

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

(Drews, 1998)

- Sifat Fisika

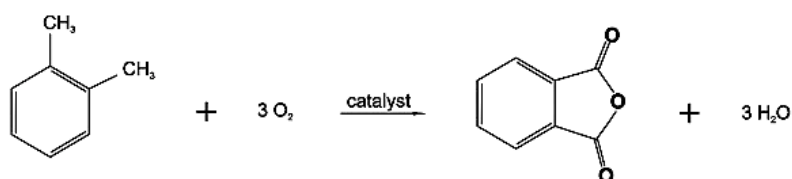
Rumus molekul	: C ₈ H ₁₀
Berat molekul	: 106,168 gr/mol
Fasa	: Cair (25 ⁰ C, 1 atm)
Densitas	: 0,8760 gr/cm ³ (25 ⁰ C, 1 atm)
Kemurnian	: 98% berat min
Impuritas	: 2% berat maks (<i>m-xylene</i>)

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 <i>Gibbs</i>	: 122.000 J/mol
Kelarutan	: Larut dalam air, alkohol, <i>ether</i> , aseton.

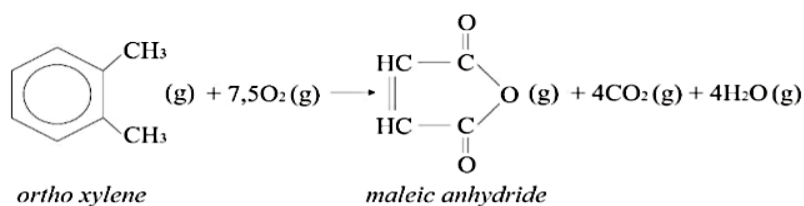
(Perry & Green, 2008)

- Sifat Kimia

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



Dengan reaksi samping:



(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	79
O ₂	21

(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

Specific Gravity : 1,1044

Densitas : 0,436 gr/cm³

- Nitrogen

Rumus molekul : N₂

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

- Sifat Kimia

Oksigen yang merupakan komponen utama udara selain nitrogen memiliki sifat kimia yang sangat reaktif terhadap berbagai unsur dan senyawa, dengan beberapa karakteristik penting sebagai berikut:

1. Kemampuan Reaksi dengan Unsur Kimia

Oksigen di atmosfer, yang secara alami berada dalam bentuk molekul diatomik (O₂), dapat bereaksi secara kimia dengan hampir semua unsur dalam tabel periodik. Pengecualian terdapat pada gas mulia tertentu seperti Helium (He), Neon (Ne), dan Argon (Ar), yang memiliki konfigurasi elektron stabil sehingga tidak membentuk senyawa dengan oksigen dalam kondisi normal. Hal ini menunjukkan bahwa oksigen memiliki sifat elektronegatif tinggi dan berperan sebagai agen pengoksidasi (oksidator) kuat dalam banyak reaksi kimia.

2. Reaksi Pembakaran dengan Bahan Bakar atau Zat Reduktif

Ketika oksigen berinteraksi dengan bahan-bahan yang mudah teroksidasi seperti hidrokarbon, alkohol, atau bahan bakar lainnya, terutama dalam proporsi seperti yang terdapat di udara (sekitar 21% dalam satuan mol), maka akan terjadi reaksi pembakaran yang bersifat eksotermis. Reaksi ini menghasilkan energi panas serta produk samping utama berupa karbon dioksida (CO₂), uap air (H₂O), dan komponen sisa dari udara, seperti nitrogen dan argon yang tidak bereaksi secara kimia namun tetap hadir dalam sistem

reaksi. Proses ini menjadi dasar bagi pembakaran konvensional pada mesin, tungku, maupun proses industri lainnya.

3. Pembentukan Senyawa Teroksigenasi pada Suhu Rendah dengan Katalis

Dalam kondisi suhu yang relatif rendah dan dengan keberadaan katalis tertentu (seperti logam transisi atau senyawa oksida logam), oksigen dapat bereaksi dengan senyawa organik untuk membentuk senyawa hidrokarbon teroksigenasi (*oxygenated hydrocarbons*), seperti alkohol, aldehid, dan asam karboksilat. Reaksi ini tidak melalui jalur pembakaran penuh, melainkan melalui proses oksidasi parsial, yang banyak diterapkan dalam industri kimia untuk menghasilkan produk bernilai tambah dari bahan baku hidrokarbon.

(Perry & Green, 2008)

2.1.2 Spesifikasi Katalis

a. *Vanadium Pentoxide* (V_2O_5)

- Komposisi

Fasa : Padat

Lapisan aktif : V_2O_5

Bentuk : *Hollow cylindrical*

Diameter partikel: 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
<i>Silicon</i>	Maksimum 0,25
Besi	Maksimum 0,25

(LTS Research Laboratories, 2000)

- Sifat Fisika

Rumus Molekul : V_2O_5

Berat molekul : 181,88 gr/mol

Titik didih : $1750^{\circ}C$ (1 atm, $25^{\circ}C$)

Titik leleh : $681^{\circ}C$ (1 atm, $25^{\circ}C$)

- Sifat kimia

Senyawa ini dapat larut di dalam air dan dapat bersifat sebagai 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

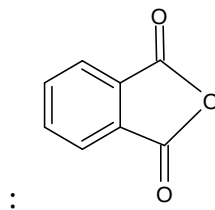
Tabel 2.4 Komposisi *Phthalic Anhydride*

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

(Richter & Wiedemeyer, 1988)

- Sifat Fisika

Struktur senyawa



Rumus molekul	: $C_8H_4O_3$
Berat molekul	: 148,11 kg/kmol
Titik didih	: $284,5^{\circ}C$ (1 atm, $25^{\circ}C$)
Titik leleh	: $130,8^{\circ}C$ (1 atm, $25^{\circ}C$)
Temperature kritis	: 791 K
Tekanan kritis	: 46,58 atm
<i>Specific Gravity</i>	: 1,527
<i>Solubility in water</i> ($100^{\circ}C$)	: 20% (%berat)

- Sifat Kimia

1. Sintesis Senyawa *Anthraquinone*

Anthraquinone merupakan senyawa aromatik penting yang secara industri dapat disintesis melalui reaksi kondensasi antara *Phthalic Anhydride* dan benzena. Dalam

reaksi ini, *Phthalic Anhydride* berfungsi sebagai akseptor gugus asil, sedangkan benzena bertindak sebagai senyawa aromatik donor elektron. Proses ini umumnya memerlukan keberadaan katalis asam Lewis serta suhu tinggi untuk memfasilitasi pembentukan struktur tiga cincin aromatik khas pada molekul anthraquinone. Produk ini banyak digunakan dalam industri zat warna (*colour*) serta sebagai prekursor dalam pembuatan bahan kimia lainnya.

2. Pembentukan Senyawa *Metal Phthalocyanine*

Ketika *Phthalic Anhydride* direaksikan dengan urea dan senyawa logam berupa logam diasetat (*metal diacetate*), maka akan terbentuk senyawa kompleks logam yang dikenal sebagai *metal phthalocyanine*. Senyawa ini memiliki struktur makrosiklik planar yang menyerupai porfirin dan banyak diaplikasikan sebagai pewarna, katalis, dan bahan aktif dalam sensor kimia. Proses pembentukannya melibatkan reaksi siklisasi dan kondensasi yang menghasilkan inti *phthalocyanine* dengan ion logam terkoordinasi di pusat struktur.

3. Reaktivitas Gugus Karboksil pada *Phthalic Anhydride*

Phthalic Anhydride memiliki dua gugus karboksil dalam bentuk anhidrida yang sangat reaktif terhadap senyawa bersifat nukleofilik, salah satunya adalah amonia. Ketika senyawa ini bereaksi dengan amonia (NH_3), dapat terbentuk produk berupa monoamida atau *phthalimide* tergantung pada rasio molar reaktan dan kondisi reaksi. Jika reaksi berlangsung lebih lanjut, terutama dalam kondisi dehidrasi, maka produk yang dihasilkan dapat berupa *phthalonitrile*—senyawa penting dalam sintesis bahan kimia maju, termasuk polimer konduktif dan senyawa fungsional lainnya.

(Kirk-Othmer, 1989)

b. Benzoic Acid

- Sifat Fisika

Rumus Molekul : $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$

Berat Molekul : 122,123

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

1. Produksi Kaprolaktam melalui Hidrogenasi Asam Benzoat

Asam benzoat dapat mengalami reaksi hidrogenasi dengan bantuan katalis logam nikel untuk mereduksi gugus karboksilat menjadi senyawa antara yang lebih reaktif. Senyawa hasil hidrogenasi ini kemudian direaksikan dengan natrium hidrogen sulfat (NaHSO₄), yang berperan dalam proses siklisasi dan amidasi, sehingga menghasilkan kaprolaktam. Kaprolaktam merupakan senyawa penting dalam industri polimer, khususnya sebagai monomer utama dalam produksi nilon-6.

2. Oksidasi Asam Benzoat menjadi Fenol dengan Katalis Tembaga

Melalui proses oksidasi termokatalitik, asam benzoat dapat diubah menjadi fenol dengan menggunakan katalis berbasis tembaga (Cu atau CuO). Dalam reaksi ini, atom karbon pada gugus karboksilat mengalami dekarboksilasi, sementara gugus fenil tetap bertahan dan bertransformasi menjadi fenol sebagai produk utama. Fenol sendiri banyak digunakan sebagai bahan dasar dalam pembuatan resin fenolik, plastik, serta zat antiseptik.

3. Sintesis Asam Tereftalat dari Garam Kalium Asam Benzoat

Bila garam kalium dari asam benzoat (*potassium benzoate*) dipanaskan dalam atmosfer karbon dioksida (CO_2) dan di bawah tekanan tinggi, maka reaksi karboksilasi akan terjadi. Proses ini akan menambahkan gugus karboksil tambahan pada cincin aromatik, menghasilkan senyawa asam tereftalat. Asam tereftalat merupakan senyawa penting dalam industri petrokimia, terutama sebagai bahan baku utama dalam produksi poliester seperti *polyethylene terephthalate* (PET), yang banyak digunakan dalam pembuatan botol plastik dan serat sintetis.

