

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Sikloheksana ( $C_6H_{12}$ ) merupakan senyawa golongan sikloalkana yang bersifat relatif stabil dan secara alami dapat ditemukan dalam minyak mentah dengan kadar sekitar 0,1–1,0%. Namun demikian, keberadaan alami tersebut tidak mencukupi untuk memenuhi kebutuhan industri, sehingga produksi sikloheksana secara komersial umumnya dilakukan melalui proses sintesis. Hingga saat ini, metode yang paling banyak diterapkan secara industri adalah hidrogenasi katalitik benzena dengan menggunakan gas hidrogen, baik yang berlangsung pada fase cair maupun fase uap.

Proses hidrogenasi benzena menjadi sikloheksana dilakukan dengan bantuan katalis logam, seperti nikel, platinum, atau paladium, yang berperan dalam meningkatkan laju reaksi serta efisiensi proses. Sejak dekade 1980-an, konsumsi sikloheksana menunjukkan tren pertumbuhan sebesar sekitar 2–3% per tahun. Pertumbuhan ini terutama dipengaruhi oleh kebutuhan sikloheksana sebagai bahan baku utama dalam industri nilon, sehingga perkembangan pasarnya relatif terbatas. Meskipun demikian, peluang pengembangan industri sikloheksana masih terbuka, khususnya melalui investasi baru di kawasan Asia dan Timur Tengah yang memiliki pertumbuhan industri petrokimia dan kebutuhan bahan baku yang terus meningkat.

Bahan baku utama dalam proses pembuatan sikloheksana adalah benzena ( $C_6H_6$ ) dan Hidrogen ( $H_2$ ). Ketersediaan bahan baku tersebut di Indonesia relatif memadai karena telah didukung oleh industri petrokimia dan gas industri dalam negeri. Benzena dan hidrogen dapat diperoleh dari PT. Trans Pacific Petrochemical Indotama yang memiliki kapasitas produksi benzena sebesar 300.000 ton per tahun sehingga mampu menunjang kebutuhan bahan baku untuk pendirian pabrik Sikloheksana. Gas hidrogen sebagai reaktan pendukung tersedia dari industri minyak dan gas nasional juga dipasok oleh perusahaan yang sama, yaitu PT. TPPI untuk memudahkan distribusi akibat dari berat molekulnya yang rendah, sehingga meminimalisir terjadinya kebocoran saat proses pengiriman.

Selain bahan baku utama, proses hidrogenasi benzena juga memerlukan katalis nikel-alumina ( $Ni/Al_2O_3$ ) sebagai bahan pendukung untuk meningkatkan laju dan efisiensi reaksi. Katalis ini umumnya diperoleh dari pemasok katalis industri yang telah berpengalaman dalam penyediaan katalis untuk proses petrokimia. Hingga saat ini, Indonesia masih bergantung pada

impor sikloheksana untuk memenuhi kebutuhan industri dalam negeri. Kondisi tersebut menunjukkan adanya peluang strategis untuk pendirian pabrik sikloheksana di Indonesia, yang diorientasikan tidak hanya untuk memenuhi kebutuhan domestik, tetapi juga membuka peluang ekspor ke pasar internasional.

Hingga saat ini, Indonesia masih mengimpor produk sikloheksana dari luar negeri untuk memenuhi kebutuhan industri dalam negeri, sehingga ketergantungan terhadap pasokan impor masih tinggi. Kondisi ini menunjukkan peluang besar bagi pembangunan pabrik sikloheksana di Indonesia, baik dalam rangka memenuhi kebutuhan domestik maupun membuka peluang ekspor ke pasar luar negeri. Pendirian pabrik ini diharapkan dapat memperkuat struktur industri petrokimia nasional serta mendorong kemandirian dalam penyediaan bahan kimia strategis.

## **1.2 Kapasitas Perancangan**

Dalam menentukan kapasitas rancangan suatu pabrik, diperlukan evaluasi yang menyeluruh agar kapasitas yang dipilih bersifat realistis dan sesuai dengan kondisi industri. Penetapan kapasitas pabrik umumnya didasarkan pada kapasitas minimum yang setara atau tidak melebihi kapasitas pabrik sejenis yang telah beroperasi, serta mempertimbangkan kemampuan pabrik dalam memenuhi kebutuhan pasar dalam negeri. Oleh karena itu, penentuan kapasitas tidak hanya memperhatikan aspek teknis, tetapi juga aspek ekonomi dan ketersediaan sumber daya. Berikut adalah beberapa faktor utama yang menjadi pertimbangan dalam penentuan kapasitas pabrik antara lain:

- a. Proyeksi kebutuhan sikloheksana di Indonesia pada masa mendatang sebagai dasar penyesuaian kapasitas produksi.
- b. Ketersediaan dan kontinuitas pasokan bahan baku, khususnya benzena dan hidrogen, guna menjamin keberlangsungan operasi pabrik.
- c. Proses produksi yang digunakan, termasuk efisiensi proses dan tingkat kematangan teknologi yang diterapkan secara industri.

### **1.2.1 Prediksi Kebutuhan Sikloheksana di Indonesia**

Permintaan akan sikloheksana kian meningkat seiring tahun, selama ini Indonesia dan ASEAN memenuhi kebutuhan tersebut melalui skema impor akibat belum adanya pabrik yang mampu memproduksi sikloheksana dalam skala besar. Dilihat dari data impor 5 tahun terakhir, konsumsi sikloheksana mengalami peningkatan yang ditunjukkan pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Prediksi Kebutuhan Sikloheksana

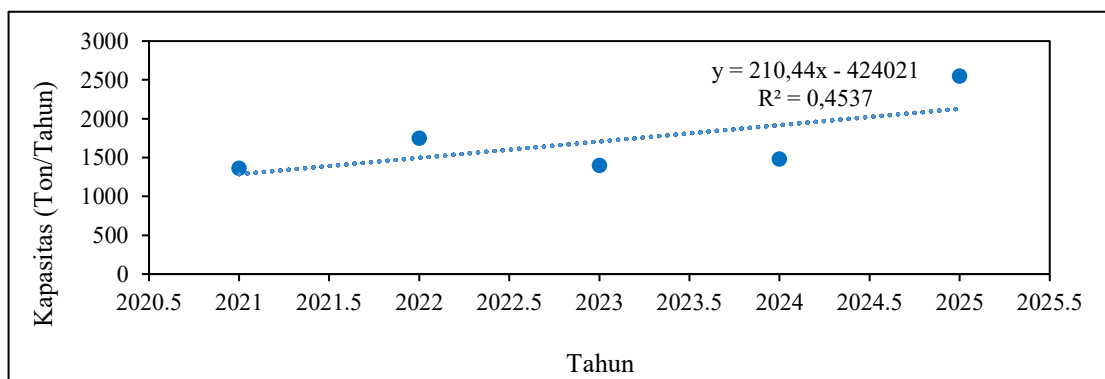
| Tahun | Indonesia (Ton) | ASEAN (Ton) |
|-------|-----------------|-------------|
| 2021  | 1361,713        | 1362,325    |
| 2022  | 1749,451        | 1750,716    |
| 2023  | 1395,435        | 1400,618    |
| 2024  | 1481,387        | 1481,911    |
| 2025  | 2547,96409      | -           |

