

BAB I

PENDAHULUAN

Latar Belakang Pendirian Pabrik

Sebagai salah satu negara berkembang yang ada di dunia, Indonesia mempunyai kemampuan mencapai pembangunan nasional dalam berbagai lingkup yang sejalan dengan rencana pembangunan, terutama dalam mendorong kemajuan negara menuju bangsa yang adil dan merata. Pembangunan di berbagai bidang kehidupan perlu diselenggarakan agar masyarakat dapat memajukan bangsa yang sejahtera. Pencapaian rencana pembangunan nasional perlu mendorong pembangunan, termasuk memprioritaskan pembangunan industri. Sektor industri memiliki peran yang sangat signifikan dalam meningkatkan kedaulatan dan daya saing ekonomi nasional, baik di tingkat dalam negeri maupun internasional. Di samping itu, keuntungan secara langsung dari perkembangan industri adalah terwujudnya peluang pekerjaan bagi warga Indonesia dan merangsang pertumbuhan kegiatan dalam berbagai sektor pembangunan lainnya (Akbar, 2022).

Salah satu sektor industri yang berkembang cukup pesat adalah industri kimia dan salah satu kebutuhan kimia yang semakin meningkat adalah asam fenil asetat karena banyak pabrik kimia yang membutuhkan asam fenil asetat sebagai bahan pembantu. Pabrik asam fenil asetat didirikan guna memenuhi kebutuhan industri kimia yang meningkat dan untuk mengurangi impor asam fenil asetat ke Indonesia. Salah satu bahan kimia yang dibutuhkan pada industri farmasi, produksi tanaman, dan parfum adalah asam fenil asetat (Cassar et al, 1978).

Asam fenil asetat merupakan salah satu bahan kimia yang diperlukan dalam memenuhi kebutuhan pabrik kimia khususnya digunakan sebagai bahan baku atau bahan pembantu. Asam fenil asetat digunakan sebagai bahan baku *penicilin*, juga digunakan sebagai produksi *phenylacetone* yang diperlukan untuk produksi *amphetamine* yaitu salah satu obat golongan stimulan. Asam fenil asetat juga digunakan sebagai bahan pembantu dalam industri parfum dan aroma, misal *methyl phenylacetic* beraroma mawar dan madu, *ethyl phenylacetic acid* beraroma madu, *amyl phenylacetic acid* beraroma coklat. Dalam bidang pertanian, asam fenil asetat

digunakan untuk pembuatan *ratisida*, *regulator* pertumbuhan tanaman. Dalam bidang farmasi, asam fenil asetat digunakan sebagai bahan baku pembuatan *anesthetic*, *analgesic*, dan obat pembunuh kuman (Oktavian et al, 2020).

Penentuan Kapasitas Pabrik

I.1.1. Data Ekspor Impor

Tabel I. 1. Impor Produk di Indonesia

No	Tahun	Impor (ton)	perkembangan
1	2017	2.018	-
2	2018	3.901	0,9331
3	2019	2.578	0,2775
4	2020	1.353	-0,3295
5	2021	1.351	-0,3305
6	2022	3.380	0,6749
7	Total		1,2255
8	Rata-rata peningkatan pertahun		0,2451

Sumber: <https://www.bps.go.id> Tahun 2017-2022.

Dari Tabel I.1 diatas, dapat diperkirakan kebutuhan impor asam fenil asetat diindonesia pada tahun 2028 adalah:

$$\begin{aligned}
 F &= F_o (1 + i)^n \\
 &= 3.380 (1 + 0,2451)^6 \\
 &= 12.593,0191 \text{ ton/tahun} \\
 &= 15.000 \text{ ton/tahun}
 \end{aligned}$$

Dimana:

F = Perkiraan kebutuhan asam fenil asetat tahun 2028

F_o = Kebutuhan asam fenil asetat pada tahun terakhir (2022)

i = Perkembangan rata-rata

n = Selisih tahun terakhir dan perancangan

(Peter and Timmerhous, 1991)

Dari hasil perhitungan yang didapatkan pada kebutuhan asam fenil asetat di Indonesia pada tahun 2028 yaitu sebesar 15.000 Ton/tahun

I.1.2. Kapasitas Pabrik yang Sudah Berdiri

Daftar data kapasitas produksi pabrik Asam Fenil Asetat di dunia, ditunjukkan pada tabel berikut:

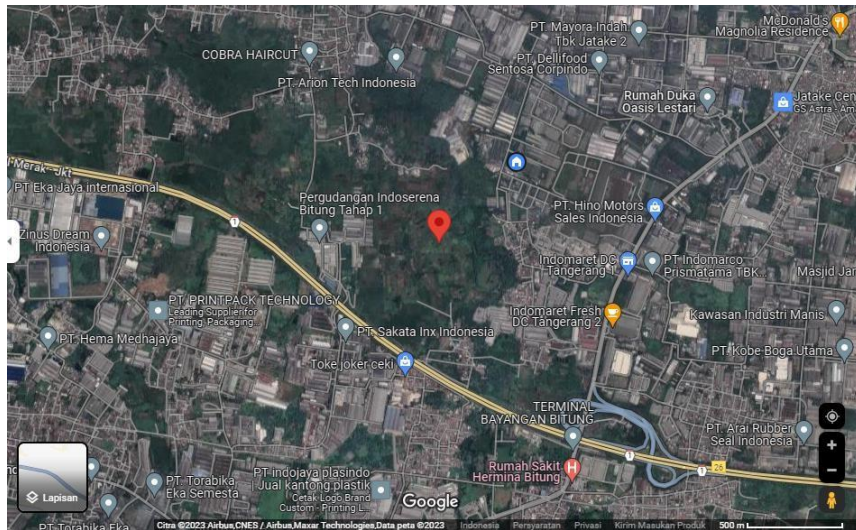
Tabel I. 2. Kapasitas Pabrik Asam Fenil Asetat yang Telah Berdiri

No	Produsen	Negara	Kapasitas (ton/tahun)
1	Jiangyin Beiguo Inorganic Chemical Plant	Hebei, China	1.500
2	Shantou Electrochemical Plant	Hebei, China	1.000
3	Taixing Deyuan Fine Chemical	Maharashtra, India	3.000
4	Suihua Chemical Plant	Anhui, China	6.000

Berdasarkan permintaan produk luar negeri dan data kapasitas pabrik di atas, kapasitas pabrik akan dirancang sebesar 15.000 ton per tahun. Tujuan didirikannya pabrik asam fenil asetat digunakan agar memenuhi permintaan dalam negeri maupun luar negeri. Jadi sisa dari kapasitas produksi asam fenil asetat ini dapat di ekspor keluar negeri yang membutuhkan asam fenil asetat.

Pemilihan Lokasi Pabrik

Penentuan lokasi untuk membangun pabrik industri merupakan salah satu komponen dalam keputusan untuk membangun pabrik. Karena penataan kawasan sangat menentukan keberhasilan dan perkembangan lini produksi dalam sektor perekonomian serta kesejahteraan pabrik dimasa yang akan datang sehingga dapat menciptakan keberlangsungan yang lebih maju. Lokasi yang harus diperhatikan dalam upaya memberikan manfaat yang besar dalam suatu perusahaan. Berdasarkan pemikiran beberapa komponen yang ada, maka dipilihlah lokasi pendirian pabrik asam fenil asetat di wilayah industri, Tangerang, Banten. Untuk peta lokasi produksi dapat dilihat pada Gambar 1.2 di bawah ini.



Gambar I. 1 Lokasi Pendirian Pabrik

Berikut lokasi Pabrik asam fenil asetat pada kawasan industri daerah Tangerang, Banten dengan pertimbangan, yaitu:

1. Ketersediaan bahan baku

Bahan mentah berupa benzil sianida bersumber dari Shanghai RICHEM International Co., Ltd., China, Sebuah Perusahaan yang terlibat dalam produksi dan penyediaan bahan kimia di India. Sementara itu, untuk bahan mentah asam sulfat didapatkan dari PT Indonesian Acids Industry Ltd, Pulogadung, Jakarta Timur. Untuk menjamin pasokan bahan baku yang konsisten, pabrik dibangun di Kawasan Tangerang, dekat dengan Pelabuhan Merak di Banten.

2. Wilayah pemasaran produk

Terletak di Kawasan industri Tangerang, Banten, dengan tujuan untuk meminimalkan jarak distribusi produk antara pabrik asam fenil asetat dengan pabrik lini produksi pembeli seperti PT Darya Varia Laboratoria Tbk, PT Kalbe Farma Tbk, PT Griff Prima Abad serta yang tertera dalam tabel yang berada di bawah ini.