(Kirk-Othmer, 1989)

2.2 Konsep Proses

2.2.1 Dasar Proses

Produksi *Phthalic Anhydride* melalui metode *Von Heyden* melibatkan reaksi antara bahan baku *Ortho-xylene* dan oksigen yang diperoleh dari udara, dengan bantuan katalis Vanadium Pentaoksida (V_2O_5). Reaksi ini merupakan proses oksidasi yang bersifat sangat eksotermis, artinya terjadi pelepasan panas yang signifikan selama berlangsungnya reaksi. Dalam konteks reaksi oksidasi, terdapat proses perpindahan elektron dari atom atau molekul yang terlibat, sehingga bilangan oksidasi suatu unsur meningkat dan menyebabkan perubahan muatan menjadi lebih positif. Proses ini terjadi dalam fase gas dan dijalankan di dalam reaktor *multitube* dengan tempat tidur tetap (*fixed-bed multitube reactor*) pada rentang suhu antara 330°C hingga 360°C dan tekanan operasi antara 1 hingga 2 atm (Chen et al., 1993).

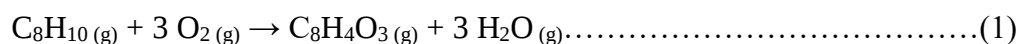
Katalis yang dipakai dalam reaksi ini adalah Vanadium Pentaoksida (V_2O_5), yang biasanya ditemukan dalam bentuk mineral dan digunakan secara luas dalam pembuatan paduan logam, dengan tingkat kemurnian mencapai 99,5%. Di dalam reaktor, katalis ini berbentuk silinder berongga (*hollow cylindrical*) yang disusun di dalam tabung-tabung reaktor untuk meningkatkan selektivitas terhadap pembentukan *Phthalic Anhydride*. Reaksi dijalankan pada suhu sekitar 360°C dan tekanan 2 atm, dengan efisiensi konversi mencapai 99,8% serta tingkat selektivitas terhadap produk utama sebesar 78%.

Pemilihan kondisi tersebut dilakukan berdasarkan pertimbangan teknis, karena masih berada dalam batas operasi yang diperbolehkan. Apabila suhu yang digunakan

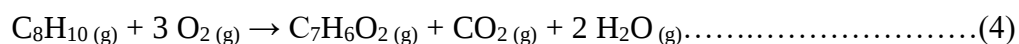
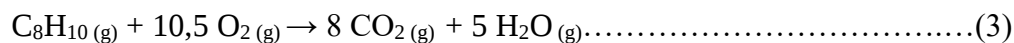
lebih rendah dari 300°C, laju reaksi akan menurun drastis, sedangkan jika suhu terlalu tinggi, maka akan terjadi pembentukan produk samping yang tidak diinginkan seperti karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O), yang pada akhirnya menurunkan konversi *Ortho-xylene* menjadi *Phthalic Anhydride* (Papagerogiuu, 1996). Karena reaksi sangat eksotermis, maka diperlukan sistem pendingin yang memadai selama proses berlangsung untuk menjaga kestabilan suhu dalam reaktor dan menghindari gangguan pada reaksi utama.

Secara umum, reaksi utama yang terjadi dalam produksi *Phthalic Anhydride* adalah reaksi oksidasi langsung dengan oksigen sebagai agen pengoksidasi. Selama proses ini, juga dihasilkan beberapa produk samping seperti *Maleic Anhydride*, *Benzoic Acid*, karbon dioksida, dan uap air.

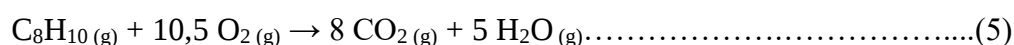
Reaksi Utama yang terjadi:



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

Reaksi ke-	Produk	Selektivitas (% mol)
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 yang mendasari pembentukan *Phthalic Anhydride* merupakan reaksi oksidasi. Secara umum, tahapan reaksi oksidasi hidrokarbon berlangsung melalui beberapa tahap sebagai berikut:

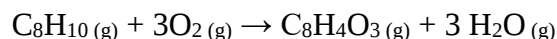


Keterangan:

1. Pada tahap awal, molekul oksigen yang memiliki elektronegativitas tinggi akan menarik elektron dari gugus alkil hidrokarbon, khususnya atom karbon, sehingga terbentuk radikal bebas hasil oksidasi ($ROO^{\cdot}$).
2. Radikal tersebut kemudian bereaksi lebih lanjut dengan molekul hidrokarbon lainnya (RH) membentuk hidroperoksida ($ROOH$), yang berperan sebagai senyawa antara (*intermediate*) dalam reaksi.
3. Selanjutnya, senyawa antara tersebut mengalami dekomposisi menjadi radikal alkoksi ($RO^{\cdot}$) dan radikal hidroksil ($\cdot OH$), yang akan melanjutkan reaksi pembentukan produk akhir berupa senyawa karboksilat, dan dalam konteks ini, menghasilkan *Phthalic Anhydride* sebagai senyawa utama.

(Mcketta, 2019)

Dalam reaksi pembentukan *Phthalic Anhydride*, reaksi utama yang terjadi adalah oksidasi *Ortho-xylene*, yang secara stoikiometri dapat dituliskan sebagai berikut:



Tahapan awal reaksi dimulai ketika molekul oksigen menyerang gugus metil (-CH₃) dari senyawa *Ortho-xylene*. Hal ini terjadi karena oksigen memiliki elektronegativitas yang lebih tinggi dibandingkan karbon dalam gugus tersebut. Serangan ini menghasilkan senyawa antara berupa asam karboksilat dalam fase gas. Senyawa perantara ini selanjutnya mengalami transformasi menjadi *Phthalic Anhydride* dan uap air sebagai produk utama.

Reaksi oksidasi ini tergolong sebagai reaksi heterogen, karena melibatkan dua fase berbeda—fase gas sebagai reaktan dan fase padat berupa katalis. Reaksi heterogen ini melibatkan berbagai tahap penting, meliputi difusi, adsorpsi, reaksi pada permukaan katalis, dan desorpsi. Berikut adalah uraian rinci mengenai tahapan dalam reaksi heterogen gas-pada:

a. Difusi Reaktan ke Permukaan Katalis (antar muka gas-padat)

Pada tahap ini, molekul reaktan dari fase gas bergerak menuju permukaan luar partikel katalis, melalui lapisan film gas tipis. Kecepatan difusi dipengaruhi oleh karakteristik aliran fluida, ukuran partikel, serta difusivitas molekuler. Meningkatnya suhu dan berkurangnya tekanan akan meningkatkan koefisien perpindahan massa, sehingga mempercepat proses difusi. Namun, dalam reaksi pembentukan *Phthalic Anhydride*, tahapan ini tidak menjadi langkah penentu laju reaksi karena resistansi difusi dianggap sangat kecil. Oleh karena itu, tekanan parsial reaktan di permukaan katalis setara dengan tekanan parsial dalam fase gas.

b. Difusi ke dalam pori katalis

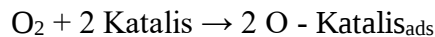
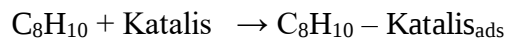
Setelah mencapai permukaan katalis, reaktan perlu menembus pori-pori katalis untuk mencapai situs aktif. Hal ini hanya dapat terjadi bila katalis memiliki ukuran pori yang besar dan luas permukaan yang tinggi. Katalis Vanadium Pentaoksida (V₂O₅) memiliki luas permukaan sekitar 80 m²/gram, menjadikannya efektif dalam reaksi ini. Pada tahap ini, difusivitas dalam pori (bukan difusivitas molekul gas) menjadi faktor utama yang mempengaruhi laju reaksi.

c. Adsorpsi reaktan pada permukaan katalis

Reaktan yang telah mencapai permukaan aktif akan melekat pada dinding pori katalis. Proses adsorpsi ini bersifat reversibel dan umumnya cepat mencapai kesetimbangan. Namun, jumlah molekul yang teradsorpsi dapat menurun pada suhu yang tinggi.

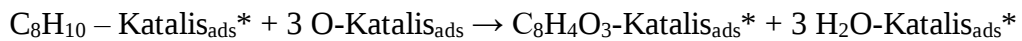
d. Aktivasi molekul teradsorpsi

Pada tahapan ini, reaktan yang telah menempel pada permukaan katalis memerlukan energi untuk diaktifkan. Dengan adanya katalis, energi aktivasi menjadi lebih rendah dibandingkan reaksi tanpa katalis. Contoh aktivasi adalah sebagai berikut:



e. Reaksi permukaan

Reaktan yang telah teradsorpsi dan diaktifkan kemudian bereaksi pada permukaan katalis menghasilkan produk. Proses ini merupakan tahapan paling menentukan terhadap laju reaksi keseluruhan.



f. Desorpsi produk dari pori katalis

Setelah reaksi selesai, produk yang terbentuk dalam pori katalis akan bergerak keluar menuju permukaan luar. Tahapan ini merupakan kebalikan dari difusi internal reaktan..

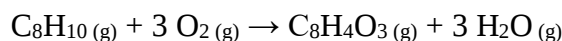
g. Difusi produk dari permukaan katalis ke fase gas

Produk yang telah mencapai permukaan luar katalis akan terdifusi kembali ke fase gas melewati lapisan film. Sama seperti difusi awal, tahanan pada tahap ini umumnya sangat kecil sehingga tidak mempengaruhi kecepatan reaksi secara signifikan.

