + -137,28)$$

$$\Delta G_{298K} = +2,6 \text{ kJ/mol}$$

Reaksi Hidrolisis Metil Format: HCOOCH₃(l) + H₂O(l) > HCOOH(l) + CH₃OH (l)

Maka,

$$\Delta G_{298K} = \Delta G^{\circ} \text{ produk} - \Delta G^{\circ} \text{ reaktan}$$

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

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

$$\Delta G_{298K} = +12,28 \text{ kJ/mol}$$

Menurut Yaws (1999) ΔG positif mengindikasikan bahwa reaksi memerlukan suplai energi eksternal agar dapat berlangsung.

3) Konstanta Keseimbangan Reaksi

Harga konstanta keseimbangan reaksi (K) menunjukkan kecenderungan arah laju reaksi yang terjadi. Jika nilainya sangat kurang dari satu, pembentukan reaksi balik yang cenderung terjadi. Jika nilainya mendekati atau sama dengan satu, reaksi bersifat reversible. Jika nilainya lebih dari satu, reaksi cenderung berjalan membentuk produk (Smith et al., 2001). Berikut perhitungan konstanta keseimbangan reaksi metil format dan air:

$$\ln K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) =$$

$$\ln K = \exp\left(-\frac{2.6}{8.314 \times 298}\right)$$

$$\ln K = \exp(-0,00105)$$

$$K = 0,998$$

Nilai konstanta keseimbangan reaksi karbonilasi metanol pada 298 K sebesar 0,998 menunjukkan bahwa reaksi berada sangat dekat dengan kondisi keseimbangan termodinamika ($K \approx 1$). Sehingga perlu pengaturan tekanan dan suhu diperlukan untuk menggeser keseimbangan ke arah pembentukan produk.

$$\ln K = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) =$$

$$\ln K = \exp\left(-\frac{12.280}{8.314 \times 298}\right)$$

$$\ln K = \exp(-4,96)$$

$$K = 0,007$$

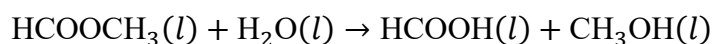
Nilai konstanta keseimbangan reaksi hidrolisis metil format yang sangat kecil ($K \approx 0,007$) menunjukkan bahwa reaksi ini tidak berlangsung secara spontan pada kondisi standar, sehingga diperlukan strategi pemisahan produk secara kontinu untuk menggeser keseimbangan ke arah pembentukan asam format.

Nilai perubahan energi Gibbs standar (ΔG°) yang positif namun relatif kecil tidak serta-merta menunjukkan bahwa suatu reaksi tidak dapat berlangsung, melainkan mengindikasikan bahwa reaksi tersebut tidak menguntungkan pada kondisi standar

(298 K dan 1 atm). Dalam praktik industri, reaksi kimia jarang dioperasikan pada kondisi standar, sehingga arah dan derajat reaksi dapat diatur melalui manipulasi kondisi kesetimbangan. Pendekatan yang umum dilakukan meliputi peningkatan tekanan dan temperatur operasi, penggunaan reaktan berlebih, serta penerapan sistem recycle untuk meningkatkan konversi keseluruhan. Selain itu, pemisahan produk secara kontinu melalui kolom distilasi berperan penting dalam menurunkan konsentrasi produk di dalam reaktor, sehingga kesetimbangan reaksi bergeser ke arah pembentukan produk sesuai dengan prinsip Le Chatelier. Lebih lanjut, penerapan membrane-assisted separation menjadi alternatif inovatif dalam proses industri modern, karena memungkinkan pemisahan selektif produk atau reaktan secara in-situ dengan konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Oleh karena itu, analisis termodinamika berbasis ΔG° dan konstanta kesetimbangan tidak hanya berfungsi sebagai indikator kelayakan reaksi, tetapi juga menjadi dasar kuat dalam justifikasi pemilihan dan perancangan strategi proses pada skala industri.

