

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1 Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1 Spesifikasi Bahan Baku Utama

a. *Ortho-xylene*

- Komposisi

Fasa	: Cair (pada 30 ⁰ C, 1 atm)
Warna	: Tidak berwarna
Bau	: Aromatik
Bahaya	: Mudah terbakar
Kemurnian	: 98% (%berat)
Impuritas	: Maks <i>meta-xylene</i> 2% (%berat)

Tabel 2. 1 Komposisi Ortho-xylene

Komponen	Komposisi (%wt)
<i>O-xylene</i>	Minimum 98
<i>M-xylene</i>	Maksimum 2

(Drews, 1998)

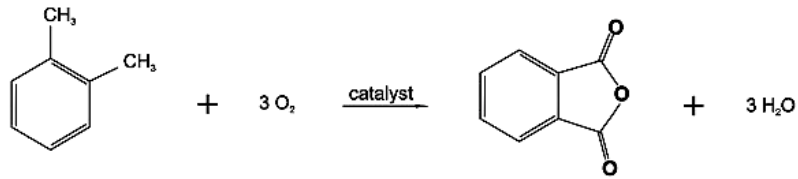
- Sifat Fisika

Rumus molekul	: C ₈ H ₁₀
Berat molekul	: 106,168 gr/mol
Fasa	: Cair (25 ⁰ C, 1 atm)
Densitas	: 0,8760 gr/cm ³ (25 ⁰ C, 1 atm)
Kemurnian	: 98% berat min
Impuritas	: 2% berat maks (<i>m-xylene</i>)
Titik didih	: 144,4 ⁰ C (25 ⁰ C, 1 atm)
Titik beku	: -25,182 (25 ⁰ C, 1 atm)
<i>Specific Gravity</i>	: 0,865 (20 ⁰ C, 1 atm)
Entalpi pembentukan	: 19.080 J/mol
Energi Gibbs	: 122.000 J/mol
Kelarutan	: Larut dalam air, alkohol, <i>ether</i> , aseton.

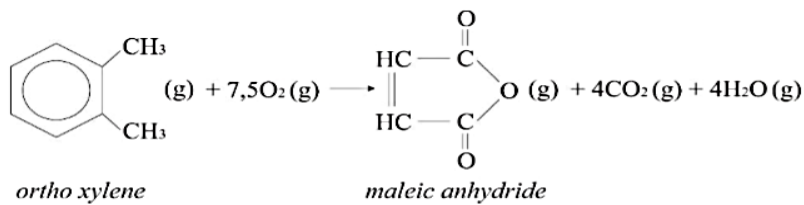
(Perry & Green, 2008)

- Sifat Kimia

Jika *O-xylene* direaksikan dengan oksigen akan membentuk produk *Phthalic Anhydride* dan hydrogen serta produk samping berupa *Maleic Anhydride*.



Dengan reaksi samping :



(Kirk & Othmer, 1978)

b. Udara

- Komposisi

Fasa : Gas (1 atm. 25⁰C)

Warna : Tidak berwarna

Bau : Tidak berbau

Tabel 2. 2 Komposisi Udara

Komponen	Komposisi (%wt)
N ₂	78
O ₂	21
CO ₂	0,04
CO	0,03
Ar	0,93

(Perry & Green, 2008)

- Sifat Fisika

- Oksigen

Rumus Molekul : O₂

Berat Molekul : 32,0 gr/mol

Fasa : Gas (1 atm, 25⁰C)

Titik didih : -183⁰C (1 atm, 25⁰C)

Tekanan kritis : 49,8 bar

	Suhu kritis	: 154,6 K
	<i>Specific Gravity</i>	: 1,1044
	Densitas	: 0,436 gr/cm ³
- Nitrogen		
	Rumus molekul	: N ₂
	Berat molekul	: 38,02 gr/mol
	Fasa	: Gas (1 atm, 25 ⁰ C)
	Titik didih	: -195,8 ⁰ C (1 atm, 25 ⁰ C)
	Tekanan kritis	: 34 bar
	Suhu kritis	: 126,2 k
	<i>Specific Gravity</i>	: 0,9723
	Densitas	: 0,3109 gr/cm ³
- Karbondioksida		
	Rumus molekul	: CO ₂
	Berat molekul	: 44 gr/mol
	Fasa	: Gas (1 atm, 25 ⁰ C)
	Titik didih	: -78,5 ⁰ C (1 atm, 25 ⁰ C)
	Tekanan kritis	: 73,7 bar
	Suhu kritis	: 31 ⁰ C
	<i>Specific Gravity</i>	: 1,5189
- Karbonmonoksida		
	Rumus molekul	: CO
	Berat molekul	: 28 gr/mol
	Fasa	: Gas (1 atm, 25 ⁰ C)
	Titik didih	: -191,5 ⁰ C (1 atm, 25 ⁰ C)
	Tekanan kritis	: 3499 kPa
	Suhu kritis	: -139,8 ⁰ C
	<i>Specific Gravity</i>	: 0,9667
- Argon		
	Rumus molekul	: Ar
	Berat molekul	: 28 gr/mol
	Fasa	: gas (1 atm, 25 ⁰ C)

Titik didih	: -186 ⁰ C (1 atm, 25 ⁰ C)
Suhu kritis	: -122 ⁰ C
<i>Specific Gravity</i>	: 1,38
Densitas	: 1,38 kg/m ³

- Sifat Kimia

Sifat kimia oksigen dalam udara diantaranya :

1. Oksigen yang terdapat dalam udara bereaksi dengan semua elemen kecuali He, Ne, dan Ar.
2. Jika direaksikan dengan bahan bakar atau zat yang mudah mengalami oksidasi dengan komposisi oksigen yang ada di udara (sebesar 21% mol) maka akan dihasilkan panas, CO₂, H₂O serta residu dari udara.
3. Pada suhu yang lebih rendah dengan adanya katalis, maka oksigen akan bereaksi dengan senyawa organik membentuk *oxygenated hydrocarbon*.

(Perry & Green, 2008)

2.1.2 Spesifikasi Katalis

a. *Vanadium Pentoxide* (V₂O₅)

- Komposisi

Fasa	: Padat
Lapisan aktif	: V ₂ O ₅
Bentuk	: <i>Hollow cylindrical</i>
Diameter partakel	: 0,318 cm
Diameter luar	: 0,72 cm
Diameter dalam	: 0,36 cm
Panjang	: 0,70 cm
Umur	: 10 tahun

Tabel 2. 3 Komposisi Katalis Vanadium Pentoxide

Komponen	Komposisi (%wt)
<i>Vanadium Pentoxide</i>	Minimum 99,5
Silicon	Maksimum 0,25
Besi	Maksimum 0,25

(Turton et al., 2008)

- Sifat Fisika
 - Rumus Molekul : V_2O_5
 - Berat molekul : 181,88 gr/mol
 - Titik didih : 1750^0C (1 atm, 25^0C)
 - Titik leleh : 681^0C (1 atm, 25^0C)
- Sifat Kimia

Senyawa ini dapat larut di dalam air dan dapat bersifat seagai katalis di dalam larutan.

2.1.3 Spesifikasi Produk

a. *Phthalic Anhydride*

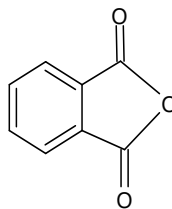
- Komposisi
 - Wujud : Padat
 - Bentuk : *Flake*
 - Kenampakan : Putih
 - Kemurnian : Min 99,9% (%wt)
 - Impuritas : Maks *Maleic Anhydride* 0,05% dan *Benzoic Acid* 0,05%
 - Ukuran : 100-700 μm

Tabel 2. 4 Komposisi *Phthalic Anhydride*

Kompenen	Komposisi (%wt)
<i>Phthalic Anhydride</i>	Minimum 99,9
<i>Maleic Anhydride</i>	Maksimum 0,05
<i>Benzoic Acid</i>	Maksimum 0,05

(Ullmann, 2002)

- Sifat Fisika



- Struktur bangun :
- Rumus molekul : $C_8H_4O_3$
- Berat molekul : 148,11 g/kmol
- Titik didih : $284,5^0C$ (1 atm, 25^0C)

Titik leleh	: 130,8 ⁰ C (1 atm, 25 ⁰ C)
Temperature kritis	: 791 K
Tekanan kritis	: 46,58 atm
<i>Specific Gravity</i>	: 1,527
<i>Solubility in water</i> (100 ⁰ C)	: 20% (%berat)

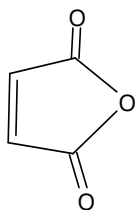
- Sifat Kimia

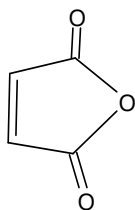
- Anthraquinon dapat diperoleh dari reaksi antara *Phthalic Anhydride* dengan benzene.
- Reaksi antara *Phthalic Anhydride* dengan urea dan metal diacetate akan membentuk *metal pthalocyanines*.
- Gugus karboksil yang terdapat pada ikatan senyawa *Phthalic Anhydride* dapat bereaksi dengan ammonia dan menghasilkan *monoamide* dan *phthalimide* (*phthalonitrile*).