(Smith, 2016)

2.2.3 Tinjauan Termodinamika

Analisis termodinamika dilakukan untuk mengidentifikasi sifat reaksi apakah bersifat menyerap panas (endotermis) atau melepaskan panas (eksotermis). Selain itu, kajian ini juga bertujuan untuk menentukan kecenderungan arah reaksi, apakah berlangsung satu arah (irreversibel) atau dua arah (reversibel). Adapun reaksi yang dianalisis dalam konteks ini adalah sebagai berikut:



Data entalpi reaksi standar pada 298,15 K dapat dilihat pada Tabel 2.6 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 seperti pada Tabel 2.7 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 ₈ H ₁₀	0,182	0,51344	-0,00020212	-2,1615x10 ⁻⁸	2,3212x10 ⁻¹¹
O ₂	29,526	-0,0088999	3,8083x10 ⁻⁵	-3,2629x10 ⁻⁸	8,8607x10 ⁻¹²
C ₈ H ₄ O ₃	40,083	0,036084	0,00095956	-1,2341x10 ⁻⁶	4,6597x10 ⁻¹⁰
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)

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

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

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

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

$$= (53883,14 \text{ J/mol} + (3 \times 11646,79 \text{ J/mol}))$$

$$= 88823,52 \text{ J/mol atau } 88,82352 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H = (\Delta H \text{ C}_8\text{H}_{10} + (3 \times \Delta H \text{ O}_2))$$

$$= (57316,70 \text{ J/mol} + (3 \times 9353,28 \text{ J/mol}))$$

$$= 95429,30 \text{ J/mol atau } 95,42930 \text{ kJ/mol}$$

Sehingga didapatkan ΔH reaksi pada suhu 360⁰C (633,15 K) adalah, sebagai berikut:

$$\Delta H \text{ reaksi} = \Delta H_{298} + (\Delta H \text{ produk} - \Delta H \text{ reaktan})$$

$$= -1137,53 \text{ kJ/mol} + (88,82352 \text{ kJ/mol} - 95,42930 \text{ kJ/mol})$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = -1144,14 \text{ kJ/mol}$$

Dari perhitungan di atas, panas reaksi bernilai negatif sehingga dapat disimpulkan bahwa reaksi pembentukan *Phthalic Anhydride* pada suhu 360°C (633,15 K) merupakan reaksi eksotermis. Data ΔG^0_f masing-masing komponen pada suhu 298,15 K menurut (Yaws, 1999) dapat dilihat pada tabel 2.8 berikut:

Tabel 2.8 Data Reaksi Bebas Gibbs Setiap Komponen

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

Reaksi Utama:

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

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

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

$$\begin{aligned}
 K_{298,15} &= \exp^{(0,458641778)} \\
 &= 1,581923992
 \end{aligned}$$

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 Kesetimbangan (K) lebih dari satu, maka reaksi berlangsung secara *irreversible* ke arah produk.

Reaksi dikatakan berlangsung secara tidak balik (*irreversible*) apabila nilai konstanta kesetimbangan (K) lebih besar dari satu. Hal ini menunjukkan bahwa pembentukan produk lebih dominan dibandingkan dengan pembentukan kembali reaktan. Suatu reaksi kimia dapat ditentukan apakah bersifat searah atau bolak-balik (*reversible*) melalui analisis terhadap besar kecilnya nilai konstanta kesetimbangan. Nilai K sendiri merupakan rasio antara laju reaksi ke arah pembentukan produk dengan laju reaksi ke arah sebaliknya. Apabila nilai K sangat besar, hal ini menunjukkan bahwa kecepatan reaksi balik sangat kecil (mendekati nol), sehingga reaksi dapat dianggap berlangsung hanya ke arah produk. Sebaliknya, jika nilai K lebih kecil dari satu, maka reaksi cenderung berlangsung dua arah atau reversibel (Smith, 2016).

2.2.4 Tinjauan Kinetika

Phthalic Anhydride diperoleh melalui reaksi oksidasi katalitik dalam fase gas menggunakan *Ortho-xylene* sebagai bahan baku. Reaksi ini mengikuti kinetika reaksi orde satu, dengan konstanta laju reaksi (k) yang ditentukan berdasarkan Persamaan Arrhenius. Secara umum, laju reaksi akan meningkat seiring dengan kenaikan suhu, sebagaimana dijelaskan dalam formulasi Arrhenius berikut:

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

Keterangan:

K = Konstanta kecepatan reaksi

A = Frekuensi tumbukan

Ea = Energi aktivasi

R = Konstanta gas

T = Suhu

Dalam buku *Chemical Reactor for Process Plant, 2nd vol: Case Studies and Design Data, Case Study number 110*, karangan Howard F. Rase khususnya pada studi kasus nomor 110, dijelaskan bahwa laju reaksi untuk pembentukan *Phthalic Anhydride* dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut:

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

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

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

Keterangan:

ri = Laju Reaksi (kmol/kgcat.jam)

ki = Konstanta kecepatan reaksi

Pi = Tekanan parsial komponen (atm)

T = Suhu (K)

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

(Couper et al., 2012)

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

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

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

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

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

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

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

Dari perhitungan dapat disimpulkan bahwa reaksi oksidasi *Ortho-xylene* untuk membentuk *Phthalic Anhydride* memiliki laju reaksi yang sangat tinggi. Hal ini ditunjukkan oleh besarnya nilai konstanta kecepatan reaksi (k), yang mencerminkan bahwa reaksi berlangsung secara cepat dan efisien dalam kondisi operasi yang telah ditentukan.

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 : *irreversible*

Sifat reaksi : Eksotermis

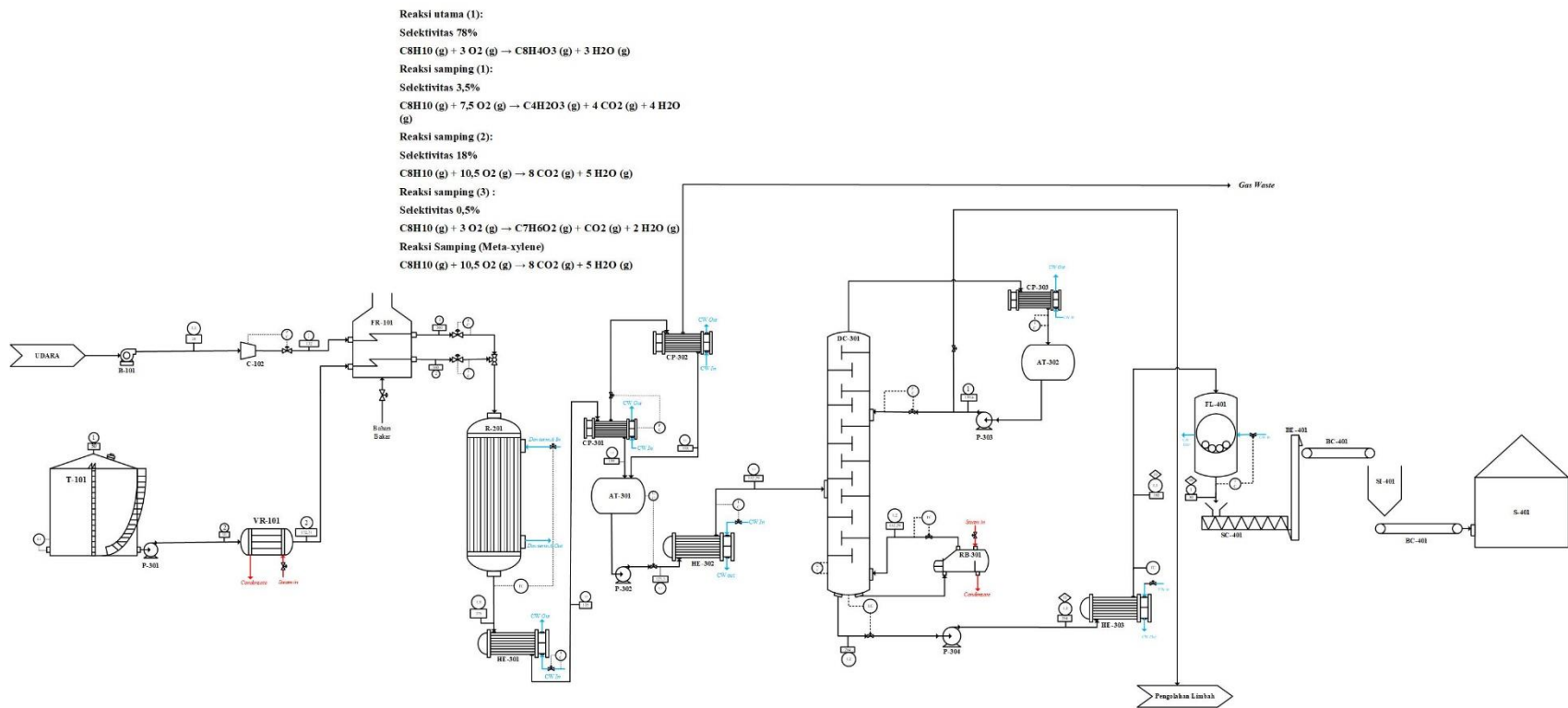
Tekanan : 2 atm

Fase : Gas

Jenis reaktor : *Fixed Bed Multitube*

(Chen et al., 1993)

PRA-RANCANGAN PABRIK PHTHALIC ANHYDRIDE DARI O-XYLENE
MENGUNAKAN PROSES VON HYDEN DENGAN KATALIS V2O5
KAPASITAS PRODUKSI 43.000 TON/TAHUN



Gambar 2. 1 Diagram Alir Proses Pembuatan *Phthalic Anhydride*

			PROGRAM STUDI S.T. TEKNOLOGI REKAYASA KIMIA INDUSTRI DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI SEKOLAH VOKASI UNIVERSITAS DIPONEGORO SEMARANG 2025		
DIAGRAM ALIR PRA RANCANGAN PABRIK <i>PHTHALIC ANHYDRIDE</i> DARI <i>O</i> -XILENE MENGGUNAKAN PROSES <i>VON HYDEN</i> DENGAN KATALIS <i>V2O5</i> KAPASITAS PRODUKSI 43.000 TON/TAHUN					
Dikembangkan Oleh		Amel Dinda Pratiwi Belinda Ashara		NIM 40040121600003 NIM 40040121600009	
Dosen Pembimbing		Anggun Puji Karti Simanungkal S.T., Ph.D.			
KETERANGAN: T-101 : Tangki Ortho-Xylene B-101 : Boiler C-102 : Kompresor FR-101 : Furnace R-201 : Reaktor CP-301 : Kondensor Partial 1 CP-302 : Kondensor Partial 2 CP-303 : Kondensor Partial 3 HE-101 : Heat Exchanger 1 HE-302 : Heat Exchanger 2 HE-303 : Heat Exchanger 3 VR-101 : Separator P-301 : Pompa 1 P-302 : Pompa 2 P-303 : Pompa 3 P-304 : Pompa 4 DC-301 : Kolom Distilasi R-B-301 : Refraktor AT-301 : Tangki Akumulator 1 AT-302 : Tangki Akumulator 2 S-401 : Silo S-402 : Silo Semutara SC-401 : Screen Conveyor FL-401 : Filter BC-401 : Belt Conveyor BE-401 : Bucket Elevator  : Tekanan (kg/cm ²)  : Temperatur (°C)  : Aliran Cairan  : Aliran Gas					

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 Gambar 2.1.