Penjabaran Hasil Perhitungan Konversi Reaksi Hidrolisis Metil Format

Reaksi hidrolisis metil format merupakan reaksi antara metil format dan air yang menghasilkan asam format dan metanol. Persamaan reaksi yang digunakan adalah sebagai berikut:



Berdasarkan persamaan reaksi tersebut, perbandingan stoikiometri antara metil format dan air adalah 1:1. Namun, pada proses ini air diumpangkan dalam jumlah berlebih dengan rasio molar metil format terhadap air sebesar 1:5. Penggunaan air berlebih bertujuan untuk menggeser reaksi ke arah pembentukan produk, yaitu asam format dan metanol.

Data umpan reaktor yang digunakan dalam perhitungan adalah sebagai berikut:

Komponen	Massa Masuk (kg/jam)	BM (kg/kmol)	Laju Alir Mol (kmol/jam)
Metil format, HCOOCH ₃	4.940,711	60	82,345

Air, H ₂ O	7.411,067	18	411,726
-----------------------	-----------	----	---------

Dari data tersebut, metil format menjadi reaktan pembatas karena jumlah molnya lebih kecil dibandingkan air. Perbandingan molar antara metil format dan air adalah:

$$\left[\frac{n_{H_2O}}{n_{HCOOCH_3}} = \frac{411,726}{82,345} = 5 \right]$$

Sehingga, rasio umpan reaksi adalah:

$$[HCOOCH_3 : H_2O = 1 : 5]$$

Perhitungan konstanta laju reaksi dilakukan menggunakan persamaan Arrhenius:

$$\left[k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \right]$$

dengan nilai faktor frekuensi ($A = 0,123257472$), energi aktivasi ($E_a = 66,4$), konstanta gas ($R = 8,314$), dan suhu operasi reaktor sebesar 90°C atau $363,15\text{ K}$. Dengan memasukkan nilai tersebut ke dalam persamaan Arrhenius, diperoleh nilai konstanta laju reaksi pada suhu 90°C sebesar:

$$[k = 0,120576339]$$

Nilai ini menunjukkan bahwa konstanta laju reaksi meningkat sesuai dengan kenaikan suhu operasi. Pada kondisi operasi reaktor 90°C , reaksi berlangsung pada fase cair dan dihitung dengan konversi metil format sebesar 60%.

Basis perhitungan konversi menggunakan laju alir mol metil format sebagai reaktan pembatas, yaitu:

$$F_{A0} = 82,345 \text{ kmol/jam}$$

Dengan konversi metil format sebesar 60%, maka jumlah metil format yang bereaksi adalah:

$$F_{A0} \times X = 82,345 \times 0,60 = 49,407 \text{ kmol/jam}$$

Berdasarkan stoikiometri reaksi, setiap 1 kmol metil format yang bereaksi akan mengonsumsi 1 kmol air serta menghasilkan 1 kmol asam format dan 1 kmol metanol. Oleh karena itu, jumlah air yang bereaksi, asam format yang terbentuk, dan metanol yang terbentuk masing-masing sebesar 49,407 kmol/jam.

Neraca mol reaksi dapat dituliskan sebagai berikut:

Komponen	Massa Masuk (kg/jam)	BM (kg/kmol)	Laju Alir Mol (kmol/jam)
Metil format (HCOOCH ₃)	4.940,711	60	82,345
Air (H ₂ O)	7.411,067	18	411,726

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, pada konversi 60% masih terdapat sisa metil format sebesar 32,938 kmol/jam dan sisa air sebesar 362,319 kmol/jam. Produk yang terbentuk berupa asam format sebesar 49,407 kmol/jam dan metanol sebesar 49,407 kmol/jam.