(Kirk & Othmer, 1978)

b. *Maleic Anhydride*

- Sifat Fisika



Struktur bangun	:	
Rumus molekul	:	C ₄ H ₂ O ₃
Berat molekul	:	98,06 g/kmol
Titik didih	:	202 ⁰ C (1 atm, 25 ⁰ C)
Titik leleh	:	52 ⁰ C (1 atm, 25 ⁰ C)
Temperature kritis	:	721 K
Tekanan kritis	:	71,85 atm

- Sifat Kimia

- Chlorinasi *maleic anhydride* dengan hidrokarbon aromatis pada katalis AlCl₃ membentuk *β aroylocrylic acid*.
- *maleic anhydride* bereaksi dengan alkena dan senyawa aromatik yang mempunyai ikatan C-H, menghasilkan turunan *succinic anhydride*.

- Reaksi *maleic anhydride* dengan ammonia, amina primer atau amina sekunder menghasilkan mono atau diamide.

(Kirk & Othmer, 1978)

c. *Benzoic Acid*

- Sifat Fisika

Rumus Molekul	: C_6H_5COOH
Berat Molekul	: 122,123 gr/mol
Densitas	: 1,316 g/m ³
Viskositas pada 130 ⁰ C	: 1,26 cP
Titik Didih	: 249,2 ⁰ C
Titik Lebur	: 122,37 ⁰ C
Panas Peleburan	: 1,774 J/g
Panas Pembakaran	: 147 kJ/mol
Panas Pembentukan (padat)	: -385 kJ/g
Panas penguapan pada 140 ⁰ C	: 534 J/g
Kelarutan dalam air	: 0,2

- Sifat Kimia

- Hidrogenasi asam benzoat dengan katalis nikel dan direaksikan dengan $NOHSO_4$ menjadi kaprolaktam.
- Dengan katalis tembaga oksidasi asam benzoat dapat menjadi fenol.
- Daram pottasium dari asam benzoat direaksikan dengan CO_2 pada kenaikan suhu dan tekanan dapat membentuk asam terephthalat.

(Kirk & Othmer, 1978)

2.2 Konsep Proses

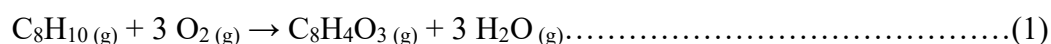
2.2.1 Dasar Proses

Proses pembentukan *Phthalic Anhydride* dengan proses Von Heyden menggunakan bahan baku *Ortho-xylene* yang direaksikan dengan oksigen dari udara dengan bantuan katalis V_2O_5 merupakan reaksi oksidasi yang sangat eksotermis. Reaksi oksidasi mengakibatkan meningkatnya bilangan oksidasi yang disebabkan oleh adanya perpindahan elektron dari suatu atom atau senyawa sehingga atom atau senyawa tersebut berubah muatannya menjadi positif. Reaksi berlangsung pada fase gas dengan menggunakan reaktor *fixed bed multitube* dengan suhu reaksi berkisar antara 330-360⁰C dan tekanan 1-2 atm (Meyers, 1976).

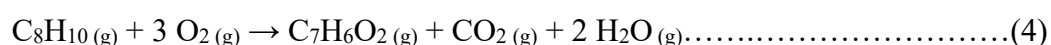
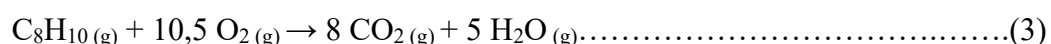
Katalis yang digunakan pada proses pembentukan *Phthalic Anhydride* adalah *Vanadium Pentoxide* (V_2O_5). Katalis ini ditemukan dalam mineral tertentu dan digunakan terutama untuk menghasilkan paduan logam dengan kemurnian sebesar 99,5%. Katalis *Vanadium Pentoxide* berbentuk *hollow cylindrical* yang ditempatkan di dalam tube pada reaktor untuk meningkatkan selektivitas pembuatan *Phthalic Anhydrid*. Temperatur operasi reaktor adalah 360°C , tekanan 2 atm, dengan konversi 99,8% dan selektivitas produk yang diinginkan adalah 78%. Alasan pemilihan kondisi operasi ini masih dalam range yang diijinkan. Selain itu jika suhu operasi kurang dari 300°C , maka akan menyebabkan kecepatan reaksi berkurang, sedangkan jika suhu terlalu tinggi maka akan menyebabkan terbentuknya CO_2 dan H_2O yang tidak diinginkan, sehingga konversi *O-xylene* yang membentuk *Phthalic Anhydride* juga rendah. Reaksi yang terjadi pada reaktor sangat eksotermis sehingga dalam pengoperasiannya harus menggunakan pendingin agar kondisi operasi tetap terjaga (Papageorgiou & Froment, 1996).

Dasar reaksi pembentukan *Phthalic Anhydride* adalah reaksi oksidasi langsung dengan oksigen. Produk samping yang dihasilkan berupa *Maleic Anhydride*, *Benzoic Acid*, karbon dioksida, dan air.

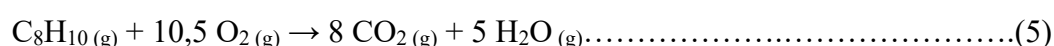
Reaksi Utama yang terjadi :



Reaksi samping (*Ortho-xylene*) yang terjadi



Reaksi Samping (*Meta-xylene*)



Reaksi pembentukan *Phthalic Anhydride* menghasilkan konversi sebesar 99,9% dengan selektivitas sebagai berikut :

Tabel 2. 5 Selektivitas Reaksi Pembentukan *Phthalic Anhydride*

Reaksi ke-	Produk	Selektivitas (% mol)
1	<i>Phthalic Anhydride</i>	78
2	<i>Maleic Anhydride</i>	3,5
3	Karbondioksida + Air	18
4	<i>Benzoid Acid</i>	0,5

(Chen et al., 1993)

Reaksi ke-5 oksidasi *Meta-xylene* menghasilkan produk karbondioksida dan air dengan selektivitas sebesar 100%.

2.2.2 Mekanisme Reaksi

Reaksi pembuatan *Phthalic Anhydride* adalah reaksi oksidasi. Secara umum langkah-langkah reaksi oksidasi hidrokarbon adalah sebagai berikut :

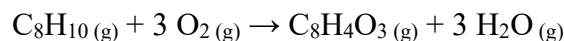


Keterangan :

1. Atom oksigen akan menyerap atom karbon karena oksigen lebih elektro negatif daripada karbon pada gugus alkil dan membentuk radikal bebas yang teroksidasi.
2. Radikal bebas akan bereaksi membentuk gugus asam karboksilat sebagai hasil intermediate.
3. Hasil intermediate akan membentuk produk.

(McKetta, 1988)

Dalam proses pembentukan *Phthalic Anhydride* reaksi utama yang terjadi adalah sebagai berikut :



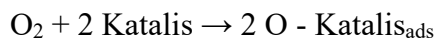
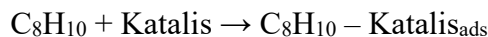
Mekanisme pertama yang terjadi yaitu oksigen yang akan menyerang gugus metil (CH_3) pada *Ortho-xylene* karena atom oksigen lebih elektronegatif daripada karbon gugus metil dan akan membentuk gas asam karboksilat sebagai produk intermediate. Gugus asam karboksilat inilah yang kemudian beraksi membentuk *Phthalic Anhydride* dan air.