2.3.2 Langkah Proses

Produksi *Phthalic Anhydride* secara komersial umumnya dilakukan melalui proses oksidasi fase gas bertekanan rendah, dikenal sebagai proses *Von Heyden*. Dalam proses ini, orto-xilena (*o-xylene*) atau naftalena dioksidasi menggunakan katalis berbasis vanadium pentaoksida (V_2O_5) dan titanium dioksida (TiO_2) dalam reaktor unggun tetap (*fixed-bed reactor*).

Proses produksi ini terdiri dari beberapa tahapan utama:

1. Persiapan Bahan Baku

a. Orto-Xilena (*O-Xylene*)

Orto-xilena disimpan dalam tangki pada suhu sekitar 30°C dan tekanan atmosferik. Selanjutnya, dipompa menggunakan pompa sentrifugal untuk meningkatkan tekanannya menjadi sekitar 2 atm. Bahan baku kemudian diuapkan dalam *vaporizer* dan dipanaskan hingga mencapai suhu operasi reaktor, yaitu sekitar 360°C. Untuk mencapai parameter operasi yang sesuai dengan kondisi dalam reaktor, diperlukan serangkaian tahap persiapan. Pada tahap awal, bahan baku berupa *Ortho-xylene* disimpan terlebih dahulu di dalam tangki penyimpanan (T-101) pada tekanan atmosferik (1 atm) dan suhu sekitar 30°C. Selanjutnya, bahan tersebut dipindahkan ke unit penguap (*vaporizer*/VP-101) dengan menggunakan pompa sentrifugal. Pompa ini tidak hanya berfungsi sebagai alat pemindah fluida, tetapi juga berperan dalam meningkatkan tekanan *Ortho-xylene* hingga mencapai 2 atm. Di dalam *vaporizer*, *Ortho-xylene* yang semula dalam fase cair akan diuapkan menjadi fase gas serta dipanaskan hingga suhu 172,89°C. Setelah proses ini, aliran gas diarahkan menuju tungku pemanas (*furnace*/FR-101) untuk meningkatkan suhu lebih lanjut hingga mencapai 360°C, yaitu suhu yang sesuai dengan kebutuhan reaksi dalam reaktor. Setelah tahap pemanasan ini selesai, *Ortho-xylene* telah berada dalam kondisi optimal untuk dimasukkan ke reaktor (R-201) guna menjalani proses reaksi utama.

b. Udara

Tidak seperti tahap prapengolahan *Ortho-xylene*, penyesuaian udara sebagai bahan baku hanya memerlukan pengaturan terhadap tekanan dan suhu untuk memenuhi kondisi operasional reaktor. Udara diambil dari lingkungan sekitar dalam keadaan normal menggunakan *blower* B-101 yang dilengkapi dengan filter F-101 guna menyaring partikel kotoran. *Blower* ini juga berperan dalam menaikkan tekanan udara hingga mencapai 1,1 atm serta secara bersamaan menaikkan suhu udara hingga 36°C. Setelah itu, udara yang telah tersaring dan bertekanan sedang dimasukkan ke dalam kompresor (C-102) untuk meningkatkan tekanannya menjadi 2,4 atm dengan suhu akhir sekitar 110°C. Setelah tahap ini selesai, udara dialirkan menuju *furnace* (FR-101) guna dipanaskan hingga mencapai suhu 360°C, sesuai dengan suhu yang dibutuhkan untuk reaksi di dalam reaktor.

2. Tahap Oksidasi (Reaksi Utama)

Campuran gas hasil pemanasan yang terdiri dari *Ortho-xylene* dan udara selanjutnya dialirkan ke dalam reaktor tipe *multitube* dengan sistem *fixed-bed* (R-201). Di dalam reaktor ini, kondisi proses dijaga secara ketat agar suhu produk keluaran tetap berada pada sekitar 375°C. Setiap tabung dalam reaktor berisi katalis vanadium pentaoksida (V_2O_5), yang berfungsi untuk menurunkan energi aktivasi serta mengarahkan jalannya reaksi agar menghasilkan produk utama yaitu *Phthalic Anhydride*. Karena reaksi ini sangat eksotermis, pengaturan suhu menjadi hal yang krusial dan dilakukan dengan memanfaatkan cairan pendingin *Dowterm A*, yang mengangkut panas keluar dari sistem pada suhu sekitar 175°C. Produk gas yang keluar dari reaktor memiliki suhu 375°C dan tekanan 1,9 atm. Sebelum memasuki tahap kondensasi, suhu produk ini terlebih dahulu diturunkan menggunakan alat penukar panas (HE-301) dengan bantuan air pendingin dari unit utilitas, hingga mencapai suhu sekitar 135°C. Proses ini dilakukan guna mengurangi beban kerja pada unit kondensor di tahap berikutnya.

3. Tahap Kondensasi

Produk gas dari reaktor didinginkan menggunakan *heat exchanger* untuk menurunkan suhu hingga sekitar 135°C. Selanjutnya, dialirkan ke kondenser parsial untuk memisahkan *Phthalic Anhydride* dari gas-gas lain seperti CO_2 , CO, N_2 , Ar, dan O_2 . Proses ini menghasilkan dua aliran: satu berupa *Phthalic Anhydride* cair yang dialirkan ke akumulator, dan satu lagi berupa gas yang mengandung sedikit *Phthalic Anhydride*, yang kemudian diproses lebih lanjut.

Tahapan kondensasi bertujuan untuk memisahkan senyawa utama, yaitu *Phthalic Anhydride*, dari gas-gas pengotor yang masih bercampur dalam fase gas seperti CO₂, CO, N₂, Ar, dan O₂ dalam kondisi tekanan atmosferik. Produk gas yang keluar dari reaktor R-201, dengan suhu sekitar 375°C dan tekanan 1,9 atm, terlebih dahulu mengalami proses pendinginan menggunakan penukar panas HE-301. Pada unit ini, suhu diturunkan hingga 135°C dengan bantuan air pendingin. Selain penurunan suhu, tekanan pada masing-masing penukar panas dikurangi sebesar 0,1 atm untuk mengurangi beban kerja kondenser parsial di tahap selanjutnya.

Setelah pendinginan awal, campuran gas yang mengandung *Phthalic Anhydride* dialirkan ke kondenser parsial pertama (CP-301). Di dalam kondenser ini, senyawa *Phthalic Anhydride* akan berubah menjadi bentuk cair dan terpisah dari gas-gas lain seperti CO, CO₂, N₂, Ar, O₂, dan sebagian uap air. Pemisahan ini terjadi karena adanya perbedaan titik didih antara komponen-komponen tersebut, membentuk kesetimbangan baru dalam sistem. Produk keluar dari CP-301 memiliki dua aliran: aliran atas berupa campuran gas yang tidak dapat dikondensasikan namun masih mengandung sedikit *Phthalic Anhydride* dalam bentuk gas, dan aliran bawah berupa *Phthalic Anhydride* cair yang telah relatif murni. Aliran cair tersebut dikumpulkan dalam tangki akumulator T-301, sedangkan aliran gas diarahkan ke kondenser parsial kedua (CP-302).

Pada CP-302, sisa *Phthalic Anhydride* dalam bentuk gas dikondensasikan lebih lanjut untuk dipisahkan dari gas lainnya yang nantinya akan dibuang (*purging*) ke atmosfer. Kondisi operasi pada CP-302 dipertahankan pada suhu 108°C dan tekanan 1,3 atm agar *Phthalic Anhydride* tetap berada dalam fase cair. Untuk mencegah pengendapan atau pemadatan senyawa ini dalam kondenser, suhu dan tekanan dijaga secara ketat hingga tercapai keseimbangan yang memungkinkan terbentuknya *Crude Phthalic Anhydride* dalam bentuk cair. Produk cair dari dasar CP-302 kemudian dialirkan kembali menuju tangki akumulator AT-301.

Di dalam tangki (AT-301), *Crude Phthalic Anhydride* disimpan sementara sebelum memasuki proses pemurnian melalui distilasi. Senyawa tersebut dipompa menggunakan pompa P-301 pada tekanan 1,1 atm dan suhu 121,3°C menuju kolom distilasi (DC-301). Sebelum memasuki kolom, aliran dipanaskan terlebih dahulu menggunakan penukar panas (HE-302) hingga mencapai suhu operasi 152°C dengan tekanan tetap sebesar 1,1 atm.

4. Tahap Pemurnian (Distilasi)

Phthalic Anhydride cair dari akumulator dipompa ke kolom distilasi untuk memisahkan impuritas seperti *Maleic Anhydride*, *Benzoic Acid*, dan air. Proses distilasi dilakukan pada tekanan sekitar 1,1 atm dan suhu sekitar 152°C. Hasil atas kolom distilasi, yang sebagian besar berupa air, dikondensasikan dan sebagian digunakan sebagai refluks, sementara hasil bawah berupa *Phthalic Anhydride* dengan kemurnian tinggi.

Proses pemurnian dilakukan dengan metode distilasi, yang bertujuan untuk memisahkan komponen utama yaitu *Phthalic Anhydride* dari senyawa-senyawa pengotor seperti *Maleic Anhydride*, *Benzoic Acid*, dan air. Pada tahap kondensasi sebelumnya, ketiga senyawa tersebut masih bercampur dengan produk utama karena titik embunnya (*dew point*) relatif mendekati titik embun *Phthalic Anhydride*, sehingga tidak sepenuhnya dapat dipisahkan hanya melalui kondensasi biasa. Oleh karena itu, dilakukan tahap distilasi guna memperoleh produk dengan tingkat kemurnian tinggi.