Jika dikonversikan kembali ke satuan massa, maka hasil keluaran reaktor adalah sebagai berikut:

Komponen	Mula-mula (kmol/jam)	Bereaksi/Terbentuk (kmol/jam)	Sisa/Keluar (kmol/jam)
HCOOCH ₃	82,345	-49,407	32,938
H ₂ O	411,726	-49,407	362,319
HCOOH	0	+49,407	49,407
CH ₃ OH	0	+49,407	49,407

Total massa keluaran reaktor adalah:

$$1.976,285 + 6.521,739 + 2.272,727 + 1.581,028 = 12.351,779 \text{ kg/jam}$$

Nilai tersebut sama dengan total massa umpan masuk, yaitu:

$$4.940,711 + 7.411,067 = 12.351,779 \text{ kg/jam}$$

Dengan demikian, neraca massa reaktor telah memenuhi prinsip kekekalan massa. Berdasarkan hasil perhitungan, penggunaan rasio metil format terhadap air sebesar 1:5 dengan konversi 60% menghasilkan asam format sebesar 49,407 kmol/jam atau setara dengan 2.272,727 kg/jam. Sementara itu, sisa metil format dan air yang belum bereaksi masih perlu dipisahkan pada unit pemisahan lanjutan, sedangkan metanol yang terbentuk perlu dipisahkan karena merupakan produk samping dari reaksi hidrolisis metil format

2.3 Langkah Proses

2.3.1 Preparasi Bahan Baku

Metanol yang digunakan sebagai bahan baku utama berasal dari dua sumber, yaitu metanol segar (fresh feed) dan metanol hasil daur ulang (*recycle*) dari unit pemisahan hilir. Menurut Ullmann, pada tahap karbonilasi hanya sekitar 30% metanol yang terkonversi per lintasan, sehingga penggunaan metanol berlebih dan sistem recycle merupakan karakteristik utama proses industri untuk mencapai konversi keseluruhan yang tinggi. Metanol recycle berfungsi untuk meningkatkan efisiensi bahan baku, menjaga kestabilan katalis basa, serta menekan pembentukan produk samping seperti natrium format akibat dekomposisi katalis.

Pada unit persiapan bahan baku, metanol campuran dikondisikan agar memenuhi spesifikasi operasi reaktor karbonilasi, khususnya dari sisi kemurnian air, temperatur, dan tekanan. Sistem karbonilasi harus dijalankan dalam kondisi hampir bebas air karena keberadaan air dapat menyebabkan deaktivasi katalis alkoksida melalui pembentukan natrium format yang tidak larut. Pada tahap ini, karbon monoksida juga dipersiapkan dengan kemurnian tinggi dan dikompresi hingga tekanan reaksi, karena laju reaksi karbonilasi sangat bergantung pada tekanan parsial CO di fase gas.

2.3.2 Reaksi Pembentukan Metil Format

Reaktor karbonilasi merupakan unit inti pada tahap pertama proses, di mana metanol bereaksi dengan karbon monoksida dalam fase cair menghasilkan metil format. Reaksi ini berlangsung dengan bantuan katalis basa, umumnya natrium metoksida, pada suhu 86°C dan tekanan 45 Bar. Berdasarkan Ullmann, 95% karbon monoksida dapat dikonversi dalam satu lintasan, sedangkan metanol hanya terkonversi 30%. Oleh

karena itu, karbon monoksida berperan sebagai pereaksi pembatas, sedangkan metanol diumpankan berlebih dan direcycle. Produk keluar reaktor berupa campuran metil format, metanol tak bereaksi, katalis terlarut, dan jejak produk samping.

Campuran hasil reaktor karbonilasi dialirkan ke kolom distilasi metil format untuk memisahkan produk utama dari metanol dan katalis. Pemisahan dilakukan berdasarkan perbedaan volatilitas, di mana metil format yang bertitik didih rendah dipisahkan sebagai distilat, sedangkan metanol dan katalis tertinggal sebagai produk dasar kolom. Menurut Ullmann, metanol dan katalis dari dasar kolom ini dikembalikan ke reaktor karbonilasi, sementara katalis yang terdeaktivasi, terutama dalam bentuk natrium format, dikeluarkan melalui sistem purge atau kristalisasi untuk mencegah penumpukan dalam sistem.