Dalam proses reaksi oksidasi pembentukan *Phthalic Anhydride* juga terjadi reaksi antara fase gas dan fase padat karena reaksi utama pembentukannya dibantu dengan adanya katalis padat. Reaksi heterogen yang terjadi antara fase gas dan fase padat (katalis) diantaranya : difusi, adsorbs, reaksi permukaan, dan desorbsi. Secara lengkap Langkah-langkah yang terjadi pada reaksi heterogen gas-padat adalah sebagai berikut :

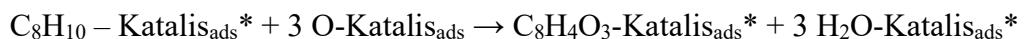
- a. Perpindahan reaktan dari fase gas ke antar muka gas-padat (lapisan film) yang disebut juga sebagai tahapan difusi. Difusi ini tergantung pada karakteristik aliran fluida, ukuran partikel, dan karakteristik difusi molekular adalah parameter yang berhubungan dengan kecepatan pada tahap ini. Kecepatan proses difusi ini akan

bertambah jika koefisien transfer massa bertambah, dan koefisien transfer massa bertambah besar dengan naiknya suhu dan turunnya tekanan. Difusi ini akan menjadi sangat menentukan jika reaksi katalitik sangat cepat dan perpindahan massa sangat lambat. Pada reaksi pembentukan *Phthalic Anhydride*, difusi bukan langkah yang menentukan dalam persamaan reaksi karena tahapan difusi sangat kecil sehingga tahapan parsial dilapisan antar muka dapat dianggap sama dengan tekanan parsial pada fasa gas.

- b. Perpindahan reaktan dari antar muka ke dalam pori katalis. Difusi dalam pori ini hanya bisa terjadi untuk katalis yang berpori besar atau katalis yang mempunyai luas permukaan yang sangat besar. Katalis V_2O_5 merupakan katalis yang mempunyai luas permukaan spesifik yang sangat besar yaitu $80 \text{ m}^2/\text{gr}$. Oleh karena itu, tahapan ini sangat dipengaruhi persamaan kecepatan reaksi. Namun, karena difusivitas molekular (D_{AB}) tidak mempengaruhi reaksi, maka hanya difusivitas pori saja yang mempengaruhi reaksi.
- c. Adsorpsi reaktan pada permukaan katalis. Pada proses adsorpsi, kesetimbangan antara permukaan padatan dengan molekul gas biasanya cepat tercapai dan bersifat *reversible*. Jumlah molekul teradsorpsi akan semakin sedikit jika suhu naik.
- d. Aktivasi reaktan teradsorpsi. Pada tahapan ini dibutuhkan energi, sehingga apabila suhu naik maka jumlah komponen teraktivasi akan semakin banyak. Aktivasi dengan menggunakan katalis perlu energi lebih rendah dibandingkan dengan tanpa menggunakan katalis. Pada tahap ini :



- e. Reaksi permukaan reaktan katalis teraktivasi menjadi produk teraktivasi pada permukaan katalis. Reaksi ini merupakan tahap paling menentukan dalam laju reaksi.



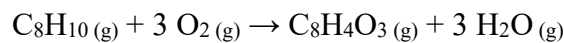
- f. Perpindahan produk dari bagian dalam pori ke permukaan luar katalis. Langkah ini, adalah kebalikan dari langkah kedua seperti yang telah diuraikan sebelumnya. Jadi tahapan ini gas-gas hasil reaksi dan sisa reaktan mengalami difusi dari dalam pori katalis ke permukaan luar katalis.

- g. Difusi produk dari antar muka (lapisan film) gas padat ke fase gas. Langkah ini berkebalikan dengan langkah yang pertama dimana gas-gas hasil reaksi terdifusi dari lapisan film katalis ke badan fluida. Seperti pada langkah-langkah pertama, harga tahanan difusi juga sangat kecil sehingga tekanan parsial fase gas sama dengan tekanan parsial di antar muka sehingga laju reaksi tidak ditentukan oleh langkah ini.

(Smith, 1981)

2.2.3 Tinjauan Termodinamika

Tinjauan termodinamika bertujuan untuk mengetahui apakah reaksi yang berlangsung endotermis atau eksotermis. Selain itu, tinjauan termodinamika ini juga dapat menentukan arah reaksi apakah reaksi yang digunakan berjalan *reversible* atau *irreversible*. Reaksi yang terjadi sebagai berikut :



Data entalpi reaksi standar pada 298,15 K dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2. 6 Data Entalpi Reaksi Standar (298,15 K)

Komponen	Harga ΔH^0_f (kJ/mol)
<i>Ortho-xylene</i>	19
Oksigen	0
<i>Phthalic Anhydride</i>	-393,13
Air	-241,8

(Yaws, 1999)

Reaksi utama :

$$\begin{aligned} \Delta H_{298,15} &= \sum \Delta H^0_f \text{ produk} - \sum \Delta H^0_f \text{ reaktan} \\ &= (\Delta H^0_f \text{C}_8\text{H}_4\text{O}_3 + (3 \times \Delta H^0_f \text{H}_2\text{O})) - (\Delta H^0_f \text{C}_8\text{H}_{10} + (3 \times \Delta H^0_f \text{O}_2)) \\ &= (-393,13 \text{ kJ/mol} + (3 \times -241,8 \text{ kJ/mol})) - (19 \text{ kJ/mol} + (3 \times 0 \text{ kJ/mol})) \\ &= -1137,53 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

Diketahui data kapasitas panas (C_p) masing-masing komponen adalah sebagai berikut :

Tabel 2. 7 Data Kapasitas Panas Masing-masing Komponen

Komponen	A (J/mol.K)	B (J/mol.K)	C (J/mol.K)	D (J/mol.K)	E (J/mol.K)
C_8H_{10}	0,182	0,51344	-0,00020212	$-2,1615 \times 10^{-8}$	$2,3212 \times 10^{-11}$
O_2	29,526	-0,0088999	$3,8083 \times 10^{-5}$	$-3,2629 \times 10^{-8}$	$8,8607 \times 10^{-12}$
$\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_3$	40,083	0,036084	0,00095956	$-1,2341 \times 10^{-6}$	$4,6597 \times 10^{-10}$

Komponen	A (J/mol.K)	B (J/mol.K)	C (J/mol.K)	D (J/mol.K)	E (J/mol.K)
H ₂ O	33,933	-0,00884186	0,000029906	-1,7825x10 ⁻⁸	3,6934x10 ⁻¹²

(Yaws, 1999)

- *Ortho-xylene*

$$\Delta H = \int_{298,15}^T (A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4)dT$$

$$\Delta H = \int_{298,15}^{633,15} ((0,182 + (0,51344)(T) + (-0,00020212)(T^2) + (-2,1615 \times 10^{-8})(T^3) + (2,3212 \times 10^{-11})(T^4))dT$$

$$\Delta H = 64474,78 \text{ J/mol}$$

- Oksigen

$$\Delta H = \int_{298,15}^T (A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4)dT$$

$$\Delta H = \int_{298,15}^{633,15} ((29,526 + (-0,0088999)(T) + (3,8083 \times 10^{-5})(T^2) + (-3,2629 \times 10^{-8})(T^3) + (8,8607 \times 10^{-12})(T^4))dT$$

$$\Delta H = 10318,17 \text{ J/mol}$$

- *Phthalic Anhydride*

$$\Delta H = \int_{298,15}^T (A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4)dT$$

$$\Delta H = \int_{298,15}^{633,15} ((40,083 + (0,036084)(T) + (0,00095956)(T^2) + (-1,2341 \times 10^{-6})(T^3) + (4,6597 \times 10^{-12})(T^4))dT$$

$$\Delta H = 53883,14 \text{ J/mol}$$

- Air (H₂O)

$$\Delta H = \int_{298,15}^T (A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4)dT$$

$$\Delta H = \int_{298,15}^{633,15} ((33,933 + (-0,00884186)(T) + (0,000029906)(T^2) + (-1,7825 \times 10^{-8})(T^3) + (3,6934 \times 10^{-12})(T^4))dT$$

$$\Delta H = 11646,79 \text{ J/mol}$$

$$\Delta H = (\Delta H \text{ C}_8\text{H}_4\text{O}_3 + (3 \times \Delta H \text{ H}_2\text{O}))$$

$$\begin{aligned}
&= (53883,14 \text{ J/mol} + (3 \times 11646,79 \text{ J/mol})) \\
&= 88823,52 \text{ J/mol atau } 88,82352 \text{ kJ/mol} \\
\Delta H &= (\Delta H \text{ C}_8\text{H}_{10} + (3 \times \Delta H \text{ O}_2)) \\
&= (57316,70 \text{ J/mol} + (3 \times 9353,28 \text{ J/mol})) \\
&= 95429,30 \text{ J/mol atau } 95,42930 \text{ kJ/mol}
\end{aligned}$$