Cairan *Crude Phthalic Anhydride* yang tersimpan di dalam tangki akumulator (AT-301) dialirkan menuju kolom distilasi (DC-301) menggunakan pompa (P-301). Sebelum masuk ke dalam kolom, aliran ini dipanaskan lebih dahulu oleh alat penukar panas (HE-302) hingga mencapai suhu sekitar 152,29°C dan tekanan 1,1 atm. Karena aliran berasal dari kondisi cair jenuh, maka dalam proses pemanasan ini sebagian kecil fluida dapat berubah menjadi uap, membentuk campuran dua fasa (cair dan gas) saat memasuki kolom distilasi.

Di dalam kolom distilasi, pemisahan berlangsung berdasarkan perbedaan volatilitas. Senyawa yang lebih mudah menguap seperti air, *Benzoic Acid*, dan *Maleic Anhydride* akan naik ke bagian atas kolom, sedangkan *Phthalic Anhydride* sebagai komponen utama tetap berada di bagian bawah. Produk atas yang mencapai suhu sekitar 143,5°C pada tekanan 1 atm sebagian besar terdiri dari air (sekitar 92,2% berat). Komponen ini kemudian didinginkan di kondensor (C-301) dan disalurkan ke tangki penampung (AT-302). Sebagian aliran digunakan kembali sebagai refluks, dan sisanya dibuang ke unit pengolahan limbah.

Sementara itu, hasil bawah dari kolom distilasi adalah *Phthalic Anhydride* dengan kemurnian tinggi sebesar 99,9%, meskipun masih mengandung sedikit *Maleic Anhydride* dan *Benzoic Acid*. Produk ini berada pada kondisi suhu sekitar 284,7°C dan tekanan 1,2 atm. Selanjutnya, cairan tersebut dialirkan menggunakan pompa P-303 ke alat penukar panas (HE-303) untuk menurunkan suhunya dari 284°C menjadi 180°C dengan menggunakan air pendingin. Setelah mencapai suhu tersebut, *Phthalic Anhydride* diarahkan ke unit *Flaker* (FL-

401) untuk diubah dari bentuk cair menjadi bentuk padat melalui proses pendinginan permukaan.

5. Tahap Pengemasan

Phthalic Anhydride murni didinginkan menggunakan *heat exchanger* hingga suhu sekitar 180°C, kemudian dialirkan ke unit *flaker* untuk diubah menjadi bentuk padat. Dalam unit *flaker*, *Phthalic Anhydride* cair didinginkan hingga memadat pada suhu sekitar 131°C. Produk padat kemudian dihancurkan menjadi ukuran seragam menggunakan *screw conveyor*, diangkut ke silo penyimpanan, dan akhirnya dikemas menggunakan bahan yang kedap udara untuk mencegah penyerapan kelembaban, mengingat sifat higroskopis *Phthalic Anhydride*.

Produk *Phthalic Anhydride* dengan tingkat kemurnian 99,9% yang diperoleh dari bagian bawah kolom distilasi (DC-301) selanjutnya dialirkan ke penukar panas (HE-303). Di unit ini, suhu cairan dikurangi dari 302°C menjadi 180°C menggunakan media pendingin. Setelah proses pendinginan tersebut, aliran diarahkan ke unit *Flaker* (FL-401) yang berfungsi untuk mengubah fase senyawa dari cair menjadi padat.

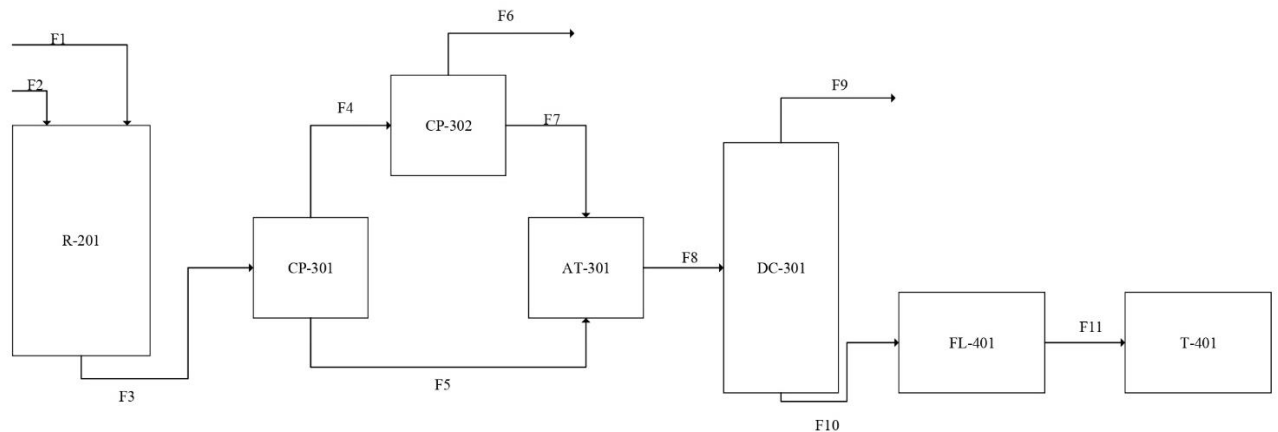
Unit *Flaker* bekerja dengan sistem drum berputar. Cairan *Phthalic Anhydride* akan menempel pada permukaan luar drum yang terus berputar. Selama proses rotasi berlangsung, permukaan drum didinginkan oleh aliran air pendingin yang mengalir di bagian dalam drum dengan suhu masuk sekitar 30°C. *Phthalic Anhydride* yang menempel akan mengalami proses pendinginan bertahap hingga memadat pada suhu sekitar 131°C, kemudian terus diturunkan suhunya hingga mencapai 30°C.

Setelah senyawa berubah menjadi padatan, produk ini dipindahkan menggunakan *Screw Conveyor* (SC-401). Penggunaan *Screw Conveyor* selain untuk transportasi juga berfungsi melakukan pengecilan ukuran (*size reduction*), sehingga butiran padatan yang dihasilkan memiliki ukuran yang seragam. Padatan tersebut kemudian dilanjutkan ke *Bucket Elevator* (BE-401), yang akan membawa produk menuju silo penyimpanan (SI-401). Setelah itu, produk dikemas dan disimpan di gudang penyimpanan (S-401).

Mengingat sifat higroskopis *Phthalic Anhydride*, yaitu mudah menyerap uap air dari udara, proses pengemasan harus menggunakan bahan yang tidak tembus udara, seperti kantong plastik atau drum plastik kedap udara, untuk menjaga kualitas produk selama penyimpanan.

2.4 Neraca Massa dan Neraca Panas

2.4.1 Neraca Massa



Keterangan Gambar:

R-201	: Reaktor	F8	: Arus Umpan Distilasi
CP-301	: <i>Condenser Partial</i>	F9	: Arus Distilat
CP-302	: <i>Condenser Partial</i>	F10	: Arus Residu
T-301	: <i>Accumulator Tank</i>	F11	: Arus Produk
DC-301	: Kolom Distilasi		
FL-401	: Flaker		
S-401	: Silo		
F1	: Arus Umpan <i>O-xylene</i> 98%		
F2	: Arus Umpan Udara		
F3	: Arus Keluaran Reaktor		
F4	: Arus Hasil Atas <i>Condenser Partial</i> 1		
F5	: Arus Hasil Bawah <i>Condenser Partial</i> 1		
F6	: Arus Hasil Atas <i>Condenser Partial</i> 2 (<i>Off-gas</i>)		
F7	: Arus Hasil Bawah <i>Condenser Partial</i> 2		

Berikut ini adalah rangkuman dari neraca massa pabrik *Phthalic Anhydride* dengan kapasitas 43.000 ton/tahun. Perhitungan lengkapnya terlampir pada lampiran.

Neraca Massa Sebelum *Scale Up*

1. Neraca Massa di sekitar Reaktor (R-201)

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

Komponen	Simbol	Input				Output	
		F1		F2		F3	
		Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam	
<i>Phthalic Anhydride</i>	PA	0,00	0,00	0,00	0,00	7,14	
<i>Maleic Anhydride</i>	MA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	
<i>Benzoic Acid</i>	BA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	
<i>Ortho Xylene</i>	OX	9,25	980,00	0,00	0,00	1,66	
<i>Meta Xylene</i>	MX	0,19	20,00	0,00	0,00	0,00	
Oksigen	O	0,00	0,00	163,91	5245,07	136,13	
Nitrogen	N	0,00	0,00	616,61	17265,02	616,61	
Karbondioksida	C	0,00	0,00	0,01	0,34	4,72	
Karbonmonoksida	Co	0,00	0,00	0,01	0,22	0,01	
Argon	A	0,00	0,00	7,79	311,58	7,79	
Water	W	0,00	0,00	0,00	0,00	24,48	
Total		9,43	1000,00	788,32	22822,24	798,62	
TOTAL MASSA		23822,24				23822,24	
INPUT = OUTPUT		0,00					

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

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

Komponen	Simbol	Input		Output		
		F3		F4		F5
		Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam
<i>Phthalic Anhydride</i>	PA	7,14	1056,60	0,08	11,35	7,06
<i>Maleic Anhydride</i>	MA	0,07	7,15	0,01	0,66	0,07
<i>Benzoic Acid</i>	BA	0,01	1,01	0,00	0,01	0,01
<i>Ortho Xylene</i>	OX	1,66	176,23	0,63	66,44	1,04
Oksigen	O	136,13	4356,26	136,13	4356,26	0,00
Nitrogen	N	616,61	17265,02	616,61	17265,02	0,00
Karbon dioksida	C	4,72	207,50	4,72	207,50	0,00
Karbonmonoksida	Co	0,01	0,22	0,01	0,22	0,00
Argon	A	7,79	311,58	7,79	311,58	0,00
<i>Water</i>	W	24,48	440,66	17,32	311,71	7,16
Total		798,62	23822,24	783,28	22530,77	15,34
TOTAL MASSA		23822,24		23822,24		
INPUT = OUTPUT		0,00				