### 1.2.2 Perhitungan Kapasitas Produksi

Pabrik sikloheksana direncanakan mulai beroperasi pada tahun 2030. Penentuan kapasitas produksi dilakukan menggunakan dua metode, yaitu regresi linier dan metode rata-rata laju pertumbuhan (*discounted*). Metode regresi linier digunakan apabila data historis menunjukkan kecenderungan linier yang kuat terhadap waktu, yang ditandai dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) mendekati satu. Namun, apabila hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai  $R^2$  yang diperoleh di bawah 0,9 maka hubungan linier antara data dan waktu belum cukup kuat untuk dijadikan proyeksi penentuan kapasitas produksi pabrik sikloheksana.

#### a. Metode Regresi Linier

Grafik yang disajikan pada Gambar 1.1 merupakan hasil analisis regresi linier dari data yang telah diperoleh, meliputi data impor dan konsumsi yang diasumsikan sama dikarenakan belum terdapat pabrik sikloheksana di wilayah Indonesia dan ASEAN. Grafik tersebut digunakan untuk menggambarkan kecenderungan perubahan masing-masing parameter terhadap waktu, sekaligus sebagai dasar evaluasi dalam penentuan metode perhitungan kapasitas produksi pabrik.



Gambar 1.1 Statistik Perhitungan Regresi Linier Kebutuhan Sikloheksana di Indonesia

Dari pengolahan data impor dan konsumsi, diperoleh nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,4537 yang menunjukkan bahwa hubungan antara waktu dan kapasitas memiliki tingkat korelasi sedang. Karena nilai  $R^2$  yang diperoleh tidak sama atau mendekati 0,9 maka digunakan metode rata-rata laju pertumbuhan untuk menentukan kapasitas pabrik sikloheksana yang akan didirikan. Meskipun nilai  $R^2$  tidak terlalu tinggi, tren yang dihasilkan dapat memberikan gambaran umum mengenai kecenderungan peningkatan kapasitas dari tahun ke tahun

b. Metode Rata-rata Laju Pertumbuhan (*Discounted*)

Rata-rata laju pertumbuhan didapatkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$U_n = U_1(1 + i)^n$$

Keterangan:

$U_n$  = Jumlah komoditas pada tahun ke-n

$U_1$  = Jumlah komoditas tahun pertama pada data

$i$  = Laju pertumbuhan

$n$  = Selisih tahun (tahun proyeksi – 2025)

Penentuan kapasitas produksi pabrik dilakukan berdasarkan analisis beberapa variabel utama yang mempengaruhi ketersediaan dan kebutuhan komoditas di masa mendatang, meliputi:

1. Perhitungan Rata-rata Pertumbuhan Impor dan Konsumsi

Akibat belum terdapat pabrik sikloheksana di Indonesia maka data impor diasumsikan pula sebagai data konsumsi, sehingga didapatkan nilai rata-rata pertumbuhan yang disajikan pada Tabel 1.2.

Tabel 1.2 Pertumbuhan Impor dan Konsumsi Sikloheksana di Indonesia

| Tahun                         | Impor (Ton/Tahun) | Pertumbuhan Impor |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|
| 2021                          | 1361,713          | -                 |
| 2022                          | 1749,451          | 28,47%            |
| 2023                          | 1395,435          | -20,24%           |
| 2024                          | 1481,387          | 6,16%             |
| 2025                          | 2547,96409        | 72,00%            |
| Total                         |                   | 86,40%            |
| Rata-rata Pertumbuhan ( $i$ ) |                   | 21,60%            |

Sehingga rata-rata laju pertumbuhan impor dan konsumsi yaitu:

$$\begin{aligned} n &= 2030 - 5 \\ &= 5 \end{aligned}$$

Perhitungan i

$$\begin{aligned} \text{Impor} &= \left( \frac{2547,96409}{1361,713} \right)^{\left( \frac{1}{5} \right) - 1} \\ &= 0,133500051 \end{aligned}$$

$$M_1 = 2547,96409 (1 + 0,133500051)^5$$

$$M_1 = 4767,613296 \text{ ton}$$

## 2. Perhitungan Rata-rata Pertumbuhan Ekspor

Data ekspor sikloheksana yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik menunjukkan nilai yang sangat kecil apabila dibandingkan dengan nilai impor. Hal tersebut dapat diasumsikan sebagai re-ekspor, yaitu komoditas impor namun tidak atau belum dimanfaatkan di dalam negeri yang kemudian diekspor kembali tanpa mengalami proses pengolahan yang signifikan. Dari data tersebut didapatkan rata-rata laju pertumbuhan yang disajikan pada Tabel 1.3.

Tabel 1.3 Pertumbuhan Ekspor Sikloheksana di Indonesia

| Tahun                     | Ekspor (Ton/Tahun) | Pertumbuhan Ekspor |
|---------------------------|--------------------|--------------------|
| 2021                      | 0,61               | -                  |
| 2022                      | 1,27               | 106,86%            |
| 2023                      | 5,18               | 309,40%            |
| 2024                      | 5,222              | 0,75%              |
| 2025                      | 415,622            | 7859,06%           |
| Total                     |                    | 8276,07%           |
| Rata-rata Pertumbuhan (i) |                    | 2069%              |

Sehingga rata-rata laju pertumbuhan ekspor yaitu:

$$\begin{aligned} n &= 2030 - 5 \\ &= 5 \end{aligned}$$

Perhitungan i

$$\begin{aligned} \text{Impor} &= \left( \frac{415,622}{0,61} \right)^{\left( \frac{1}{5} \right) - 1} \\ &= 2,684592138 \end{aligned}$$

$$M_4 = 415,622 (1 + 2,684592138)^5$$

$$M_4 = 282257,5929 \text{ ton}$$

### 3. Perhitungan Rata-rata Pertumbuhan Produksi

Saat ini belum terdapat pabrik sikloheksana di Indonesia, sehingga rata-rata pertumbuhan produksi diasumsikan 0.