Sehingga didapatkan ΔH reaksi pada suhu 360°C ($633,15 \text{ K}$) adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
\Delta H \text{ reaksi} &= \Delta H_{298} + (\Delta H \text{ produk} - \Delta H \text{ reaktan}) \\
&= -1137,53 \text{ kJ/mol} + (88,82352 \text{ kJ/mol} - 95,42930 \text{ kJ/mol}) \\
\Delta H \text{ reaksi} &= -1144,14 \text{ kJ/mol}
\end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, panas reaksi bernilai negatif sehingga dapat disimpulkan bahwa reaksi pembentukan *Phthalic Anhydride* pada suhu 360°C ($633,15 \text{ K}$) merupakan reaksi eksotermis.

Data ΔG^0_f masing-masing komponen pada suhu $298,15 \text{ K}$ dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 2. 8 Data Reaksi Bebas Gibbs Setiap Komponen

Kompenen	Harga ΔG^0_f
<i>Ortho-xylene</i>	122,09
Oksigen	0
<i>Phthalic Anhydride</i>	-329
Air	-228,6

(Yaws, 1999)

Reaksi Utama :

$$\begin{aligned}
\Delta G^0 &= \Delta G^0_f \text{ produk} - \Delta G^0_f \text{ reaktan} \\
&= (\Delta G \text{ C}_8\text{H}_4\text{O}_3 + (3 \times \Delta G \text{ H}_2\text{O})) - (\Delta G \text{ C}_8\text{H}_{10} + (3 \times \Delta G \text{ O}_2)) \\
&= (-307,001 + (3 \times -228,59)) - (122 + (3 \times 0)) \\
&= -1.136,81 \text{ kJ/mol}
\end{aligned}$$

$$\Delta G^0 = -R \cdot T \ln K_{298,15}$$

$$\begin{aligned}
\ln K_{298,15} &= \frac{\Delta G^0}{-RT} \\
&= \frac{-1.136,81 \text{ kJ/mol}}{-8,314 (298,15 \text{ K})} \\
&= 0,458641778
\end{aligned}$$

$$K_{298,15} = \exp^{(0,458641778)}$$

$$= 1,581923992$$

Digunakan reaksi pada suhu 360°C (633,15), sehingga:

$$\ln \frac{K_{298,15}}{K_{633,15}} = \frac{-\Delta H_R}{R} \left[\frac{1}{298,15} - \frac{1}{T} \right]$$

$$\ln \frac{K_{298,15}}{K_{633,15}} = \frac{-1143,51}{8,314} \left[\frac{1}{298,15} - \frac{1}{633,15} \right]$$

$$= -0,244081227$$

$$K_{633,15} = \frac{K_{298,15}}{\exp(-0,244081227)}$$

$$K_{633,15} = 2,019243638$$

Karena nilai Konstanta Keseimbangan (K) lebih dari satu, maka reaksi berlangsung secara *irreversible* ke arah produk.

Suatu reaksi dapat diketahui bersifat *reversible* (bolak-balik) atau *irreversible* (searah) dengan meninjau harga konstanta kesetimbangannya (K). Konstanta kesetimbangan adalah perbandingan antara konstanta kecepatan reaksi ke arah kanan dengan konstanta kecepatan reaksi ke arah kiri. Reaksi yang bersifat *irreversible* jika harga konstanta kesetimbangannya lebih dari satu dan nilainya sangat besar, karena nilai konstanta kecepatan reaksi ke arah kiri yang sebagai penyebut mendekati nilai nol. Sedangkan reaksi yang bersifat *reversible* jika harga konstanta kesetimbangannya kurang dari satu (Smith, 1981).

2.2.4 Tinjauan Kinetika

Phthalic Anhydride dihasilkan dari reaksi oksidasi katalitik fase gas dari *O-xylene*. Reaksi ini mengikuti persamaan kinetika kimia orde satu dengan harga konstanta reaksi (k) ditentukan dengan persamaan Arrhenius. Ditinjau dari kinetika secara umum kecepatan reaksi akan bertambah dengan naiknya suhu. Hal ini ditinjau dengan persamaan Arrhenius sebagai berikut :

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

Keterangan :

K = Konstanta kecepatan reaksi

A = Frekuensi tumbukan

E_a = Energi aktivasi

R = Konstanta gas

T = Suhu

Dalam *Chemical Reactor for Process Plant, 2nd vol: Case Studies and Design Data, Case Study number 110*, karangan Howard F. Rase, menyatakan bahwa nilai laju reaksi dan harga konstanta kecepatan reaksi pembentukan *Phthalic Anhydride* adalah sebagai berikut :

$$r_i = k_1 P_{ox} P_o \text{ dengan nilai } \ln \ln k_1 = \frac{-27000}{RT} + 19,837$$

$$r_i = k_2 P_{ox} P_o \text{ dengan nilai } \ln \ln k_2 = \frac{-27000}{RT} + 19,23$$

$$r_i = k_3 P_{ox} P_o \text{ dengan nilai } \ln \ln k_3 = \frac{-28600}{RT} + 18,97$$

Keterangan:

r_i = Laju Reaksi (kmol/kgcat.jam)

k_i = Konstanta kecepatan reaksi

P_i = Tekanan parsial komponen (atm)

T = Suhu (K)

Dengan : OX = *Ortho-xylene* ; O = Oksigen

(Rase, 1977)

Dari persamaan di atas dapat dihitung nilai konstanta kecepatan reaksi sebagai berikut:

$$\text{Untuk } k_1 : \ln k_1 = \frac{-27000}{633,15,8,314} + 19,837 = 14,708$$

$$k_1 = e^{14,708} = 2440783,215$$

$$\text{Untuk } k_1 : \ln k_2 = \ln \ln k_1 = \frac{-27000}{633,15,8,314} + 19,23 = 14,101$$

$$k_2 = e^{14,101} = 1330186,26$$

$$\text{Untuk } k_1 : \ln k_3 = \ln \ln k_1 = \frac{-28600}{633,15,8,314} + 18,97 = 13,537$$

$$k_2 = e^{13,537} = 756818,464$$

Dari hasil perhitungan, dapat disimpulkan bahwa reaksi pembentukan *Phthalic Anhydride* berlangsung sangat cepat, dikarenakan nilai k yang diperoleh sangat besar.

2.2.5 Kondisi Operasi

Kondisi Operasi reaktor yang digunakan pada perancangan pabrik *Phthalic Anhydride* adalah sebagai berikut :

Suhu umpan reaktor : 360°C

Suhu keluaran reaktor : 375°C

Reaksi berlangsung	: <i>irreversible</i>
Sifat reaksi	: Eksotermis
Tekanan	: 2 atm
Fase	: Gas
Jenis reaktor	: <i>Fixed Bed Multitube</i>

(Hoffmann et al., 2011)

2.3 Langkah Proses

2.3.1 Diagram Alir

Diagram Alir proses pra rancangan pabrik *Phthalic Anhydride* dengan proses oksidasi *O-xylene* dapat dilihat pada lampiran.