3. Neraca Massa di sekitar *Condenser Partial 2* (CP-302)

Tabel 2. 11 Neraca Massa di sekitar *Condenser Partial 2* (CP-302)

Komponen	Simbol	Input		Output		
		F4		F6		F7
		Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam
<i>Phthalic Anhydride</i>	PA	0,08	11,35	0,00	0,00	0,08
<i>Maleic Anhydride</i>	MA	0,01	0,66	0,00	0,00	0,01
<i>Benzoic Acid</i>	BA	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
<i>Ortho Xylene</i>	OX	0,63	66,44	0,00	0,15	0,63

Komponen	Simbol	Input		Output		
		F4		F6		F7
		Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam
Oksigen	O	136,13	4356,26	136,13	4356,26	0,00
Nitrogen	N	616,61	17265,02	616,61	17265,02	0,00
Karbondioksida	C	4,72	207,50	4,72	207,50	0,00
Karbonmonoksida	Co	0,01	0,22	0,01	0,22	0,00
Argon	A	7,79	311,58	7,79	311,58	0,00
Water	W	17,32	311,71	0,15	2,72	17,17
Total		783,28	22530,77	765,41	22143,46	17,88
TOTAL MASSA		22530,77		22530,77		
INPUT = OUTPUT		0,00				

4. Neraca Massa di sekitar *Accumulator Tank* (AT-301)

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

Komponen	Input		Output			
	F5		F7		F8	
	Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam	Kg/jam
PA	7.06	1045.25	0.08	11.35	7.14	1056.60
MA	0.07	6.49	0.01	0.66	0.07	7.15
BA	0.01	1.00	0.00	0.01	0.01	1.01
OX	1.04	109.78	0.63	66.29	1.66	176.08
O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Co	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	7.16	128.95	17.17	308.99	24.33	437.94
Total		1291.47		387.31		1678.78

Komponen	Input		Output			
	F5		F7		F8	
	Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam	Kg/jam
TOTAL MASSA	1678.78		1678.78			
INPUT = OUTPUT	0.00					

5. Neraca Massa di sekitar Menara Distilasi (DC-301)

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

Komponen	Input		Output			
	F8		F9		F10	
	Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam	Kg/jam	Kmol/jam	Kg/jam
PA	7.14	1056.60	0.01	1.32	2.43	359.55
MA	0.07	7.15	0.04	3.51	0.00	0.18
BA	0.01	1.01	0.00	0.24	0.00	0.18
OX	1.66	176.08	0.79	83.97	0.00	0.00
W	24.33	437.94	68.32	1229.83	0.00	0.00
Total		1678.78		1318.86		359.91
TOTAL MASSA	1678.78		1678.78			
INPUT = OUTPUT	0.00					

6. Neraca Massa Setelah *Scale Up*

Tabel 2. 14 Neraca Massa Setelah *Scale Up*

Komponen	simbol	INPUT					OUTPUT			OUTPUT		
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
		kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam
<i>Phthalic Anhydride</i>	PA	-	-	15.938,80	171,25	15.767,55	0,01	171,24	15.938,80	19,90	5.423,86	5.423,86
<i>Maleic anhydride</i>	MA	-	-	107,88	9,91	97,97	0,00	9,91	107,88	52,93	2,71	2,71
<i>Benzoic acid</i>	BA	-	-	15,22	0,18	15,04	0,00	0,18	15,22	3,59	2,71	2,71
<i>Ortho xylene</i>	OX	14.783,25	-	2.658,40	1.002,32	1.656,08	2,28	1.000,04	2.656,12	1.266,62	-	-
<i>Meta-xylene</i>	MX	301,70	-	-0,03	-	-	-	-	-	-0,03	-	-
Oksigen	O	-	79.121,64	65.714,02	65.714,02	-	65.714,02	-	-	-	-	-
Nitrogen	N	-	260.442,07	260.442,07	260.442,07	-	260.442,07	-	-	-	-	-

		INPUT						OUTPUT					OUTPUT	
Komponen	simbol	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11		
		kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	kg/jam	
Karbondioksida	C	-	5,18	3.130,16	3.130,16	-	3.130,16	-	-	-	-	-		
Karbonmonoksida	Co	-	3,30	3,30	3,30	-	3,30	-	-	-	-	-		
Argon	A	-	4.700,20	4.700,20	4.700,20	-	4.700,20	-	-	-	-	-		
Water	W	-	-	6.647,32	4.702,16	1.945,16	41,03	4.661,13	6.606,29	18.551,97	-	-		
		15.084,95	344.272,39	359.357,34	339.875,57	19.481,80	334.033,07	5.842,50	25.324,30	19.894,98	5.429,29	5.429,29		
TOTAL MASSA		<u>359.357,34</u>			<u>359.357,34</u>									
INPUT = OUTPUT		-												

7. Neraca Massa Overall

Tabel 2. 15 Neraca Massa Overall

Komponen	simbol	INPUT						OUTPUT				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam
<i>Phthalic Anhydride</i>	PA	0,00	0,00	107,69	1,16	106,54	0,00	1,16	107,69	0,13	36,65	87,78
<i>maleic anhydride</i>	MA	0,00	0,00	1,10	0,10	1,00	0,00	0,10	1,10	0,54	0,03	0,07
<i>benzoic acid</i>	BA	0,00	0,00	0,12	0,00	0,12	0,00	0,00	0,12	0,03	0,02	0,05
<i>ortho xylene</i>	OX	139,46	0,00	25,08	9,46	15,62	0,02	9,43	25,06	11,95	0,00	0,00
<i>meta xylene</i>	MX	2,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
oksigen	O	0,00	2472,55	2053,56	2053,56	0,00	2053,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
nitrogen	N	0,00	9301,50	9301,50	9301,50	0,00	9301,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
karbondioksida	C	0,00	0,12	71,14	71,14	0,00	71,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Komponen	simbol	INPUT					OUTP UT		OUTPUT			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam	kmol/jam
karbonmonoksida	Co	0,00	0,12	0,12	0,12	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
argon	A	0,00	117,51	117,51	117,51	0,00	117,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
water	W	0,00	0,00	369,30	261,23	108,06	2,28	258,95	367,02	1030,67	0,00	0,00
		142,31	11891,79	12047,12	11815,78	231,35	11546,13	269,65	500,99	1043,32	36,70	87,90

Perhitungan Efisiensi Kapasitas Produksi Pada Neraca Massa

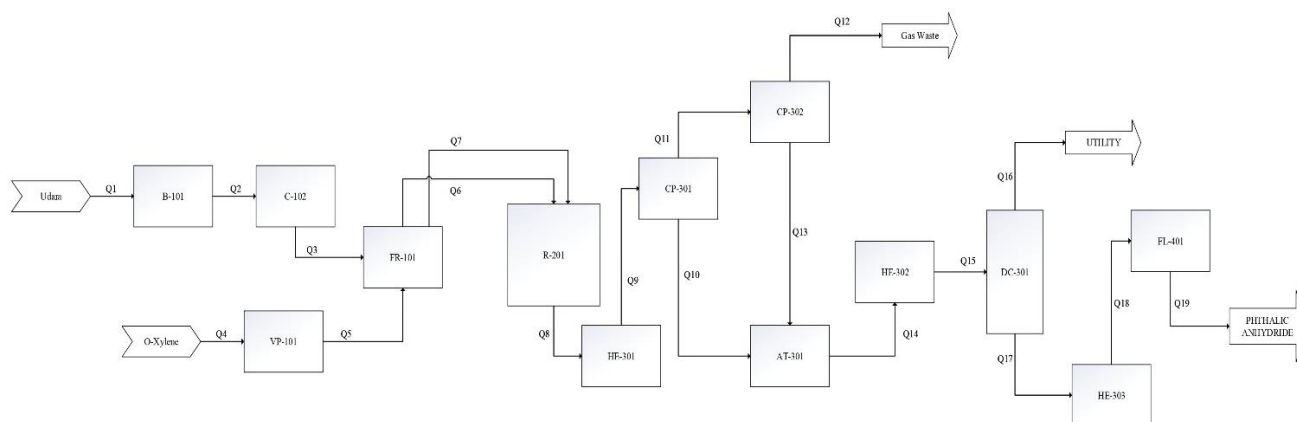
$$\% \text{Efisiensi} = \frac{\text{Produk}}{\text{Feed}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Efisiensi} = 95\%$$

Didapatkan perolehan %Yield sebagai berikut :

$$\% \text{ Yield} = 3$$

2.4.2 Neraca Panas



Berikut ini adalah ringkasan dari neraca panas pabrik *Phthalic Anhydride* dengan kapasitas 43.000 ton/tahun. Untuk perhitungan lengkapnya dilampirkan pada lampiran.