$$M_2 = 0$$

### 4. Perhitungan Peluang Kapasitas Pabrik Sikloheksana

Penentuan kapasitas pabrik sikloheksana dilakukan berdasarkan analisis peluang pasar yang diperoleh dari selisih antara *demand* dan *supply*, yaitu:

$$\text{Peluang} = \text{Demand} - \text{Supply}$$

Dimana:

$$\text{Peluang} = \text{Demand} - \text{Supply}$$

$$\text{Supply} = \text{Produksi} + \text{Impor}$$

Dari rumus tersebut didapatkan persamaan neraca massa peluang kapasitas untuk membangun pabrik sikloheksana pada tahun 2030 dengan rumus:

$$M_1 + M_2 + M_3 = M_4 + M_5$$

$$M_3 = (M_4 + M_5) - (M_1 + M_2)$$

Dimana:

$$M_1 = \text{Nilai impor pada tahun 2030}$$

$$M_2 = \text{Nilai produksi pabrik lama pada tahun 2030}$$

$$M_3 = \text{Nilai produksi pabrik baru pada tahun 2030}$$

$$M_4 = \text{Nilai ekspor pada tahun 2030}$$

$$M_5 = \text{Nilai konsumsi pada tahun 2030}$$

Setelah dilakukan perhitungan, didapatkan nilai variabel sebagai berikut:

$$M_1 = 4.767,613296 \text{ ton/tahun}$$

$$M_2 = 0 \text{ ton/tahun}$$

$$M_4 = 282.257,5929 \text{ ton/tahun}$$

$$M_5 = 4.767,613296 \text{ ton/tahun}$$

$$M_3 = (282.257,5929 + 4.767,613296) - (4.767,613296 + 0)$$

$$= 287.025,2062 + 4.767,613296$$

$$= 282.257,5929 \text{ ton/tahun}$$

Dikarenakan belum terdapat pabrik sikloheksana di Indonesia dan kawasan ASEAN, maka kapasitas produksi dapat dijalankan sebesar 150% dari perhitungan kapasitas pabrik yang telah dihitung.

$$M_3 \text{ 150\%} = 282.257,5929 \times 150\%$$

$$= 423.386,3894216 \text{ ton/tahun}$$

Sebagai bahan pertimbangan dalam penentuan kapasitas produksi pabrik, dilakukan kajian terhadap kapasitas pabrik sikloheksana yang telah beroperasi di dunia. Data tersebut dapat digunakan sebagai pembandingan untuk memastikan bahwa kapasitas pabrik yang dirancang masih berada dalam rentang wajar. Tabel 1.4 menyajikan kapasitas produksi pabrik sikloheksana di dunia.

Tabel 1.4 Kapasitas Produksi Pabrik Sikloheksana di Dunia

| No. | Nama Produsen                      | Lokasi                                    | Kapasitas<br>(Ton/Tahun) |
|-----|------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| 1.  | Chevron Phillips Chemicals         | Port Arthur, Texas,<br>Amerika Serikat    | 412.000                  |
| 2.  | Chevron Phillips Chemicals         | Borger, Texas, Amerika<br>Serikat         | 117.000                  |
| 3.  | Chevron Phillips Chemicals         | Sweeny, Texas, Amerika<br>Serikat         | 324.000                  |
| 4.  | ExxonMobil Chemical                | Beaumont, Texas, Amerika<br>Serikat       | 191.000                  |
| 5.  | ExxonMobil Chemical                | Rotterdam, Belanda                        | 270.000                  |
| 6.  | CITGO Refining &<br>Petrochemicals | Corpus Christi, Texas,<br>Amerika Serikat | 117.000                  |
| 7.  | Flint Hills Resources              | Corpus Christi, Texas,<br>Amerika Serikat | 385.000                  |
| 8.  | Conoco Phillips                    | Corpus Christi, Texas,<br>Amerika Serikat | 460.000                  |
| 9.  | Hunstman Petrochemical             | Port Arthur, Texas,<br>Amerika Serikat    | 280.000                  |
| 10. | CEPSA & Bio-Oils                   | Huelva, Spanyol                           | 180.000                  |
| 11. | Fina Antwerp Olefins               | Antwerp, Belgia                           | 110.000                  |
| 12. | Kemerovo Azot                      | Kemerovo, Rusia                           | 155.000                  |
| 13. | KuibyshevAzot                      | Togliatti, Rusia                          | 120.000                  |
| 14. | PKN Orlen                          | Plock, Polandia                           | 120.000                  |
| 15. | BASF Societas Europea              | Ludwigshafen, Jerman                      | 130.000                  |
| 16. | Yueyang Juyuan Chemical            | Yueyuang, Hunan, China                    | 120.000                  |

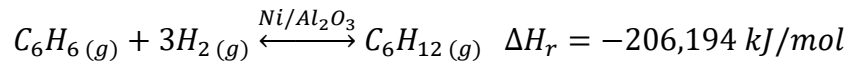
Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode rata-rata laju pertumbuhan, diperkirakan kebutuhan sikloheksana untuk pasar Indonesia dan kawasan sekitarnya pada tahun 2030 mencapai 423.386 ton/tahun. Nilai tersebut menunjukkan adanya prospek pasar yang cukup besar seiring meningkatnya kebutuhan industri petrokimia dan manufaktur yang memanfaatkan sikloheksana sebagai bahan baku. Meskipun demikian, kapasitas produksi yang akan dirancang tidak dapat secara langsung disamakan dengan total kebutuhan pasar. Penentuan kapasitas tetap perlu mempertimbangkan berbagai aspek, seperti keberadaan produsen lain, peluang ekspor, kemampuan pemasaran produk, serta keberlanjutan operasional pabrik agar investasi yang dilakukan dapat memberikan keuntungan secara optimal.

Selain mempertimbangkan aspek pasar, penentuan kapasitas produksi juga mengacu pada ketentuan yang tercantum dalam UU No.5 tahun 1999 (R. Indonesia, 1999) tentang Larangan Praktik Monopoli dan Persaingan Usaha Tidak Sehat, yang mengatur bahwa pelaku usaha tidak diperkenankan menguasai lebih dari 50% pangsa pasar suatu jenis barang atau jasa tertentu. Dengan mempertimbangkan regulasi tersebut serta kondisi pasar yang ada, kapasitas produksi pabrik sikloheksana ditetapkan sebesar  $\pm 35\%$  dari total kebutuhan nasional dan ekspor. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh kapasitas produksi sebesar **150.000** ton/tahun. Kapasitas tersebut dinilai mampu memenuhi sebagian kebutuhan pasar tanpa menimbulkan dominasi pasar, sekaligus memberikan peluang bagi pabrik untuk beroperasi secara kompetitif dan layak ditinjau dari aspek komersial maupun pengembangan industri di masa mendatang.

### **1.2.3 Ketersediaan Bahan Baku**

Bahan baku utama yang digunakan dalam produksi sikloheksana ( $C_6H_{12}$ ) adalah benzena ( $C_6H_6$ ) dan hidrogen ( $H_2$ ) dengan bantuan katalis Nikel Alumina ( $Ni/Al_2O_3$ ). Benzena dan hidrogen diperoleh dari PT Trans-Pacific Petrochemical Indotama yang terletak di Kabupaten Tuban, Jawa Timur yang disalurkan menggunakan pipa. Hidrogen diperoleh dari perusahaan yang sama, yaitu PT TPPI juga disalurkan langsung menggunakan pipa. Untuk katalis diperoleh melalui skema impor dari PT Henan Yetan Environmental Protection Material Co., Ltd yang berbasis di China sebesar 53.421,61175 kg.