2.3.2 Langkah Proses

Proses pembuatan *Phthalic Anhydride* menggunakan metode Von Heyden dengan katalis Vanadium Pentoxide terbagi menjadi beberapa tahapan, yaitu :

- Tahapan persiapan bahan baku.
- Tahapan oksidasi (reaksi utama).
- Tahapan kondensasi.
- Tahapan pemurnian/*refinery* (destilasi).
- Tahapan Packaging.

Penjelasan dari masing-masing tahapan adalah sebagai berikut:

1. Tahapan Persiapan Bahan Baku

1) *Ortho-xylene*

Persiapan bahan baku *Ortho-xylene* digunakan untuk menyesuaikan bahan baku agar memenuhi spesifikasi pada saat bereaksi dalam reaktor. Kondisi operasi bahan baku pada saat bereaksi di reaktor adalah pada fase gas, tekanan 2,4 atm, dan suhu 360⁰C. Untuk itu dibutuhkan beberapa proses dengan tujuan mencapai kondisi operasi yang sesuai dengan kondisi reaktor. Tahap pertama adalah bahan baku *Ortho-xylene* ditampung dalam tangki (T-101) pada suhu atmosferik 30⁰C dan tekanan 1 atm. Kemudian akan dipompa menuju vaporizer (VP-101) dengan menggunakan pompa sentrifugal. Pompa ini selain berfungsi untuk memindahkan bahan baku, juga berfungsi untuk menaikkan tekanan *Ortho-xylene* menjadi 2 atm. Pada vaporizer (VP-101) bahan baku *Ortho-xylene* yang berwujud cair akan diubah fasanya menjadi gas dan dinaikkan suhunya menjadi 172,74⁰C.

Selanjutnya, bahan baku dialirkan ke furnace (FR-101) untuk dinaikkan suhunya agar sesuai dengan kondisi operasi pada reaktor yaitu 360°C . Setelah melalui perlakuan ini, bahan baku *Ortho-xylene* sudah siap untuk direaksikan di reaktor R-201.

2) Udara

Berbeda dengan pretreatment *Ortho-xylene*, untuk mencapai spesifikasi kondisi operasi reaktor, maka udara hanya akan melalui tahapan pretreatment tekanan dan suhu. Pada awalnya udara pada kondisi ruang sebagai bahan baku diperoleh dari udara bebas. Udara diambil menggunakan blower B-101 yang dilengkapi dengan filter F-101, blower juga berfungsi untuk meningkatkan tekanan udara menjadi 1,4 atm, serta menyebabkan suhu udara naik menjadi 36°C . Setelah melalui proses filtrasi untuk menghilangkan partikulat pengotor udara dinaikkan tekanannya dengan menggunakan kompresor (C-102) sehingga menjadi tekanan 2,4 atm dengan suhu 110°C . Setelah tekanan dan suhu ditingkatkan, udara bebas dipanaskan di furnace (FR-101) hingga mencapai suhu operasi pada reaktor yaitu 360°C .

2. Tahapan Oksidasi (Reaksi Utama)

Gas keluaran furnace (*Ortho-xylene* dan udara) tersebut kemudian masuk ke dalam reaktor *fixed bed multitube* (R-201). Didalam reaktor, kondisi operasi dijaga agar output keluar dari reaktor memiliki suhu 375°C dan pada setiap tube yang ada dalam reaktor terdapat kumpulan katalis vanadium pentaoksida (V_2O_5) dengan tujuan menurunkan energi aktivasi dan mengarahkan reaksi agar terbentuk produk utama yaitu *Phthalic Anhydride*. Reaksi berlangsung sangat eksotermis sehingga suhu reaktor harus dijaga menggunakan pendingin berupa Dowtherm A. Dowtherm A membawa panas dari reaktor dengan suhu 175°C . Produk keluaran reaktor berupa gas dengan suhu 375°C dengan tekanan 1,8 atm. Untuk meringankan beban kondenser, produk keluaran reaktor masih berada pada suhu 375°C didinginkan terlebih dahulu dengan HE-301 sampai suhu 135°C dengan menggunakan aliran cooling water dari unit utilitas.

3. Tahapan Kondensasi

Tahap kondensasi dilakukan dengan tujuan untuk memisahkan produk utama *Phthalic Anhydride* dari impuritas berfase gas (gas CO_2 , CO , N_2 , Ar , dan O_2) pada kondisi atmosferik. Produk *Phthalic Anhydride* gas keluar dari reaktor R-201 dengan suhu 375°C

dengan tekanan 1,8 atm akan didinginkan terlebih dahulu dengan cooler HE-301 sampai suhu 135⁰C dengan menggunakan cooling water. Tekanan turun sebanyak 0,1 atm pada masing-masing HE, hal ini bertujuan untuk meringankan beban kondenser parsial pada unit selanjutnya.

Tahap selanjutnya campuran gas *Phthalic Anhydride* mengalir kedalam kondenser parsial 1 CP-301. Pada CP-301 *Phthalic Anhydride* akan terkondensasi dan terpisah dengan gas lain (CO, CO₂, N₂, Ar, dan O₂) serta sebagian H₂O berfase gas yang memiliki titik didih yang jauh dengan produk utama membentuk kesetimbangan baru. Produk keluaran kondenser parsial CP-301 memiliki suhu 131⁰C dengan tekanan 1,4 atm dengan dua arus keluaran yang berbeda fasa. Produk atas merupakan produk samping dengan komposisi senyawa *uncondensable gas* yang masih mengandung sedikit *Phthalic Anhydride* berfase gas, sementara produk bawah adalah produk utama berfase cair yang sudah terpisah dari gas impuritas. Produk hasil bawah akan dialirkan menuju akumulator T-301 sementara produk atas akan dialirkan menuju kondenser parsial 2 CP-302.

Pada kondenser parsial 2 CP-302 terjadi pemisahan *Phthalic Anhydride* dengan gas lain yang nantinya akan dipurging ke udara. Kondisi operasi keluaran sistem dijaga pada suhu 108⁰C dengan tekanan 1,3 atm dimana kondisi ini *Phthalic Anhydride* berwujud cair. Untuk menghindari *Phthalic Anhydride* memadat pada kondenser parsial CP-302 dapat dilakukan dengan mengatur suhu dan tekanan operasi maka akan terbentuk kesetimbangan dimana diperoleh *Crude Phthalic Anhydride* pada fase cair. Produk dasar CP-302 yang merupakan produk utama berfase cair akan dialirkan menuju akumulator tank T-301.

Didalam akumulator tank T-301 *Phthalic Anhydride* ditampung sebelum dialirkan menuju kolom destilasi. Kemudian *Phthalic Anhydride* dialirkan menggunakan pompa P-301 dengan kondisi operasi tekanan 1,1 atm dan suhu 121,3⁰C menuju kolom destilasi DC-301 yang sebelumnya akan dipanaskan dengan menggunakan HE-302 sampai suhu 152⁰C dan tekanan 1,1 atm.

4. Tahapan Pemurnian/Refinery (Destilasi)

Tahap pemurnian dengan distilasi dilakukan dengan tujuan untuk memisahkan *Phthalic Anhydride* dari Maleic Anhydride, Benzoid Acid, dan air. Pada tahap kondensasi air, *Benzoic Acid*, *Maleic Anhydride* masih terkandung dalam produk utama *Phthalic Anhydride* karena perbedaan boiling pointnya tidak terpaut jauh berbeda dengan *Phthalic*

Anhydride jika dibandingkan dengan zat lainnya yang pada kondisi atmosferik pun berada pada fasa gas. Oleh karena itu air, *Benzoic Acid*, *Maleic Anhydride* akan dipisahkan menggunakan metode destilasi. *Phthalic Anhydride* yang berada pada akumulator tank T-301 dialirkan menggunakan pompa P-301 menuju *distillation column* DC-301 yang sebelumnya akan dipanaskan terlebih dahulu dengan menggunakan HE-302 sampai suhu 150,9°C dan tekanan 1,1 atm. Arus yang keluar dari T-301 berada pada kondisi cair jenuh yang mudah membentuk dua fasa apabila terjadi perubahan tekanan maupun suhu. Faktor tersebut yang menyebabkan sebelum masuk ke Menara distilasi kondisinya berupa campuran fase liquid dengan sedikit gas.