1. Neraca Panas di sekitar *Blower* (B101)

Tabel 2. 16 Neraca Panas di sekitar *Blower* (B101)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q1	3613327,88	-
Q2	-	4552282,17
Q akibat kenaikan tekanan	938954,29	-
Total	4552282,17	4552282,17

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

Tabel 2. 17 Neraca Panas di Sekitar Kompresor (C-101)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q2	4552282,17	-
Q3	-	34763169,00
Q akibat kenaikan tekanan	30210886,84	-
Total	34763169,00	34763169,00

3. Necara Panas di Sekitar *Vaporizer* (VP-101)

Tabel 2. 18 Necara Panas di Sekitar *Vaporizer* (VP-101)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q4	134887,07	
Q5	-	4286693,94
Qpemanas	9139170,25	-
Qpenguapan		4987363,37
Total	9274057,32	9274057,32

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

Tabel 2. 19 Neraca Panas di Sekitar *Furnance* (FR-101)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q3	34763169,00	-
Q5	4286693,94	-
Q6	-	103975216,52
Q7	-	11498145,90
Q bahan bakar	84914999,42	-
Q loss	-	8491499,94
Total	123964862,37	123964862,37

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

Tabel 2. 20 Neraca Panas di Sekitar Reaktor (R-201)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
ΔHr	113147016,76	-
ΔH_{298}	261331426,96	-
ΔH_p	-	120394893,39
Qpendingin	-	254083550,32
Total	374478443,72	374478443,72

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

Tabel 2. 21 Neraca Panas di Sekitar *Cooler* (HE-301)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q8	120394893,39	-
Q9	-	38376257,08
Q pendingin	-	82018636,31
Total	120394893,39	120394893,39

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

Tabel 2. 22 Neraca Panas di Sekitar *Condensor Partial* (CP-301)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Qlaten	11432469,21	-
Qsensible	24018604,24	
Qpendingin	-	35451073,46
Total	35451073,46	35451073,46

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

Tabel 2. 23 Neraca Panas di Sekitar *Condensor Partial* (CP-302)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Qlaten	11287330,68	-
Qsensible	6915354,64	
Qpendingin	-	18202685,32
Total	18202685,32	18202685,32

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

Tabel 2. 24 Neraca Panas di Sekitar *Accumulator Tank* (AT-301)

Komponen	Qinput (kJ/jam)	Qoutput (kJ/jam)
Q11	4060747,78	
Q13	1184096,26	
Q14		5244844,04
Total	5244844,04	5244844,04

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

Tabel 2. 25 Neraca Panas di Sekitar *Heat exchanger* (HE-302)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q14	5244844,04	
Q15		7720833,27
Q Pemanas	2824700,82	
Q loss		348711,59
Total	8069544,86	8069544,86

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

Tabel 2. 26 Neraca Panas di Sekitar Menara Destilasi (DC-301)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Hf	7720833,27	-
Hw	-	2696606,57
Hd	-	33120,24
Qkondensor	-	43639292,15
Qreboiler	38648185,69	-
Total	46369018,96	46369018,96

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

Tabel 2. 27 Neraca Panas di Sekitar *Cooler* (HE-303)

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
Q17	2698835,77	-
Q18	-	1490643,35
Qpendingin	-	1208192,42
Total	2698835,77	2698835,77

13. Neraca Panas di Sekitar *Flaker*

Tabel 2. 28 Neraca Panas di Sekitar *Flaker*

Komponen	Q masuk (kJ/jam)	Q keluar (kJ/jam)
H1	508373,2628	-
H	858656,25	-
H2	1,08	-
H	402,19	-
H3	785,00	-
H4	-312,40	-
H	375,34	-
H5	-421,28	-
H6	526,31	-
Qpendingin	-	1368385,76
Total	1368385,76	1368385,76

14. Neraca Panas Overall

Tabel 2. 29 Neraca Panas Overall

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Blower		
O ₂	611231,04	
N ₂	2975142,11	
CO ₂	49,98	
CO	37,68	
Ar	26867,06	
Q ₂		4552282,17
Q _{naik}	938954,29	
Vaporizer		
Q _{laten}		4987363,37
C ₈ H ₁₀	134887,07	
Furnace		
Q _{bahan bakar}	84914999,42	
Q _{loss}		8491499,94
Reaktor		
C ₈ H ₄ O ₃		6143818,70
C ₄ H ₂ O ₃		56418,94
C ₇ H ₆ O ₂		6981,60
C ₈ H ₁₀	67058408,45	1708910,28
O ₂	11242692,31	9371601,70
N ₂	91911423,07	96113836,75
CO ₂	1702,21	1079200,74
CO	1174,80	1229,14
Ar	5869885,05	854861,03
H ₂ O		5058034,51

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Condensor 301		
Q _{laten}	11432469,21	
Q _{pendingin}		35451073,46
Condensor 302		
Q _{loss}		247369,30
Q _{pendingin}		18202685,32
Q ₁₃		1184096,26
Heat Exchanger		
Q _{pendingin}		83226828,73
Q _{loss}		348711,59
Destilasi Coulumn		
Q _d		33120,24
TOTAL	277119923,77	277119923,77

Didapatkan perolehan %*heat loss* dan efisiensi neraca panas sebagai berikut :

$$\% \text{ Heat Loss} = \frac{\text{Kehilangan Panas Overall}}{\text{Total Panas}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Heat Loss} = 3,29\%$$

$$\% \text{ Heat Loss} = 3\%$$

$$\text{Efisiensi Neraca Panas} = 100\% - \% \text{Heat Loss}$$

$$\text{Efisiensi Neraca Panas} = 96.71\%$$

$$\text{Efisiensi Neraca Panas} = 97\%$$

2.5 Tata Letak Pabrik dan Peralatan

2.5.1 Tata Letak Pabrik

Setelah dilakukan penyusunan diagram alur proses produksi (*flow sheet*), tahap selanjutnya adalah perancangan tata letak pabrik (*plant layout*) yang mencakup penataan menyeluruh terhadap bangunan dan peralatan produksi di dalam pabrik. Perencanaan tata letak

ini bertujuan untuk mengoptimalkan efisiensi alur proses produksi, sekaligus memastikan aspek keselamatan kerja para pekerja di lingkungan pabrik. Penempatan setiap elemen dalam pabrik harus disusun secara sistematis agar tidak hanya memperlancar proses produksi, tetapi juga meminimalkan potensi risiko kecelakaan kerja (Wang et al., 2018a).

Menurut (Wang et al., 2018a), dalam merancang tata letak pabrik, terdapat beberapa aspek penting yang harus diperhatikan, antara lain:

- Potensi Perluasan Pabrik:

Tata letak harus mempertimbangkan kemungkinan pengembangan pabrik di masa depan. Artinya, perencanaan harus bersifat fleksibel dan menyediakan ruang atau konfigurasi yang memungkinkan ekspansi atau penambahan unit produksi bila kapasitas pabrik perlu ditingkatkan.

- Faktor Keamanan:

Aspek keselamatan merupakan prioritas utama dalam perencanaan. Oleh karena itu, penempatan peralatan harus menjauh dari sumber api, bahan mudah terbakar, bahan yang berpotensi meledak, serta gas beracun. Hal ini untuk meminimalkan risiko kebakaran dan ledakan yang dapat membahayakan pekerja maupun lingkungan sekitar.

- c. Sistem Konstruksi *Indoor*:

Struktur bangunan dirancang dalam bentuk tertutup (*indoor*), mengingat kondisi operasi pabrik yang relatif tidak ekstrem. Selain itu, bangunan tertutup melindungi proses produksi dari pengaruh cuaca eksternal yang dapat mengganggu kestabilan proses.

- d. Efisiensi Penggunaan Lahan:

Dengan mempertimbangkan bahwa harga tanah cukup tinggi, maka desain tata letak harus mengedepankan efisiensi ruang. Setiap meter persegi lahan harus dimanfaatkan secara maksimal untuk menunjang kegiatan produksi dan operasional lainnya.

Secara umum, tata letak pabrik terbagi ke dalam beberapa zona utama dengan fungsi yang berbeda-beda, sebagai berikut:

1. Zona Administrasi, Perkantoran, Laboratorium, dan Ruang Kontrol

Bagian ini berfungsi sebagai pusat administrasi dan pengawasan operasional pabrik. Laboratorium berperan dalam pengujian kualitas bahan baku dan produk, sementara ruang kontrol digunakan untuk mengatur dan memantau jalannya proses produksi secara *real-time*. Penempatan laboratorium dan ruang kontrol sebaiknya berdekatan dengan area proses agar memudahkan penanganan cepat jika terjadi gangguan dalam proses produksi.

2. Zona Proses Produksi

Merupakan area inti tempat berlangsungnya reaksi dan operasi unit proses pembuatan *Phthalic Anhydride*. Di sinilah seluruh peralatan utama produksi ditempatkan secara strategis agar alur proses berjalan lancar dan efisien.

3. Zona Penyimpanan Umum dan Bengkel

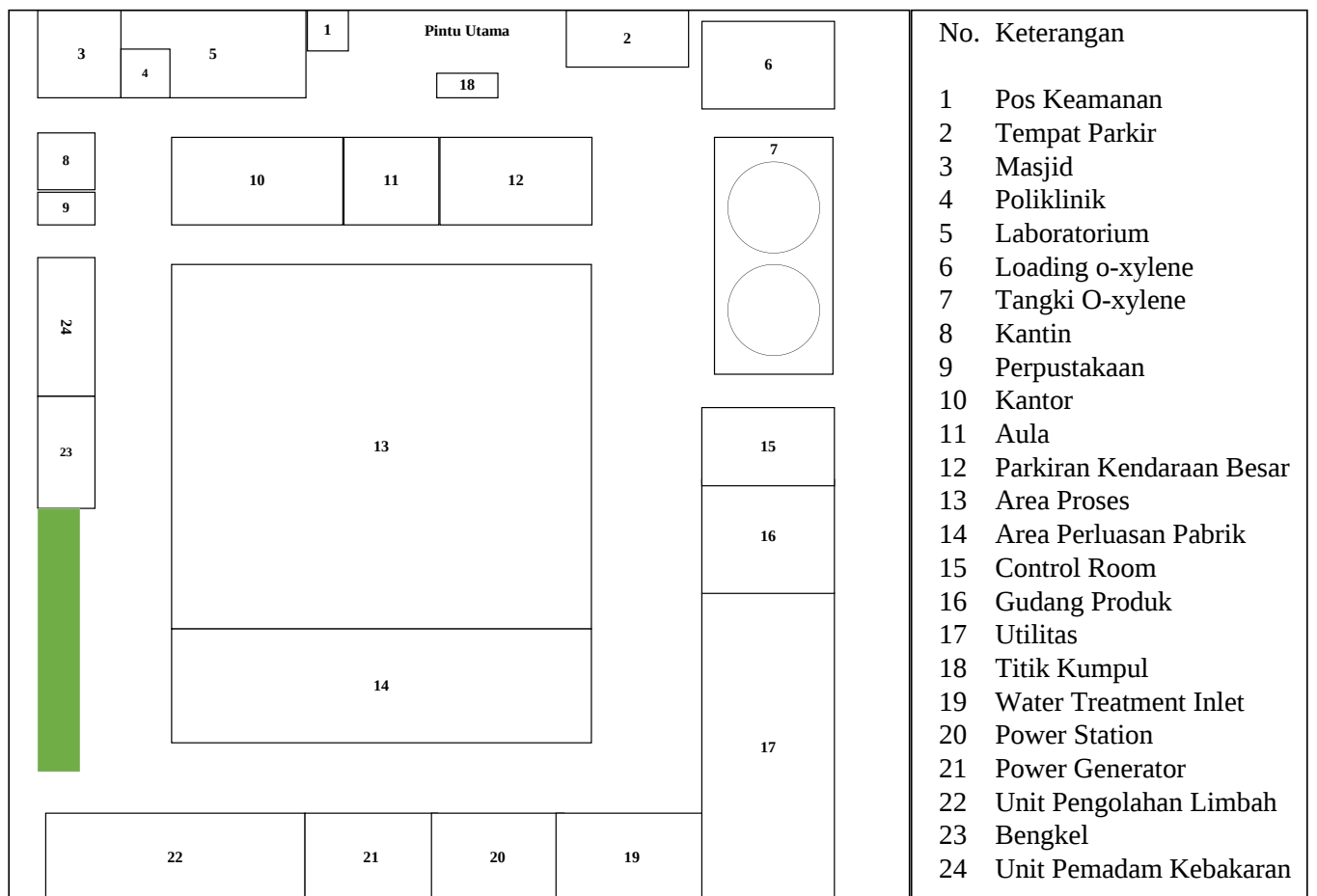
Area ini digunakan untuk menyimpan bahan baku, produk jadi, serta perlengkapan pendukung lainnya. Di dalamnya juga terdapat bengkel yang berfungsi untuk pemeliharaan dan perbaikan peralatan produksi secara rutin.