Untuk dapat menentukan kebutuhan bahan baku agar dapat mencapai kapasitas produksi yang direncanakan, maka dilakukan perhitungan berdasarkan reaksi kimia yang terjadi. Berikut reaksi kimia yang terjadi:



Perbandingan mol reaksi → benzena : hidrogen : sikloheksana = 1 : 3 : 1

Perbandingan mol feed → benzena : hidrogen : sikloheksana = 1 : 4 : 1

Alasan mengapa hidrogen ditambahkan berlebih (*excess*) untuk meningkatkan konversi dan mendorong reaksi berjalan ke arah produk. Selain itu agar dapat di *recycle* kembali untuk dapat digunakan kembali. Maka perhitungan bahan baku sebagai berikut:

#### 1. Kebutuhan Benzena

$$\text{Konversi benzena} = 99,5\%$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan benzena} &= \frac{\text{Mol benzene}}{\text{Mol sikloheksana}} \times \text{Kapasitas pabrik} \\ &= \frac{78}{84} \times 150.000 \\ &= 139.285,7143 \text{ ton} \end{aligned}$$

#### 2. Kebutuhan Hidrogen

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan hidrogen} &= \frac{\text{Mol hidrogen}}{\text{Mol sikloheksana}} \times \text{Kapasitas pabrik} \\ &= \frac{6}{84} \times 150.000 \\ &= 10.714,2857 \text{ ton} \end{aligned}$$

#### 3. Kebutuhan Katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan katalis} &= W + \Delta W \times \Delta \frac{x}{h} \\ &= 40736.19607 + 128135,5119 \times 0.099 \\ &= 53.421,61175 \text{ kg} \\ &= 53,42161175 \text{ ton} \end{aligned}$$

#### 4. Kebutuhan Solvent

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan solvent} &= 1,5 \times \text{Feed Kolom Distilasi 1} \\ &= 1,5 \times 18771,711 \\ &= 28.157,567 \text{ kg} \\ &= 28,157567 \text{ ton} \end{aligned}$$

### 1.3 Pemilihan Lokasi Pabrik

Pemilihan lokasi pabrik merupakan langkah strategis yang sangat penting dalam perencanaan industri sikloheksana kapasitas 150.000 ton/tahun. Terdapat beberapa faktor

utama yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan lokasi pabrik meliputi ketersediaan bahan baku, infrastruktur dan transportasi, tenaga kerja, karakteristik lokasi, kebijakan pemerintah, serta kemungkinan perluasan pabrik di masa depan. Selain itu, jenis industri sikloheksana juga perlu dikategorikan berdasarkan konsep *weight loss* atau *weight gain*, yang menentukan apakah pabrik harus lebih dekat ke sumber bahan baku atau ke pasar konsumen utama.

Tabel 1. 5 Matriks Pemilihan Lokasi Pabrik

| No    | Indikator                                | Bobot | Skor  |         |         | Nilai (Bobot × Skor) |         |         |
|-------|------------------------------------------|-------|-------|---------|---------|----------------------|---------|---------|
|       |                                          |       | Tuban | Cilacap | Cilegon | Tuban                | Cilacap | Cilegon |
| 1     | Ketersediaan Bahan Baku                  | 0,09  | 75    | 60      | 45      | 6,75                 | 5,4     | 4,05    |
| 2     | Pemasaran ( <i>marketing</i> )           | 0,07  | 70    | 50      | 60      | 4,9                  | 3,5     | 4,2     |
| 3     | Utilitas                                 | 0,10  | 60    | 80      | 50      | 6                    | 8       | 5       |
| 4     | Keadaan Geografis dan Masyarakat         | 0,10  | 70    | 50      | 70      | 7                    | 5       | 7       |
| 5     | Transportasi                             | 0,13  | 80    | 70      | 80      | 10,4                 | 9,1     | 10,4    |
| 6     | Tenaga Kerja                             | 0,12  | 80    | 60      | 60      | 9,6                  | 7,2     | 7,2     |
| 7     | Buangan Pabrik ( <i>Waste Disposal</i> ) | 0,10  | 70    | 80      | 50      | 7                    | 8       | 5       |
| 8     | Pembuangan Limbah                        | 0,10  | 70    | 80      | 70      | 7                    | 8       | 7       |
| 9     | Site dan Karakteristik Lokasi            | 0,09  | 80    | 70      | 80      | 7,2                  | 6,3     | 7,2     |
| 10    | Peraturan Perundang-undangan             | 0,10  | 70    | 80      | 40      | 7                    | 8       | 4       |
| Total |                                          | 1,00  |       |         |         | 72,85                | 68,5    | 61,05   |

### Keterangan Bobot

Bobot menunjukkan tingkat kepentingan relatif dari setiap indikator dalam pemilihan lokasi pabrik sikloheksana. Penetapan bobot dilakukan dengan mempertimbangkan aspek teknis, ketersediaan bahan baku, utilitas, serta faktor ekonomi dan lingkungan. Berikut merupakan keterangan dari masing-masing indikator beserta bobotnya:

1. Ketersediaan Bahan Baku (0,09)

Ketersediaan bahan baku seperti benzena dan hidrogen menjadi faktor penting dalam menjamin kontinuitas produksi. Lokasi yang dekat dengan sumber bahan baku akan mengurangi biaya transportasi dan risiko gangguan pasokan.

2. Pemasaran/*marketing* (0,07)

Faktor ini mempertimbangkan kemudahan distribusi produk ke pasar, baik domestik maupun ekspor. Kedekatan dengan pelabuhan dan jalur distribusi menjadi nilai tambah dalam efisiensi pemasaran.

3. Utilitas (0,10)

Ketersediaan utilitas seperti air, listrik, dan uap sangat penting untuk menunjang proses produksi. Lokasi dengan fasilitas utilitas yang memadai akan meningkatkan keandalan operasi pabrik.

4. Keadaan geografis dan masyarakat (0,10)

Kondisi lingkungan sekitar, termasuk topografi, keamanan, serta penerimaan masyarakat terhadap industri, menjadi faktor penting dalam keberlangsungan operasional pabrik.

5. Transportasi (0,13)

Bobot terbesar diberikan karena transportasi sangat mempengaruhi distribusi bahan baku dan produk. Akses terhadap jalan raya, pelabuhan, dan sarana logistik yang baik akan meningkatkan efisiensi dan menekan biaya operasional.

6. Tenaga kerja (0,12)

Ketersediaan tenaga kerja yang terampil dan memadai penting untuk mendukung operasional dan pemeliharaan pabrik secara optimal.