2.3.3 Hidrolisis Metil Format

Metil format hasil distilasi kemudian dialirkan ke reaktor hidrolisis untuk dikonversi menjadi asam format dan metanol. Reaksi hidrolisis ini bersifat kesetimbangan dan secara termodinamika kurang menguntungkan, sehingga diperlukan strategi khusus untuk meningkatkan konversi. Ullmann menjelaskan bahwa proses industri umumnya menggunakan kelebihan air atau pengaturan tahap reaksi bertingkat, serta memanfaatkan autokatalisis oleh asam format yang terbentuk. Reaksi dilakukan pada suhu 90°C dan tekanan 1,5 Bar, menghasilkan campuran asam format, metanol, air, dan sisa metil format

2.3.4 Pemisahan Pada Kolom Distilasi

Produk dari reaktor hidrolisis dialirkan ke kolom distilasi metanol untuk memisahkan metanol dan komponen bertitik didih rendah lainnya dari campuran asam format-air. Pada kolom ini, metanol dipisahkan sebagai distilat dan dikembalikan ke bagian hulu proses sebagai recycle. Ullmann, 2011 menekankan bahwa pemisahan metanol secepat mungkin sangat penting untuk meminimalkan reaksi balik (re-esterifikasi) antara metanol dan asam format yang dapat menurunkan rendemen produk. Produk dasar kolom berupa campuran asam format dan air selanjutnya diproses ke tahap pemekatan

Campuran asam format-air dari unit sebelumnya masih berada di bawah spesifikasi kemurnian produk karena adanya azeotrop asam format-air. Pemekatan hingga di atas 85 wt% dalam rancangan ini menggunakan kolom distilasi berbasis membran untuk membantu pemisahan air secara selektif dan menurunkan kebutuhan energi. Air dipisahkan sebagai distilat, sedangkan asam format dengan konsentrasi tinggi diperoleh sebagai produk dasar kolom.

2.4 Neraca Massa

Tabel 2. 3 Neraca Massa

NO	ALAT	Komponen	INPUT	OUTPUT
		CH ₃ OH (l)	7905,145055	5270,099
1	REAKTOR 1 (R-210)	H ₂ O(l)	0	23,715
		CO(g)	2305,667308	0,002
		HCOOCH ₃ (l)	0	4940,711
2	DISTILASI 1 (D-301)	HCOOCH ₃ (l)	4940,711	4940,711
		H ₂ O(l)	11,858	11,858
		CH ₃ OH (l)	5270,099	5270,099
		HCOOCH ₃ (l)	4940,71146	49,407
3	REAKTOR 2 (R-510)	H ₂ O(l)	7411,06719	5943,676
		HCOOH(l)	0	3750,000
		CH ₃ OH (l)	0	2608,696
		HCOOCH ₃ (l)	49,4071146	49,407
4	DISTILASI 2 (D-601)	H ₂ O(l)	5943,675886	5943,676
		HCOOH(l)	3749,999998	3750,000
		CH ₃ OH (l)	2608,695651	2608,696
5	DISTILASI 3 (D-602)	H ₂ O(l)	5.943,676	5.943,676
		HCOOH(l)	3.750,000	3.750,000
TOTAL			54.830,714	54.854,429