4. Zona Parkir dan Loading Bahan Baku

Merupakan area yang diperuntukkan bagi kendaraan karyawan serta truk pengangkut bahan baku. Zona ini harus dirancang agar memungkinkan mobilitas kendaraan berlangsung dengan aman dan tertib.

5. Zona Utilitas

Area ini digunakan untuk instalasi dan unit penunjang operasional pabrik, seperti penyediaan air, listrik, uap, dan sistem pembuangan. Unit-unit ini sangat penting dalam mendukung kelangsungan proses produksi. Berikut *layout* pabrik dijelaskan pada Gambar 2.2.



Skala 1 : 1000

Gambar 2.2 Layout Pabrik *Phthalic Anhydride*

Keterangan :

Pos Keamanan	: 40 m ²	Area Proses	: 10000 m ²
Masjid	: 400 m ²	Area Perluasan Pabrik	: 5000 m ²
Poliklinik	: 300 m ²	<i>Control Room</i>	: 300 m ²
Laboratorium	: 400 m ²	Gudang Produk & Bahan Baku	: 5000 m ²
Lapangan Parkir	: 300 m ²	Utilitas	: 300 m ²
Lapangan Parkir Kendaraan besar	: 700 m ²	Titik Kumpul	: 100 m ²
Aula Pertemuan	: 300 m ²	Unit Pengolahan Limbah	: 700 m ²
Gedung Kantor Utama	: 1000 m ²	<i>Power Generation</i>	: 250 m ²
Kantin	: 200 m ²	<i>Power Station</i>	: 250 m ²
Perpustakaan	: 250 m ²	<i>Water Treatment Inlet</i>	: 300 m ²
Unit Pemadam Kebakaran	: 350 m ²	Jalan dan Taman	: 1200 m ²
Bengkel	: 600 m ²	Total Lauas	: 31.340 m ²

2.5.2 Tata Letak Peralatan

Perancangan tata letak peralatan dalam pabrik produksi *Phthalic Anhydride* memerlukan pertimbangan berbagai aspek teknis dan keselamatan untuk memastikan efisiensi operasional serta perlindungan terhadap pekerja dan lingkungan (Wang et al., 2018b). Beberapa faktor krusial yang perlu diperhatikan meliputi:

1. Aliran Bahan Baku dan Produk

Penempatan peralatan harus mengikuti urutan proses produksi untuk meminimalkan jarak perpindahan bahan, mengurangi risiko kontaminasi silang, dan meningkatkan efisiensi operasional. Penerapan prinsip ini dapat mengurangi biaya penanganan material hingga 10–30% dan total investasi hingga 50% .

2. Aliran Udara

Sirkulasi udara yang baik di area proses penting untuk mencegah akumulasi gas berbahaya dan menjaga kualitas udara, yang berdampak langsung pada keselamatan dan kesehatan pekerja. Desain ventilasi yang efektif membantu menghindari stagnasi udara yang dapat menyebabkan akumulasi bahan kimia berbahaya .

3. Pencahayaan

Pencahayaan yang memadai di seluruh area pabrik, terutama di zona proses berisiko tinggi, esensial untuk memastikan visibilitas yang baik, mengurangi kemungkinan kecelakaan kerja, dan meningkatkan akurasi dalam pengoperasian peralatan.

4. Lalu Lintas Personel

Desain tata letak harus memungkinkan akses mudah dan cepat bagi pekerja ke seluruh peralatan produksi, serta menyediakan jalur evakuasi yang jelas dan aman. Hal ini penting untuk memastikan respons cepat terhadap situasi darurat dan meminimalkan risiko kecelakaan .

5. Jarak Antar Peralatan Proses

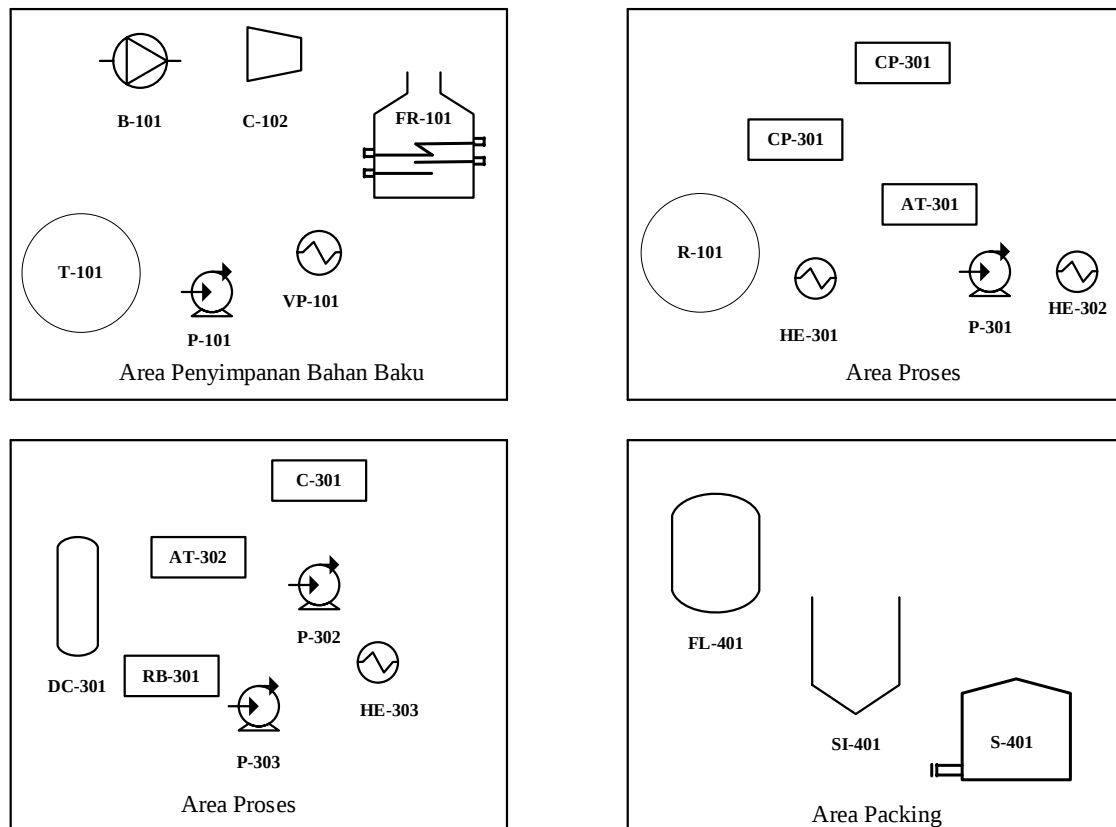
Peralatan yang beroperasi pada suhu dan tekanan tinggi harus ditempatkan dengan jarak aman dari peralatan lain untuk mencegah efek domino jika terjadi kegagalan. Penentuan jarak ini berdasarkan analisis risiko dan perhitungan jarak aman untuk mengurangi dampak potensial dari insiden .

6. Operasional Peralatan

Peralatan dengan kontrol khusus seperti katup, titik pengambilan sampel, dan instrumen pengukuran harus ditempatkan dekat dengan ruang kontrol untuk memudahkan pemantauan dan pengoperasian. Selain itu, ruang yang cukup harus disediakan untuk kegiatan pemeliharaan rutin, seperti pembersihan tabung pada penukar panas .

7. Aspek Ekonomi

Penataan peralatan harus mempertimbangkan efisiensi biaya dengan memastikan penggunaan ruang yang optimal, mengurangi panjang perpipaan, dan meminimalkan kebutuhan akan peralatan tambahan. Desain yang efisien dapat mengurangi biaya investasi dan operasional secara signifikan .



Gambar 2.3 *Layout Peralatan Proses Pabrik Phthalic Anhydride*

Keterangan :

T-101 : Tangki *Ortho-xylene*

V-101 : *Vaporizer*

B-101 : *Blower*

C-101 : Kompresor

FR-101 : *Furnance*

R-201 : Reaktor

HE-301 : *Gas Coller Heat Exchanger*

HE-302 : *Heat exchanger 2*

HE-303 : *Heat exchanger 3*

RB-301 : *Reboiler*

CP-301 : Kondensor Parsial 1

CP-302 : Kondensor Parsial 2

AT-301 : Tangki Akumulator 1

AT-302 : Tangki Akumulator 2

DC-301 : Kolom Destilasi

C-301 : Kondensor

FL-301 : *Flaker*

SI-301 : Silo