7. Buangan pabrik (*waste disposal*) (0,10)

Kemudahan dalam pengelolaan limbah industri menjadi pertimbangan penting untuk menjaga kelestarian lingkungan dan memenuhi standar regulasi.

8. Pembuangan limbah (0,10)

Faktor ini berkaitan dengan sistem pengolahan limbah cair, padat, dan gas agar tidak mencemari lingkungan serta sesuai dengan peraturan yang berlaku.

9. Karakteristik lokasi (0,09)

Kondisi fisik lokasi seperti luas lahan, stabilitas tanah, serta potensi pengembangan menjadi pertimbangan dalam pembangunan pabrik jangka panjang.

10. Peraturan perundang-undangan (0,10)

Faktor ini mencakup kemudahan perizinan, kebijakan pemerintah, serta dukungan regulasi terhadap pembangunan industri di daerah tersebut.

**Keterangan skor**

Sehubungan dengan metode penilaian *factor rating* yang dilakukan, berikut merupakan skala nilai untuk menentukan pemilihan lokasi pabrik yang akan dibangun.

- 0-25 : Sangat Tidak baik
- 26-50 : Tidak Baik
- 51-70 : Baik
- 70-100 : Sangat Baik

Berdasarkan dari hasil analisis menggunakan metode penilaian faktor tersebut, maka pabrik sikloheksana dengan kapasitas 150.000 ton/tahun paling baik jika didirikan di Kabupaten Tuban, Jawa Timur.



Gambar 1.2 Peta Lokasi Pabrik

### 1.3.1 Tipe Proses

Dalam penentuan lokasi pabrik, langkah awal yang perlu dilakukan adalah menganalisis jenis proses yang digunakan, apakah termasuk *weight gain* atau *weight loss*. Berikut adalah rumus untuk menentukan pemilihan lokasi pabrik akan didirikan.

$$\text{Jumlah BM bahan baku} = \text{Jumlah BM produk}$$

- *Weight gain*

Proses *weight gain* adalah proses di mana massa produk yang dihasilkan lebih besar dibandingkan massa bahan bakunya. Pada tipe proses ini, lokasi pabrik akan lebih menguntungkan apabila berada dekat dengan pasar atau konsumen. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan biaya transportasi dalam distribusi produk akhir.

- *Weight loss*

Proses *weight loss* merupakan proses di mana massa produk yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan massa bahan bakunya. Untuk tipe ini, lokasi pabrik sebaiknya dekat

dengan sumber bahan baku agar biaya pengangkutan bahan baku dapat ditekan seminimal mungkin. Jika hasilnya jumlah berat molekul bahan baku melebihi jumlah berat molekul produk maka termasuk tipe proses *weight loss*. Sebaliknya jika jumlah berat molekul bahan baku melebihi berat molekul produk maka termasuk tipe *wight gain*. Namun jika jumlah kedua BM sama maka diperbolehkan untuk memilih salah satu di antaranya yang boleh efisien.

Diketahui :

$$\text{BM C}_6\text{H}_6 = 78$$

$$\text{BM H}_2 = 6$$

$$\text{C}_6\text{H}_{12} = 84$$

$$\begin{aligned}\text{Total BM bahan} &= 78 + 6 \\ &= 84\end{aligned}$$

$$\text{Total BM produk} = 84$$

$$\text{Total BM bahan} = \text{Total BM produk}$$

Jadi, dapat ditarik kesimpulan bahwa proses pembuatan sikloheksana dapat memilih tipe proses sehingga kami akan membangun pabrik di Kabupaten Tuban.

### 1.3.2 Ketersediaan Bahan Baku

Bahan baku utama dalam proses produksi ini adalah benzena dan hidrogen yang keduanya tersedia dari dalam negeri. Benzena dapat diperoleh dari PT Trans Pacific Petrochemical Indotama yang berlokasi di Tuban dengan kapasitas produksi sekitar 300.000 ton/tahun. Ketersediaan benzena dalam jumlah besar ini menjadi keuntungan karena dapat menjamin kontinuitas suplai bahan baku. Selain itu, jarak antara Tuban dan lokasi industri relatif dekat sehingga distribusi dapat dilakukan dengan lebih efisien. Hal ini tentunya membantu menekan biaya transportasi dan meningkatkan keandalan operasional pabrik.

Sementara itu, kebutuhan hidrogen dapat dipenuhi dari perusahaan yang sama, yaitu PT Trans Pacific Petrochemical Indotama. Hidrogen sebagai bahan baku pendukung memiliki peran penting dalam reaksi hidrogenasi benzena. Lokasi Kabupaten Tuban yang masih berada di wilayah Jawa Timur memberikan kemudahan dalam proses distribusi ke pabrik. Pengiriman hidrogen umumnya dilakukan melalui jaringan pipa atau transportasi tabung bertekanan, tergantung kebutuhan dan skala operasi. Dengan ketersediaan hidrogen dari dalam negeri, proses produksi menjadi lebih stabil dan tidak bergantung pada impor.

### 1.3.3 Sarana Transportasi

Sarana transportasi menjadi salah satu faktor penting dalam penentuan lokasi pabrik. Hal ini berkaitan dengan kelancaran distribusi bahan baku maupun pemasaran produk. Dibangunnya pabrik sikloheksana di Kabupaten Tuban mempunyai akses transportasi yang sangat strategis baik di jalur darat karena sangat dekat dengan produsen bahan baku. Jika pendistribusian melalui jalur darat maka rute yang dilewati ialah Jalan Raya Semarang-Tuban. Kondisi jalan yang relatif baik memungkinkan mobilisasi benzene dan hidrogen dari PT. Trans-Pacific Petrochemical Indotama di Tuban.

### 1.3.4 Letak Pabrik dengan Daerah Pemasaran

Jarak antara letak pabrik dengan daerah pemasaran merupakan faktor yang penting dalam mempengaruhi efisiensi pendistribusian produk sikloheksana itu sendiri. Sikloheksana merupakan produk setengah jadi atau *intermediate* yang umumnya digunakan untuk lanjutan dari industri petrokimia, khususnya nilon seperti caprolactam dan *adipic acid*. Dengan mempertimbangkan kondisi pasar tersebut, lokasi pabrik sikloheksana di Kabupaten Tuban dinilai strategis. Industri sasaran konsumen pabrik sikloheksana di Indonesia disajikan pada Tabel 1.6.