2.5 Neraca Panas

Tabel 2. 4 Neraca Panas

NO	Nama Alat	Komponen	Q masuk	Q keluar
	HEAT	HCOOCH ₃ (l)	12079,78932	165919,6827
1.	EXCHANGER (E-101)	Pemanas	153839,8934	
	REAKTOR I (R-201)	CO (g)	33742,01508	0,030353573
		CH ₃ OH (l)	165919,6827	118116,2981
2.	KARBONILASI METANOL	HCOOCH ₃ (l)	0	70201,01232
		Q reaksi	0	749280,4155
		Q pemanas	737936,0585	0
	COOLER (E-201)	HCOOCH ₃ (l)	70201,012	4309,169
3.		CH ₃ OH (l)	118116,298	8053,196
		Q pendingin	0,000	175954,945
	DISTILASI I (D-310)	HCOOCH ₃ (l)	64670,331	729251,988
		CH ₃ OH (l)	109379,082	1423431,457
4.	METIL FORMAT DAN METHANOL	Q kondensor	0,000	570372,102
		Q reboiler	2549006,133	0,000
	HEAT	HCOOCH ₃ (l)	4026,593	62545,336
5.	EXCHANGER (E-401)	Q pemanas	58518,743	0,000
	HEAT	H ₂ O(l)	67861,842	11286884,379
6.	EXCHANGER (E-402) H₂O	Q pemanas	11219022,538	0,000
		HCOOCH ₃ (l)	74639,773	818,033
	REAKTOR II	H ₂ O(l)	578814,584	499154,108
7.	HIDROLISA 1 (R-510)	HCOOH(l)	0,000	14681,338
		CH ₃ OH (l)	0,000	67459,744
		Q reaksi	-205747,826	0,000

NO	Nama Alat	Komponen	Q masuk	Q keluar
		Q pemanas	134406,693	0,000
		HCOOCH ₃ (l)	818,033	43,092
	COOLER II	H ₂ O(l)	499154,108	36283,465
8.	(E-601)	HCOOH(l)	14681,338	-1358,883
		CH ₃ OH (l)	67459,744	3986,327
		Q pendingin	0,000	543159,223
		HCOOCH ₃ (l)	90,482	608,377
	REBOILER 1	H ₂ O(l)	17279,767	393963,153
9.	(E-602)	HCOOH(l)	-1358,883	5993,978
		CH ₃ OH (l)	3986,327	51129,077
		Q pemanas	431696,892	0,000
		HCOOCH ₃ (l)	839,072	388,762
	DISTILASI II	H ₂ O(l)	509242,357	55392270,638
	(D-601)	HCOOH(l)	15656,863	2542558,946
10.	METANOL DAN	CH ₃ OH (l)	69079,858	33541,906
	METIL FORMAT	Q kondensor	0,000	-670432,942
		Q reboiler	56703509,161	0,000
	DISTILASI III	HCOOCH ₃ (l)	10282032,166	34940787,550
	(D-602)	CH ₃ OH (l)	-20025,671	587972,208
11.	PEMURNIAN	Q kondensor	0,000	-95312237,463
	PRODUK	Q reboiler	-70045484,200	0,000
	COOLER	HCOOH	1994795,568	-6794,413
12.	(E-605)	Q pendingin	0,000	2001589,981
	PRODUK			
TOTAL			16489886,218	16489886,218