Pada kolom distilasi, *Phthalic Anhydride* dipisahkan dari air, *Benzoic Acid*, *Maleic Anhydride*. hasil atas berada pada suhu 143,5°C dan tekanan 1 atm sebagian besar berupa air (92,2%w/w) akan dikondensasikan seluruhnya ke dalam condenser C-301 dan dialirkan ke dalam surge tank T-302, kemudian dibagi sebagai arus reflux dan sebagian akan dialirkan ke unit pengolahan limbah. Sedangkan hasil bawah dari kolom distilasi adalah *Phthalic Anhydride* dengan kemurnian 99,9% yang masih mengandung sedikit *Maleic Anhydride* dan *Benzoic Acid* berada pada tekanan 1,2 atm dan suhu 284,7°C.

Selanjutnya *Phthalic Anhydride* dialirkan menggunakan pompa P-303 menuju HE-303 untuk diturunkan suhunya dari 284°C hingga 180°C dengan menggunakan *cooling water* sebagai pendingin. Selanjutnya dialirkan menuju Flaker FL-401 untuk diubah fasenya dari fase cair menjadi fase padat.

5. Packaging

Phthalic Anhydride 99,9% w/w sebagai hasil bawah kolom destilasi DC-301 akan dialirkan menuju *Heat Exchanger* HE-303 untuk didinginkan dari suhu 302°C hingga 180°C dan setelah itu dialirkan menuju unit Flaker FL-401 untuk mengubah fase *Phthalic Anhydride* dari fase cair menjadi fase padat. Pada Flaker terdapat drum yang berputar. *Phthalic Anhydride* akan menempel pada permukaan drum dan akan ikut berputar. Sejalan dengan putaran drum, dilakukan pendinginan yang masuk pada suhu 30°C dengan cara mengontakkan drum menggunakan *cooling water* yang alirannya berada didalam drum. *Phthalic Anhydride* yang menempel pada permukaan drum akan memadat pada suhu 131°C dan akan terus didinginkan sampai suhu 30°C. Setelah *Phthalic Anhydride* memadat solid akan diangkut dengan menggunakan *Screw Conveyor* SC-401 menuju *Bucket Elevator* BE-401. Pemilihan *Screw Conveyor* SC-401 karena dengan

menggunakan *Screw Conveyor* sekaligus terjadi size reduction sehingga produk *Phthalic Anhydride* padat memiliki ukuran yang relatif seragam. *Phthalic Anhydride* kemudian diangkut menggunakan *Bucket Elevator* BE-401 menuju silo SI-401 dan akan segera di packing serta disimpan di Gudang S-401. Sifat *Phthalic Anhydride* yang higroskopis mengharuskan packing terbuat dari material yang kedap dengan udara misalkan kantong plastik atau drum plastik.

2.4 Neraca Massa dan Neraca Panas

2.4.1 Neraca Massa

5. Neraca Massa di Sekitar Reaktor (R-201)

Tabel 2. 9 Neraca Massa di Sekitar Reaktor (R-201)

Komposisi	Laju Alir Masuk		Laju Alir Keluar
	Arus 1	Arus 2	Arus 3
	(kg/jam)	(kg/jam)	(kg/jam)
PA	0,0000	0,0000	12.999,6991
MA	0,0000	0,0000	87,9883
BA	0,0000	0,0000	12,4140
OX	12.057,2329	0,0000	2.168,1894
MX	246,0660	0,0000	-0,0271
O	0,0000	53.776,3957	42.841,1316
N	0,0000	177.013,9691	177.013,9691
C	0,0000	3,5211	2.552,2606
Co	0,0000	2,2407	2,2407
A	0,0000	3194,5740	3.194,5740
W	0,0000	0,0000	5.421,5599
Jumlah	12.303,2989	233.990,7005	246.293,9994
	246.293,9994		246.293,9994

6. Neraca Massa di Sekitar *Condenser Partial* (CP-301)

Tabel 2. 10 Neraca Massa di Sekitar Condensor Partial (CP-301)

Komposisi	Laju Alir Masuk		Laju Alir Keluar
	Arus 3	Arus 4	Arus 5
	(kg/jam)	(kg/jam)	(kg/jam)
PA	12.999,6991	139,6691	12.860,0300
MA	87,9883	8,0827	79,9056
BA	12,4140	0,1456	12,2684

OX	2.168,1894	817,4918	1.350,6976
MX	-0,0271	0,0000	0,0000
O ₂	42.841,1316	42.841,1316	0,0000
N ₂	177.013,9691	177.013,9691	0,0000
CO ₂	2.552,2606	2.552,2606	0,0000
CO	2,2407	2,2407	0,0000
Ar	3.194,5740	3.194,5740	0,0000
H ₂ O	5.421,5599	3.835,0890	1.586,4709
Jumlah	246.293,9994	230.404,6540	15.889,3725
	246.293,9994	246.293,9994	

7. Neraca Massa di Sekitar *Condenser Partial* (CP-302)

Tabel 2. 11 Neraca Massa di Sekitar Condensor Partial (CP-302)

Komposisi	Laju Alir Masuk	Laju Alir Keluar	
	Arus 4	Arus 6	Arus 7
	(kg/jam)	(kg/jam)	(kg/jam)
PA	139,6991	0,0041	139,6649
MA	8,0827	0,0024	8,0802
BA	0,1456	0,0000	0,1456
OX	817,4918	1,8558	815,6360
MX	0,0000	0,0000	0,0000
O ₂	42.841,1316	42.841,1316	0,0000
N ₂	177.013,9691	177.013,9691	0,0000
CO ₂	2.552,2606	2.552,2606	0,0000
CO	2,2407	2,2407	0,0000
Ar	3.194,5740	3.194,5740	0,0000
H ₂ O	3.835,0890	33,4653	3.801,6237
Jumlah	230.404,6540	230.404,6540	15.889,3725
	230.404,6540	246.293,9994	

8. Neraca Massa di Sekitar *Accumulator Tank* (AT-301)

Tabel 2. 12 Neraca Massa di Sekitar Accumulator Tank (AT-301)

Komposisi	Laju Alir Masuk	Laju Alir Keluar	
	Arus 5	Arus 7	Arus 8
	(kg/jam)	(kg/jam)	(kg/jam)
PA	12.860,0300	0,0041	139,6649
MA	79,9056	0,0024	8,0802
BA	12,2684	0,0000	0,1456
OX	1.350,6976	1,8558	815,6360
MX	0,0000	0,0000	0,0000
O ₂	0,0000	0,0000	0,0000
N ₂	0,0000	0,0000	0,0000
CO ₂	0,0000	0,0000	0,0000
CO	0,0000	0,0000	0,0000
Ar	0,0000	0,0000	0,0000
H ₂ O	1.586,4709	3.801,6237	5.388,0946
Jumlah	15.889,3725	4.765,1505	20.654,5230
	20.654,5230	20.654,5230	

1. Neraca Massa di Sekitar Menara Distilasi (DC-301)

Tabel 2. 13 Neraca Massa di Sekitar Menara Distilasi (DC-301)

Komposisi	Laju Alir Masuk	Laju Alir Keluar	
	Arus 8	Arus 9	Arus 10
	(kg/jam)	(kg/jam)	(kg/jam)
PA	12.999,6949	7,6495	12.992,0455
MA	87,9858	81,4833	6,5025
BA	12,4140	5,9115	6,5025
OX	2.166,3336	2.166,3336	0,0000
MX	0,0000	0,0000	0,0000
O ₂	0,0000	0,0000	0,0000
N ₂	0,0000	0,0000	0,0000
CO ₂	0,0000	0,0000	0,0000

CO	0,0000	0,0000	0,0000
Ar	0,0000	0,0000	0,0000
H ₂ O	5.388,0946	5.388,0946	0,0000
Jumlah	20.654,5230	7.649,4454	13.005,0505
	20.654,5230	20.654,5230	