Tabel 1. 6 Konsumen Sikloheksana di Indonesia

| Nama Pabrik                        | Industri          | Kota       | Produk             | Kapasitas                  |
|------------------------------------|-------------------|------------|--------------------|----------------------------|
| PT. Asahimas Chemical              | Petrokimia        | Cilegon    | PVC, VCM, Soda     | 900.000                    |
|                                    |                   |            | Api                | ton/tahun                  |
| PT. Chandra Asri Petrochemical Tbk | Petrokimia        | Cilegon    | Olefin, petrokimia | 900.000 ton ethylene/tahun |
| PT. Asia Pacific Fibers Tbk        | Tekstil           | Karawang   | Nylon, polyester   | 330.000 ton/tahun          |
| PT. Indotama Synthetics Tbk        | Tekstil           | Purwakarta | Serat, polymer     | >500.000 ton/tahun         |
| PT. Polychem Indonesia Tbk         | Kimia dan Plastik | Karawang   | MEG, resin         | ±480.000 ton/tahun         |

### 1.3.5 Penyediaan Utilitas

Utilitas merupakan faktor penunjang dari suatu proses di pabrik, diantaranya terdapat air, listrik, bahan bakar, aliran *steam* hingga pendingin. Untuk menjamin pasokan listrik serta air proses pada saat pembentukan sikloheksana dapat diperoleh dari PLTU

Tanjung Awar-Awar, Tuban. Letaknya yang dekat dengan PLTU memudahkan pendistribusian pasokan utilitas. Dengan ketersediaan pasokan utilitas yang lengkap dan berkelanjutan lokasi Kabupaten Tuban sangat mendukung untuk membangun pabrik sikloheksana secara kontinu dan efisien.

#### **1.3.6 Ketersediaan Tenaga Kerja**

Ketersediaan tenaga kerja merupakan faktor penting dalam menunjang operasional pabrik. Wilayah Kabupaten Tuban dan sekitarnya, termasuk Gresik, Lamongan, Sidoarjo, Surabaya, merupakan kawasan industri yang memiliki sumber daya manusia yang cukup melimpah. Tenaga kerja dengan berbagai tingkat pendidikan dan keahlian tersedia, mulai dari tenaga operator, teknisi, hingga tenaga ahli di bidang teknik kimia dan industri. Selain itu, keberadaan berbagai perguruan tinggi di Jawa Timur turut mendukung ketersediaan tenaga kerja yang kompeten dan terlatih. Lingkungan industri yang telah berkembang juga memberikan keuntungan dalam hal pengalaman tenaga kerja, sehingga proses adaptasi terhadap operasional pabrik dapat berlangsung lebih cepat dan efisien.

#### **1.3.7 Kebijakan Pemerintah**

Kebijakan pemerintah menjadi faktor penting dalam menentukan kelayakan suatu lokasi industri. Pemerintah Indonesia saat ini mendorong pengembangan industri petrokimia sebagai bagian dari upaya peningkatan nilai tambah sumber daya alam dan pengurangan ketergantungan impor. Wilayah Kabupaten Tuban termasuk dalam kawasan industri yang mendapatkan perhatian dalam pengembangan sektor industri. Pemerintah daerah maupun pusat memberikan dukungan dalam bentuk kemudahan perizinan, penyediaan infrastruktur, serta insentif investasi. Selain itu, regulasi terkait pengelolaan lingkungan dan keselamatan kerja juga telah ditetapkan secara jelas, sehingga memberikan kepastian hukum bagi pelaku industri. Dengan adanya kebijakan yang kondusif ini, pembangunan pabrik sikloheksana di Kabupaten Tuban memiliki prospek yang baik dari sisi regulasi.

#### **1.3.8 Kondisi Tanah dan Daerah**

Kondisi tanah dan karakteristik daerah merupakan faktor penting dalam pembangunan pabrik, terutama terkait dengan keamanan, stabilitas, dan keberlanjutan operasional. Menurut (Fadlilah et al., 2020) wilayah Kabupaten Tuban pada umumnya memiliki kondisi topografi yang relatif datar, sehingga memudahkan dalam pembangunan fasilitas industri. Selain itu, kawasan ini telah berkembang sebagai daerah industri,

sehingga infrastruktur pendukung seperti jalan, utilitas, dan akses logistik telah tersedia dengan baik. Dari sisi lingkungan, perlu dilakukan kajian lebih lanjut terkait pengelolaan limbah dan dampak terhadap masyarakat sekitar. Namun, dengan penerapan teknologi pengolahan limbah yang tepat dan sesuai dengan regulasi, dampak lingkungan dapat diminimalkan. Secara keseluruhan, kondisi tanah dan daerah di wilayah Kabupaten Tuban dinilai cukup mendukung untuk pembangunan pabrik sikloheksana, baik dari segi teknis maupun keberlanjutan operasional jangka panjang.

#### 1.4 Tinjauan Proses

Saat menentukan proses pembuatan sikloheksana, diperlukan kajian mendalam terhadap setiap proses yang tersedia untuk meminimalisir kerugian dan ancaman bahaya dalam proses produksi. Sikloheksana dapat diproduksi melalui beberapa metode, yaitu:

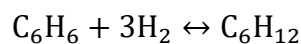
##### 1.4.1 Proses Hidrogenasi Benzena

Hidrogenasi benzena merupakan reaksi adisi hidrogen pada cincin aromatik benzena untuk menghasilkan senyawa jenuh berupa sikloheksana. Reaksi ini berlangsung secara eksotermis dan umumnya dilakukan pada fase gas dengan bantuan katalis logam transisi, seperti nikel (Ni), tembaga (Cu), hingga kobalt (Co) untuk meningkatkan laju reaksi serta selektivitas produk.

Kondisi operasi proses berada pada rentang suhu 150–250°C dengan tekanan 10–26 atm. Pengendalian suhu reaktor menjadi parameter penting karena reaksi bersifat eksotermis. Suhu harus dijaga agar tidak melebihi batas atas operasi, yaitu sekitar 250°C, untuk mencegah terjadinya reaksi samping seperti *thermal cracking* serta pergeseran kesetimbangan yang tidak menguntungkan, yang dapat menurunkan konversi benzena.

Akibat sifat eksotermis reaksi, sistem pendinginan diperlukan untuk menjaga kestabilan temperatur operasi di dalam reaktor. Selain itu, efisiensi proses dapat ditingkatkan melalui penerapan sistem *recycle* gas hidrogen serta minimisasi gas buang, sehingga diperoleh kemurnian produk yang tinggi dan proses yang lebih ekonomis (Al et al., 1969)

Secara stoikiometri, reaksi hidrogenasi benzena dapat dituliskan sebagai berikut:



Meskipun reaksi bersifat eksotermis, proses ini tidak berlangsung secara spontan karena memiliki energi aktivasi yang relatif tinggi. Oleh karena itu, penggunaan katalis diperlukan untuk mempercepat laju reaksi melalui mekanisme adsorpsi kimiawi reaktan pada permukaan katalis (Speight, 2002).

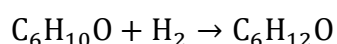
### 1.4.2 Proses Fraksinasi Minyak Mentah

Pada awalnya, sikloheksana diperoleh melalui proses fraksinasi minyak mentah (*crude oil*). Proses ini memanfaatkan distilasi fraksional untuk memisahkan komponen hidrokarbon berdasarkan perbedaan titik didihnya. Namun, kemurnian yang didapat relatif rendah sekitar 85% menjadikan proses ini telah ditinggalkan karena konsumsi energi yang tinggi.