2.6 Tata Letak Pabrik dan Pemetaan

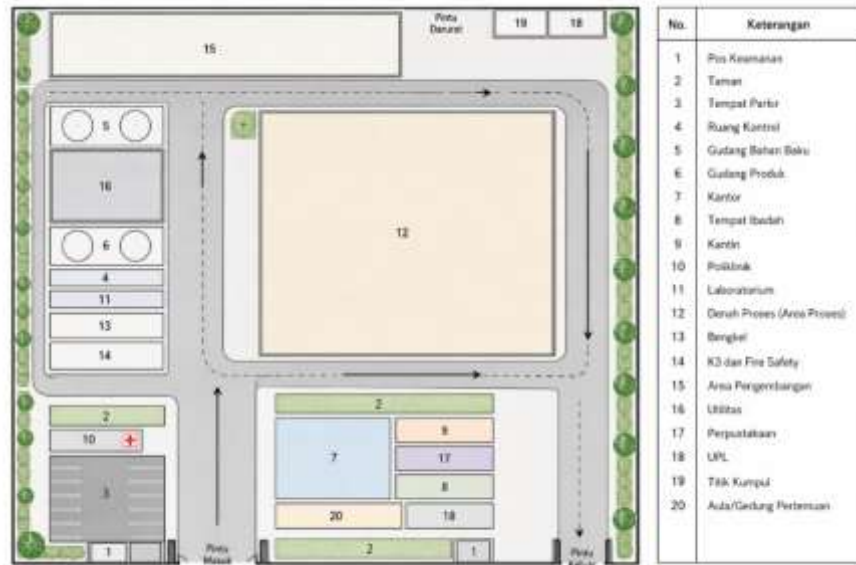
2.6.1 Lay out Pabrik

Tata letak pabrik merupakan aspek krusial dalam desain pabrik karena berpengaruh besar terhadap efisiensi, keselamatan, dan kelancaran operasional. Penempatan fasilitas yang optimal, termasuk peralatan proses dan bangunan pendukung seperti kantor, laboratorium, bengkel, tempat ibadah, poliklinik, toilet, kantin, fasilitas keselamatan kebakaran, pos keamanan, dan lain-lain, harus memperhatikan prosedur keamanan dan kenyamanan untuk mengoptimalkan produktivitas dan keselamatan kerja.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan tata letak pabrik agar tercapai kondisi yang optimal adalah sebagai berikut.

1. Efisiensi dan kemudahan; tata letak pabrik harus dirancang untuk mengoptimalkan kemudahan operasi dan pemeliharaan peralatan, serta memudahkan pengawasan proses dan hasil produksi.
2. Perencanaan ekspansi; rencana tata letak awal harus mempertimbangkan potensi kebutuhan perluasan pabrik di masa depan untuk menghindari masalah keterbatasan ruang.
3. Keamanan; keselamatan harus menjadi prioritas utama dalam desain tata letak. Penempatan alat-alat keselamatan seperti hidran, penampungan air, alat penahan ledakan, dan sensor gas beracun harus strategis. Penyimpanan bahan baku dan produk berbahaya juga perlu di lokasi khusus yang mudah dikontrol untuk meminimalisir risiko.
4. Konstruksi terbuka; memanfaatkan konstruksi terbuka (outdoor) dapat menjadi solusi yang efektif untuk menekan biaya pembangunan, terutama karena iklim indonesia mendukung.
5. Efisiensi lahan; keterbatasan lahan menuntut efisiensi dalam penataan ruang dan pemanfaatan lahan yang tersedia.
6. Pengolahan limbah; tata letak pabrik harus mengintegrasikan sistem pengolahan limbah yang efektif untuk mencegah pencemaran lingkungan.

7. Instalasi dan utilitas; perencanaan yang matang untuk instalasi dan distribusi utilitas seperti gas, uap, listrik, dan lainnya sangat penting untuk kelancaran proses produksi dan pemeliharaan.



Gambar 2. 1 Layout Pabrik

Secara garis besar layout pabrik terbagi atas beberapa daerah utama yaitu:

1. Zona Administrasi dan Fasilitas Pendukung Zona ini menaungi area administrasi yang mengatur kelancaran operasional dan keuangan, laboratorium untuk kontrol kualitas bahan baku dan produk, serta fasilitas karyawan seperti poliklinik, kantin, aula, tempat parkir, pos keamanan, dan masjid.
2. Zona Proses dan Ruang Kontrol Zona proses, yang berlokasi di pusat pabrik dan jauh dari gangguan, merupakan tempat berlangsungnya proses produksi dengan penempatan alat-alat proses dan pengendali yang terstruktur untuk memudahkan aliran bahan baku, pengawasan, dan pemeliharaan. Zona ini berjarak minimal 15 meter dari bangunan lain. Sementara itu, ruang kontrol berfungsi sebagai pusat kendali untuk memantau dan memastikan kelancaran proses produksi, termasuk parameter seperti tekanan dan temperatur.