2. Neraca Massa Overall

Tabel 2. 14 Neraca Massa Overall

Neraca Massa Overall		
Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Reaktor		
C ₈ H ₄ O ₃	12.303,2989	
O ₂	53.776,3957	
N ₂	177.013,9691	
CO ₂	3,5211	
CO	2,2407	
Ar	3.194,5740	
Kondensor Parsial		
C ₈ H ₄ O ₃		0,0041
C ₄ H ₂ O ₃		0,0024
C ₇ H ₆ O ₂		-
C ₈ H ₁₀		1,8558
O ₂		42.841,1316
N ₂		177.013,9691
CO ₂		2.552,2606
CO		2,2407
Ar		3.194,5740
H ₂ O		
Distilasi Coulumn		
C ₈ HO ₃		7,6495
C ₄ H ₂ O ₃		81,4833
C ₇ H ₆ O ₂		5,9115

C ₈ H ₁₀		2.166,3336
H ₂ O		5.388,0946
Silo		
C ₈ H ₄ O ₃		13.025,4837
C ₄ H ₂ O ₃		6,5025
C ₇ H ₆ O ₂		6,5025
TOTAL	246.293,9995	246.293,9995

%Yield : Produk / Feed x 100%

%Yield : 97,8%

2.4.2 Neraca Panas

1. Neraca Panas di Sekitar Blower (B-101)

Tabel 2. 15 Neraca Panas di Sekitar Blower (B-101)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q1	2.455.860,9731	-
Q2	-	3.094.037,5449
Q akibat kenaikan tekanan	638.176,5718	-
TOTAL	3.094.037,5449	3.094.037,5449

2. Neraca Panas di Sekitar Kompresor (C-101)

Tabel 2. 16 Neraca Panas di Sekitar Kompresor (C-101)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q2	3.094.037,5449	-
Q3	-	23.627.390,8545
Q akibat kenaikan tekanan	20.533.353,3096	-
TOTAL	23.627.390,8545	23.627.390,8545

3. Neraca Panas di Sekitar Vaporizer (VP-101)

Tabel 2. 17 Neraca Panas di Sekitar Vaporizer (VP-101)

Komponen	Q Input (kJ/jam)	Q Output (kJ/jam)
Q4	110.014,0032	

Q5	-	3.496.231,0805
Qpemanas	7.453.914,7174	-
Qpenguapan		4.067.697,6401
TOTAL	7.563.928,7206	7.563.928,7206

4. Neraca Panas di Sekitar *Furnance* (FR-101)

Tabel 2. 18 Neraca Panas di Sekitar *Furnance* (FR-101)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q3	23.627.390,8545	-
Q5	3.496.231,0805	-
Q6	-	70.668.559,5808
Q7	-	9.377.897,1870
Q bahan bakar	70.563.779,7769	-
Q loss	-	17.640.944,9442
TOTAL	97.687.401,7119	97.687.401,7119

5. Neraca Panas di Sekitar Reaktor (R-201)

Tabel 2. 19 Neraca Panas di Sekitar Reaktor (R-201)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
ΔHr	78.149.087,3433	-
ΔH_{298}	213.142.125,2187	-
ΔH_p	-	83.478.641,1688
Qpendingin	-	207.812.571,3933
TOTAL	291.291.212,5621	291.291.212,5621

6. Neraca Panas di Sekitar *Cooler* (HE-301)

Tabel 2. 20 Neraca Panas di Sekitar *Cooler* (C-301)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q8	83.478.641,1688	-
Q9	-	26.456.911,1093

Q pendingin	-	57.021.730,0595
TOTAL	83.478.641,1688	83.478.641,1688

7. Neraca Panas di Sekitar *Condensor Partial* (CP-301)

Tabel 2. 21 Neraca di Sekitar Condensor Partial (CP-301)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q9	264.56.911,11	
Q10	-	22.999.931,79
Q11	-	3.311.949,204
Qlaten	9.324.331,225	-
QCW in	817.240,09	-
QCW out	-	13.358.777,86
Q sensible	3.072.176,44	
TOTAL	39.670.658,86	39.670.658,86

8. Neraca Panas di Sekitar *Condensor Partial* (CP-302)

Tabel 2. 22 Neraca Panas di Sekitar Condensor Partial (CP-302)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q10	22.999.931,79	-
Q12	-	17.394.501,31
Q13	-	965.749,8780
Qlaten	9.205.956,116	-
Qpendingin	-	13.845.636,71
TOTAL	32.205.887,91	32.205.887,9

9. Neraca Panas di Sekitar *Accumulator Tank* (AT-301)

Tabel 2. 23 Neraca Panas di Sekitar Accumulator Tank (AT-301)

Komponen	Qinput (kJ/jam)	Qoutput (kJ/jam)
Q11	3.311.949,2041	-
Q13	965.749,8780	-

Q14	-	4.277.699,0822
TOTAL	4.277.699,0822	4.277.699,0822

10. Neraca Panas di Sekitar *Heat Exchanger* (HE-302)

Tabel 2. 24 Neraca Panas di Sekitar Heat Exchanger (HE-302)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q14	4.692.969,3973	-
Q15	-	6.297.117,9227
Q	2.303.128,6149	-
Q loss	-	698.980,0894
TOTAL	6.996.098,0122	6.996.098,0122

11. Neraca Panas di Sekitar Menara Destilasi (DC-301)

Tabel 2. 25 Neraca Panas di Sekitar Menara Destilasi (DC-301)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Hf	6.297.117,9227	-
Hw	-	6.459.313,4096
Hd	-	9.326,5046
Qkondensor	-	13.661.687,8796
Qreboiler	13.833.209,8711	-
TOTAL	20.130.327,7938	20.130.327,7938

12. Neraca Panas di Sekitar *Cooler* (HE-303)

Tabel 2. 26 Neraca Panas di Sekitar Cooler (HE-303)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q17	6.464.653,1312	-
Q18	-	3.570.610,8238
Qpendingin	-	2.894.042,3074
TOTAL	6.464.653,1312	6.464.653,1312

13. Neraca Panas di Sekitar Flaker (FL-401)

Tabel 2. 27 Neraca Panas di Sekitar Flaker (FL-401)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
H1	1.217.731,3040	-
H	2.056.781,2500	-
H2	2,5877	-
H	963,3864	-
H3	1.880,3410	-
H4	-748,3084	-
H	899,0736	-
H5	-1.009,1085	-
H6	1.260,7019	-
Qpendingin	-	3.277.761,2279
TOTAL	3.277.761,2279	3.277.761,2279

14. Neraca Panas Overall

Tabel 2. 28 Neraca Panas Overall

Neraca Panas Overall		
Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Blower		
O ₂	415.433,7813	
N ₂	2.022.106,9486	
CO ₂	33,9714	
CO	25,6077	
Ar	18.260,6641	
Q2		3.094.037,5449
Qnaik	638.176,5718	
Vaporizer		
Qlaten		4.067.697,6401
C ₈ H ₁₀	110.014,0032	

Furnace		
Qbahan bakar	70.563.779,7769	
Qloss		17.640.944,9442
Reaktor		
C ₈ H ₄ O ₃		5.010.903,5509
C ₄ H ₂ O ₃		46.015,3369
C ₇ H ₆ O ₂		5.694,1948
C ₈ H ₁₀	7.480.527,7626	1.393.788,6161
O ₂	7.641.290,8577	6.109.655,2011
N ₂	62.469.193,0920	65.325.436,4469
CO ₂	1.156,9342	879.954,2130
CO	798,4731	835,4061
Ar	556.120,2237	581.021,1293
H ₂ O		4.125.337,0737
Condensor 301		
Qlaten	9.324.331,2247	
Qpendingin		13.358.777,8600
Condensor 302		
Q12		17.394.501,3122
Qpendingin		13.845.636,7132
Q13		965.749,8780
Heat Exchanger		
Qpendingin		6.686.956,2380
Qloss		698.980,0894
Destilasi Coulumnn		
Qd		9.326,5046
TOTAL	161.241.249,8931	161.241.249,8934

% Kehilangan Panas: (Kehilangan Panas Overall / Total Panas) x 100%

% Kehilangan Panas: 22,1679%

Efisiensi Neraca Panas : (100%-%Kehilangan Panas)

Efisiensi Neraca Panas : 77,8321%

2.5 Tata Letak Pabrik dan Peralatan

2.5.1 Tata Letak Pabrik

Setelah penyusunan flow diagram, dilakukan penyusunan layout pabrik yang mencakup perencanaan tata letak pabrik dan tata letak peralatan. Dalam tata letak pabrik, peralatan dan bangunan fisik pabrik harus ditempatkan sedemikian rupa agar mampu menunjang proses produksi secara efisien. Selain menunjang proses produksi, tata letak pabrik sangat penting untuk kelancaran dan keselamatan para pekerja selama proses produksi berlangsung. Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam penyusunan tata letak pabrik:

- Kemungkinan perluasan pabrik sebagai pengembangan pabrik.
- Faktor keamanan sangat diperlukan untuk bahaya kebakaran dan ledakan. Untuk itu penyusunan tata letak perlu dijauhkan dari sumber api, bahan panas, dan bahan yang mudah meledak, serta jauh dari gas beracun.
- Sistem konstruksi yang direncanakan adalah indoor dikarenakan kondisi operasi yang relatif rendah dan menghindari pengaruh cuaca.
- Harga tanah cukup mahal sehingga memerlukan efisiensi dalam perencanaan pengaturan ruang atau lahan.