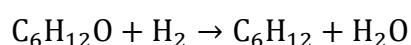
Hasil pemisahan terdiri atas beberapa fraksi, yaitu fraksi ringan ( $C_5$  dan lebih ringan), fraksi menengah yang mengandung senyawa seperti benzena, metilsiklopentana, dan sikloheksana, serta fraksi berat ( $C_7$  dan lebih berat). Akibat dari banyaknya pengotor, proses ini menjadi riskan dan sudah tidak diminati. Upaya peningkatan kemurnian pemisahan lanjutan cenderung menurunkan *yield* produk secara signifikan. Oleh karena itu, proses ini kurang ekonomis dan umumnya tidak digunakan dalam skala industri modern (Al et al., 1969)

### 1.4.3 Reaksi Hidrogenasi dan Hidrogenolisis Sikloheksanon

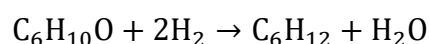
Konversi sikloheksanon menjadi senyawa jenuh berlangsung melalui dua tahap reaksi, yaitu hidrogenasi dan hidrogenolisis. Pada tahap pertama, sikloheksanon direaksikan dengan gas hidrogen membentuk sikloheksanol sebagai senyawa antara (intermediate). Reaksi ini merupakan reduksi gugus karbonil ( $C=O$ ) menjadi gugus hidroksil ( $-OH$ ) dengan bantuan katalis logam seperti nikel (Ni) atau palladium (Pd) untuk menurunkan energi aktivasi dan meningkatkan laju reaksi.



Selanjutnya, sikloheksanol mengalami reaksi hidrogenolisis, yaitu pemutusan ikatan  $C-O$  oleh hidrogen sehingga menghasilkan hidrokarbon jenuh dan air sebagai produk samping.



Secara keseluruhan, reaksi total dapat dituliskan sebagai berikut:



Dalam skala industri, proses ini umumnya dilakukan dalam reaktor *fixed bed* atau *trickle bed reactor*, di mana fase gas (hidrogen dan sikloheksan) mengalir secara bersamaan melalui katalis padat. Pemilihan reaktor ini bertujuan untuk meningkatkan kontak antar fase serta efisiensi transfer massa antara gas-padat (Diao, et al., 2014).

Kondisi operasi proses biasanya berada pada suhu  $150-200^\circ\text{C}$  dan tekanan  $10-100$  atm, dengan tekanan yang lebih tinggi digunakan untuk meningkatkan kelarutan hidrogen dalam fase cair dan mempercepat laju reaksi. Rasio hidrogen yang digunakan umumnya

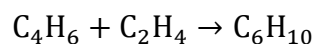
berlebih untuk mendorong reaksi ke arah produk. Selain itu, pengendalian suhu menjadi sangat penting karena kedua tahap reaksi bersifat eksotermis, sehingga diperlukan sistem pendinginan untuk menjaga kestabilan temperatur dan mencegah pembentukan produk samping.

#### 1.4.4 Reaksi Diels – Alder

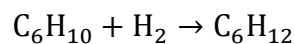
Reaksi Diels–Alder merupakan reaksi sikloadisi antara senyawa diena terkonjugasi dan dienofil yang menghasilkan senyawa siklik enam anggota (Brocksom et al., 2001). Diena yang umum digunakan adalah 1,3-Butadiena, 1,3-Cyclopentadiene, dan 1,3-Cyclohexaniene, sedangkan dienofil yang umum digunakan adalah ester, aldehida, keton, dan asam karboksilat. Dalam membentuk sikloheksana, reaksi ini melibatkan penggabungan sistem  $\pi$  dari diena (4 elektron  $\pi$ ) dan dienofil (2 elektron  $\pi$ ) untuk membentuk cincin baru. Secara umum, reaksi Diels–Alder dituliskan sebagai berikut:



Sebagai contoh, reaksi antara 1,3-Butadiena dan etena dapat menghasilkan senyawa sikloheksana dengan reaksi:



Produk yang dihasilkan umumnya berupa senyawa siklik tak jenuh (mengandung ikatan rangkap), sehingga untuk memperoleh senyawa jenuh seperti sikloheksana masih diperlukan tahap hidrogenasi lanjutan sesuai reaksi berikut:



Reaksi Diels–Alder biasanya berlangsung pada suhu 50–150°C dengan tekanan operasi 10–100 atm, tergantung pada jenis diena dan dienofil yang digunakan. Peningkatan suhu dan tekanan dapat mempercepat laju reaksi, namun berpotensi meningkatkan pembentukan produk samping. Tidak seperti reaksi hidrogenasi, reaksi Diels–Alder umumnya tidak memerlukan katalis logam, tetapi dalam beberapa kasus dapat menggunakan katalis asam Lewis untuk meningkatkan reaktivitas dienofil. Faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi ini meliputi struktur dan tingkat konjugasi diena, sifat elektrofilik dienofil, suhu operasi, serta waktu reaksi (Brocksom et al., 2001).

Berdasarkan uraian beberapa metode proses yang telah dijabarkan, masing-masing proses memiliki karakteristik yang berbeda, baik dari segi kondisi operasi, jenis reaktor, maupun efisiensi proses. Berikut adalah beberapa jenis proses dalam menghasilkan sikloheksana yaitu Hidrogenasi Benzena, Fraksinasi Minyak Mentah, Hidrogenolisis Sikloheksanon, dan reaksi diels alder. Oleh karena itu, diperlukan suatu perbandingan

untuk mengevaluasi kelebihan dan kekurangan dari setiap metode tersebut yang disajikan pada Tabel 1.7 Proses Pembuatan Sikloheksana

Tabel 1. 7 Proses Pembuatan Sikloheksana

| Parameter       | Proses Pembuatan Sikloheksana           |            |                            |                                              |                                |
|-----------------|-----------------------------------------|------------|----------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------|
|                 | Hidrogenasi Benzena                     |            | Fraksinasi Minyak Bumi     | Hidrogenasi dan Hidrogenolisis Sikloheksanon | Diels – Alder                  |
| Bahan Baku      | Benzena dan hidrogen                    |            | Naphta                     | Sikloheksanon dan hidrogen                   | Diena dan dienofil             |
| Pengotor        | Toulene (benzena) dan metana (hidrogen) |            | Fraksi berat minyak bumi   | Air, alkohol, asam                           | Air, alkohol, dan asam         |
| Jenis Reaktor   | <i>Fixed multitube</i>                  | <i>bed</i> | Kolom distilasi fraksional | <i>Fixed bed</i>                             | <i>Continuous Stirred Tank</i> |
| Temperatur (°C) | 150 – 250                               |            | 99 – 149                   | 150 – 250                                    | 50 – 150                       |
| Tekanan (atm)   | 10 – 26                                 |            | 3,74 – 4,42                | 10 – 100                                     | 10 – 100                       |
| Konversi (%)    | 99                                      |            | 85                         | 90                                           | 80 – 90                        |

Adapun kelebihan dan kekurangan masing-masing tipe proses pembentukan sikloheksana ditunjukkan oleh Tabel 1.8.