3. Zona Pemeliharaan Zona ini didedikasikan untuk menyimpan suku cadang dan melakukan perbaikan, pemeliharaan, serta perawatan seluruh peralatan yang digunakan dalam proses produksi.
4. Zona Utilitas Berdekatan dengan zona proses namun tetap menjaga jarak aman sekitar 15 meter, zona ini menyediakan utilitas penting untuk produksi seperti air, uap, dan listrik. Penempatan yang dekat bertujuan untuk efisiensi sistem pemipaan dan keamanan.
5. Zona Pengolahan Limbah Zona ini dirancang khusus untuk mengolah dan membuang limbah yang dihasilkan selama proses produksi.

2.6.2 Lay out Peralatan Proses

Efisiensi dalam tata letak peralatan proses pabrik merupakan hal yang krusial. Berikut adalah beberapa pertimbangan penting yang perlu diperhatikan dalam perancangannya:

1. Alur Bahan Baku dan Produk yang Optimal

Desain alur bahan baku dan produk yang efisien akan memberikan keuntungan ekonomi yang signifikan, serta mendukung kelancaran dan keamanan selama proses produksi.

2. Sirkulasi Udara yang Lancar

Penting untuk memperhatikan kelancaran sirkulasi udara di dalam dan di sekitar area proses. Sirkulasi udara yang baik akan mencegah stagnasi udara dan akumulasi bahan kimia berbahaya, sehingga menjamin keselamatan pekerja. Arah hembusan angin dominan juga perlu dipertimbangkan.

3. Pencahayaan yang Memadai

Area proses yang memiliki risiko tinggi terhadap keselamatan harus dilengkapi dengan pencahayaan tambahan. Selain itu, pencahayaan yang memadai di seluruh area pabrik juga penting untuk menjamin keselamatan kerja.

4. Aksesibilitas dan Keamanan Pekerja

Tata letak pabrik harus dirancang agar pekerja dapat mencapai seluruh alat proses dengan cepat dan mudah, terutama saat terjadi gangguan atau kerusakan. Keamanan pekerja selama bertugas juga harus menjadi prioritas utama.

5. Akses Alat Berat yang Mudah Jarak antar alat dan lebar jalan harus cukup untuk memastikan alat berat dapat menjangkau seluruh alat proses dengan mudah. Hal ini penting untuk memudahkan akses dan pemeliharaan, serta mempercepat penanganan jika terjadi gangguan pada alat proses.
6. Keamanan yang Terjamin Penempatan alat-alat proses harus strategis dan aman. Jika terjadi kebakaran, tidak boleh ada pekerja yang terperangkap dan akses kendaraan atau alat pemadam kebakaran harus mudah. Selain itu, tata letak proses harus dirancang untuk:
 - a. Menjamin kelancaran proses produksi;
 - b. Memaksimalkan penggunaan luas lantai;
 - c. Meminimalkan biaya material handling dan pengeluaran modal yang tidak perlu;
 - d. Menghindari penggunaan alat angkut mahal dengan menciptakan alur produksi yang lancar;
 - e. Meningkatkan kepuasan kerja karyawan.
7. Ruang Perawatan yang Cukup
Tata letak harus menyediakan ruang yang cukup untuk perawatan alat proses. Misalnya, heat exchanger memerlukan ruang yang cukup untuk membersihkan tube.
8. Fleksibilitas untuk Ekspansi Setiap pabrik diharapkan dapat berkembang di masa depan. Oleh karena itu, tata letak pabrik harus dirancang untuk mengakomodasi penambahan unit produksi di masa depan.
9. Efisiensi Ekonomi
Penempatan alat-alat proses harus dirancang untuk meminimalkan biaya konstruksi dan operasi. Hal ini dapat dicapai dengan meminimalkan panjang pipa dan penggunaan material konstruksi.
10. Jarak Aman Antar Alat
Alat proses yang beroperasi pada suhu dan tekanan tinggi harus ditempatkan pada jarak aman dari alat proses lainnya. Hal ini untuk meminimalkan risiko jika terjadi ledakan atau kebakaran pada salah satu alat tersebut.

2.7 Diagram Alir (Flowsheet)