Secara garis besar, tata letak pabrik dibagi kedalam beberapa bagian utama, yaitu:

- Daerah administrasi, perkantoran, laboratorium, dan ruang kontrol sebagai pusat administrasi pabrik yang mengatur kelancaran operasi. Laboratorium dan ruang kontrol sebagai pusat pengendalian proses, kualitas dan kuantitas bahan yang akan diproses serta produk yang dijual.
- Daerah proses sebagai lokasi peletakan alat dan berjalannya proses produksi *Phthalic Anhydride*.
- Daerah penyimpanan umum dan bengkel, sebagai lokasi menyimpan bahan baku dan produk *Phthalic Anhydride* serta kepentingan bengkel untuk *maintenance* peralatan.
- Daerah laboratorium dan ruang kontrol Sebagai pusat pengendalian proses, kualitas dan kuantitas bahan yang akan diproses serta produk yang akan dijual. Laboratorium dan control ini diletakkan dekat dengan daerah proses apabila terjadi sesuatu masalah di daerah proses agar cepat teratasi.

- Daerah parkir dan loading bahan baku sebagai lokasi parkir karyawan dan lokasi mobilitas truk bahan baku ke gudang bahan baku.
- Daerah utilitas merupakan daerah penyedia bahan pendukung proses, seperti unit penyediaan air dan listrik.



Gambar 2. 1 Layout Pabrik Phthalic Anhydride

2.5.2 Tata Letak Peralatan

Dalam penyusunan tata letak pabrik *Phthalic Anhydride* perlu memperhatikan beberapa faktor, yaitu:

1. Aliran Bahan Baku dan Produk

Penataan peralatan produksi dilakukan dengan memperhatikan aliran bahan baku dan produk secara efisien untuk menjamin kelancaran dan keamanan proses produksi serta memberikan keuntungan ekonomi. Aliran bahan baku yang menggunakan pompa dan sistem perpipaan harus ditempatkan sedemikian rupa agar tidak mengganggu lalu lintas pekerja.

2. Aliran Udara

Aliran udara di dalam dan sekitar area proses perlu diperhatikan kelancarannya. Hal ini bertujuan untuk menghindari terjadinya stagnasi udara pada suatu tempat sehingga mengakibatkan akumulasi bahan kimia yang dapat membahayakan keselamatan pekerja.

3. Cahaya

Cahaya berfungsi sebagai penerangan seluruh pabrik. Seluruh pabrik harus mendapat penerangan yang memadai, khususnya pada area proses dengan risiko tinggi untuk menghindari terjadinya kecelakaan.

4. Lalu Lintas Manusia

Perancangan layout peralatan pabrik harus diperhatikan agar pelaksanaan produksi berjalan lancar. Pekerja diharapkan dapat mengakses seluruh peralatan produksi dengan cepat dan mudah. Sehingga jika terdapat masalah pada peralatan proses dapat segera diperbaiki. Selain itu, keselamatan pekerja saat menjalankan tugas juga menjadi prioritas.

5. Jarak Antar Alat Proses

Alat proses dengan suhu dan tekanan operasi tinggi harus dipisahkan dari peralatan proses lainnya sehingga peralatan tersebut tidak membahayakan peralatan proses lainnya jika terjadi ledakan atau kebakaran.

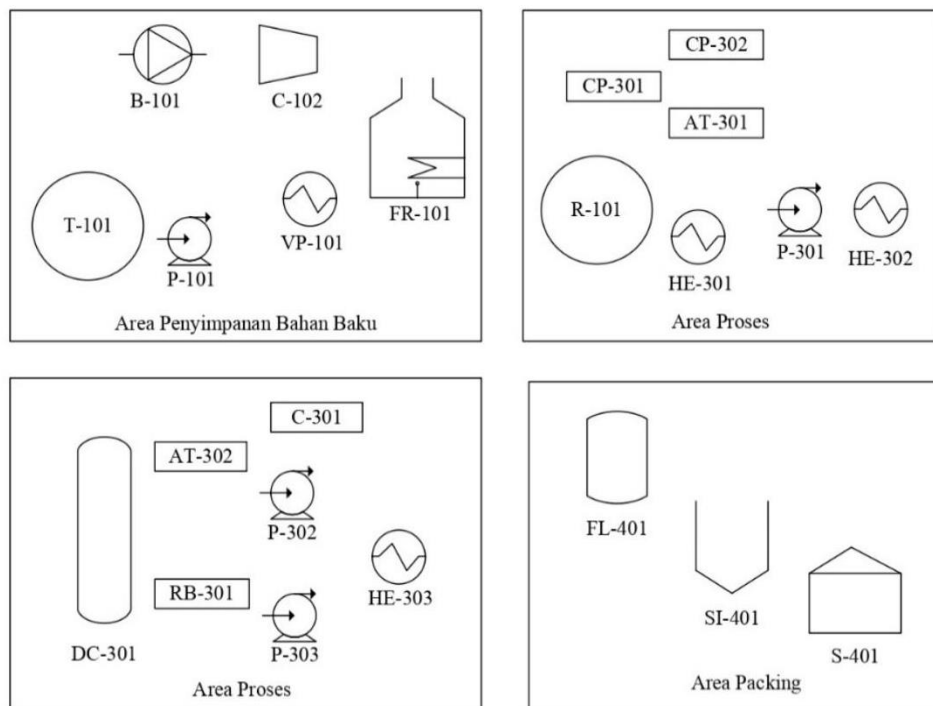
6. Operasional Alat

Alat dengan kontrol khusus (*valve, sampling location, instrument*) harus diletakkan dekat dengan ruang kontrol dan diawasi operator. Kebutuhan ruang alat juga perlu diperhatikan, seperti *heat exchanger* yang memerlukan ruang untuk pembersihan tube.

7. Ekonomi

Penempatan peralatan proses berorientasi ekonomi untuk memastikan kelancaran dan keamanan produksi pabrik dengan biaya seminimal mungkin. Tata letak proses harus mempertimbangkan aspek ekonomi berikut:

- Memastikan bahwa dengan biaya minimal proses produksi tetap dapat berjalan lancar dan aman.
- Efektivitas dalam memanfaatkan area pembangunan sehingga tidak terjadi pemborosan tempat.
- Biaya bahan dan proses minimal yang mengarah pada pengurangan pengeluaran modal yang tidak diperlukan.
- Karyawan mendapatkan kenyamanan saat bekerja sehingga dapat meningkatkan produktivitas pekerja.



Gambar 2. 2 Layout Peralatan Proses Pabrik Phthalic Anhydride

Keterangan :

- T-101 : Tangki *Ortho-xylene*
V-101 : Vaporizer
B-101 : Blower
C-101 : Kompresor

FR-101	: <i>Furnance</i>
R-201	: Reaktor
HE-301	: <i>Gas Coller Heat Exchanger</i>
CP-301	: Kondensor Parsial 1
CP-302	: Kondensor Parsial 2
T-301	: Tangki Akumulator
HE-302	: <i>Heat Exchanger 2</i>
DC-301	: Kolom Destilasi
C-301	: Kondensor
RB-301	: Reboiler
HE-303	: <i>Heat Exchanger 3</i>
FL-401	: Flaker
SI-401	: Sillo