Tabel 1. 8 Kelebihan dan Kekurangan Proses Pembuatan Sikloheksana

| Jenis Proses             | Kelebihan                                    | Kekurangan                                                                  |
|--------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Hidrogenasi Benzena      | - Konversi dan selektivitas tinggi           | - Membutuhkan tekanan dan suhu relatif tinggi                               |
|                          | - Kemurnian produk tinggi                    | - Memerlukan katalis (biaya tambahan)                                       |
|                          | - Teknologi sudah matang (proses sudah umum) | - Reaksi berlangsung eksotermis sehingga memerlukan kontrol suhu yang ketat |
|                          | - Produk samping sangat umum                 |                                                                             |
| Fraksinasi Minyak Mentah | - Proses relatif sederhana                   | - Kemurnian produk rendah                                                   |
|                          | - Tidak memerlukan reaksi kimia tambahan     | - Banyak pengotor                                                           |
|                          |                                              | - Yield kecil apabila dimurnikan lebih lanjut                               |

|                                              | - Memanfaatkan bahan baku yang telah tersedia                                                                                                 | - Tidak ekonomis untuk produksi skala besar                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jenis Proses                                 | Kelebihan                                                                                                                                     | Kekurangan                                                                                                                                                                                                                                          |
| Hidrogenasi dan Hidrogenolisis Sikloheksanon | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Konversi cukup tinggi</li> <li>- Dapat menghasilkan produk dengan kemurnian baik</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Proses lebih kompleks karena dilakukan dalam dua tahap</li> <li>- Konsumsi hidrogen besar</li> <li>- Memerlukan kondisi tekanan tinggi</li> <li>- Biaya operasi lebih tinggi</li> </ul>                    |
| Reaksi Diels–Alder                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dapat membentuk cincin siklik secara langsung</li> <li>- Kondisi suhu relatif lebih kecil</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Produk awal tidak jenuh (perlu dilakukan hidrogenasi lanjutan)</li> <li>- Selektivitas lebih rendah</li> <li>- Banyak produk samping</li> <li>- Tidak umum digunakan dalam industri skala besar</li> </ul> |

### 1.5 Tinjauan Proses Secara Umum

Berdasarkan beberapa pilihan proses yang tersedia, dipilih proses hidrogenasi benzena untuk memproduksi sikloheksana karena sederhana, efisien, serta mampu menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi. Dalam proses ini, benzena ( $C_6H_6$ ) direaksikan dengan hidrogen ( $H_2$ ) berlebih menggunakan katalis logam, seperti nikel (Ni), platinum (Pt), ataupun paladium (Pd) yang umumnya didukung oleh material penyangga alumina ( $Al_2O_3$ ) yang dijabarkan pada Tabel 1.9 Reaksi berlangsung secara eksotermis dan dijalankan pada kondisi temperatur  $250^\circ C$  dan tekanan 10 atm untuk mencapai konversi yang optimal. Dibandingkan dengan metode lain, hidrogenasi benzena lebih unggul karena tidak memerlukan bahan baku antara, memiliki selektivitas tinggi, serta lebih ekonomis dan layak untuk diterapkan pada skala industri besar.

Tabel 1. 9 Jenis Katalis yang Umum Digunakan dalam Pembuatan Sikloheksana

| Parameter                         | Katalis Ni/ $Al_2O_3$ | Katalis Pt/ $Al_2O_3$ | Katalis Pd/ $Al_2O_3$ |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Fase operasi                      | Gas / cair            | Gas                   | Gas                   |
| Temperatur operasi ( $^\circ C$ ) | 150 – 250             | 100 – 200             | 120 – 200             |

|                                   |                                           |                                           |                                           |
|-----------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Tekanan operasi (atm)             | 10 – 30                                   | 10 – 20                                   | 10 – 20                                   |
| Parameter                         | Katalis Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Katalis Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Katalis Pd/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Aktivitas katalitik               | Tinggi                                    | Sangat tinggi                             | Tinggi                                    |
| Selektivitas ke sikloheksana (%)  | 95 – 98                                   | >99                                       | >99                                       |
| Konversi benzena (%)              | 90 – 98                                   | >99                                       | 95 – 99                                   |
| Ketahanan terhadap senyawa sulfur | Rendah (mudah teracuni)                   | Tinggi                                    | Tinggi                                    |
| Mekanisme                         | Adsorpsi – disosiasi H <sub>2</sub> kuat  | Adsorpsi permukaan sangat efisien         | Mirip dengan Pt namun sedikit lebih lemah |
| Deaktivasi                        | Sintering, poisoning                      | Sintering (lebih stabil)                  | Poisoning ringan                          |
| Regenerasi                        | Bisa (reduksi ulang)                      | Lebih mudah                               | Mudah                                     |
| Umur katalis                      | Sedang                                    | Panjang                                   | Panjang                                   |
| Biaya                             | Rendah                                    | Sangat tinggi                             | Tinggi                                    |

Pemilihan katalis dalam proses hidrogenasi benzena menjadi sikloheksana didasarkan pada pertimbangan aktivitas, selektivitas, stabilitas, serta aspek ekonomi. Katalis yang paling umum digunakan di industri adalah nikel alumina (Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) karena dapat memberikan konversi dan selektivitas yang tinggi terhadap sikloheksana dengan biaya yang relatif rendah dibandingkan katalis logam mulia lainnya. Selain itu, penggunaan penyangga Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> meningkatkan luas permukaan aktif serta stabilitas katalis selama operasi. Meskipun lebih rentan terhadap deaktivasi akibat pengotor seperti senyawa sulfur, hal tersebut dapat diatasi dengan pemurnian umpan terlebih dahulu.

Proses hidrogenasi benzena dapat dilakukan dalam fase cair maupun fase gas dengan perbedaan utama pada kompleksitas proses dan kinerja reaksi. Pada fase cair, keterbatasan kelarutan hidrogen menyebabkan laju reaksi rendah sehingga untuk mencapai konversi tinggi diperlukan beberapa tahap reaktor dan separator, yang meningkatkan jumlah peralatan serta kebutuhan energi untuk sirkulasi dan kompresi gas. Sebaliknya, pada fase gas tidak terdapat hambatan kelarutan sehingga perpindahan massa lebih cepat dan konversi tinggi dapat dicapai dalam satu reaktor, sehingga konfigurasi proses lebih sederhana dan efisien. Oleh karena itu,

dipilih proses hidrogenasi benzena berfase gas karena mampu memberikan konversi yang lebih tinggi dengan sistem proses yang lebih sederhana dan efisien secara keseluruhan.