Tabel I. 3. Pabrik yang memproduksi *Penicilin*, Parfum, dan Pestisida

Industri	Lokasi	Produk
PT Kalbe Farma Tbk. Bekasi, Jawa Barat,	Bekasi, Jawa Barat, Indonesia	<i>Penicillin</i> ,
PT Darya Varia Laboratoria	Surabaya, Jawa Timur, Indonesia	<i>Penicillin</i>
PT Griff Prima Abadi	Tangerang, Banten, Indonesia	Parfum
PT Priskila	Sidoarjo, Jawa Timur, Indonesia	Parfum
PT Sumber Makmur Agroindo	Surabaya, Jawa Timur, Indonesia	Pestisida
PT Petrosida Gresik	Gresik, Jawa Timur, Indonesia	Pestisida
Zhuhai United Laboratories Co., Ltd	Guangdong, China	<i>Penicillin</i>
Shanghai CIE Chemical Co., Ltd.	Shanghai, China	Pestisida
Agricore Chemical Industry Co., Ltd	Jiangsu, China	Pestisida
Beacons Pharmaceuticals Pte Ltd	Singapura	<i>Penicillin</i>
Les Arome Fragrances International Pte Ltd	Singapura	Parfum
Asiatic Agricultural Industries Pte Ltd	Singapura	Pestisida

3. Penyediaan bahan bakar dan energi

Kawasan industri Tangerang, Banten, memudahkan perolehan sumber energi guna bahan bakar generator yang ada di pabrik, sementara kebutuhan listrik untuk berbagai mekanisme dan kebutuhan kantor dipasok oleh PLN.

4. Fasilitas transportasi

Sarana transportasi darat sudah dilengkapi dengan peralatan yang memadai, sehingga pengiriman barang ke dan dari pabrik menggunakan transportasi darat tidak mengalami kesulitan. Wilayah ini berdekatan

dekat dengan Pelabuhan Merak yang membuat transportasi laut berjalan dengan lancar.

5. Ketersediaan pekerja

Ketersediaan pekerja yang memiliki kualifikasi berasal dari lulusan universitas yang ada Indonesia, untuk pekerja operator dapat menerima dari wilayah setempat, agar sumber daya manusia (SDM) setempat dapat dimanfaatkan dengan baik dan membantu penurunan tingkat pengangguran.

6. Pasokan utilitas

Kebutuhan akan air terpenuhi melalui pengambilan dari Sungai Ciujung dan pasokan air diperoleh dari Badan Usaha Milik Daerah (BUMD) di wilayah Tangerang.

7. Lingkungan

Karena terletak di wilayah industri, aspek hukum serta regulasi administratif tidak menjadi penghalang. Setelah menjalani studi kelayakan Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL), permasalahan kontaminasi yang ditimbulkan akibat jalur produksi, termasuk polusi suara, air, dan udara, dapat diatasi.

Tinjauan Pustaka

Asam fenil asetat adalah senyawa ester yang ditemukan oleh Cannizzaro pada tahun 1855 dalam minyak Neroli (blossom orange) yang diproduksi oleh Japanese Peppermint Oil yang mempunyai titik didih tinggi. Kebutuhan akan asam fenil asetat meningkat setelah ditemukannya penicillin dan flemming. Asam fenil asetat mempunyai bau yang khas dan berbentuk kristal putih. Asam fenil asetat murni banyak digunakan dalam pembuatan penicillin dan hanya sedikit yang digunakan dalam pembuatan parfum. Dalam keadaan murni, asam fenil asetat digolongkan sebagai toxic dan berbahaya apabila terkena kulit (Kirk & Othmer, 1979)

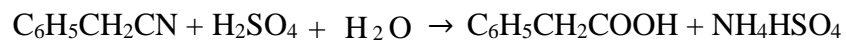
I.1.3. Dasar Reaksi

Reaksi yang menghasilkan asam fenil asetat terdiri dari beberapa proses,

diantaranya:

1. Asam fenil asetat dari Benzil Sianida dan Asam sulfat

Asam fenil asetat diproduksi dari reaksi benzil sianida, asam sulfat, dan air dengan proses pengadukan homogen. Reaksi:

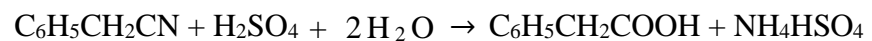


Dengan kondisi operasi pada suhu 100 °C dengan tekanan atmosfer, reaksi berlangsung selama 3 jam dalam reaktor alir tangka berpengaduk. Konversi reaksi asam fenil asetat diperoleh 80% dengan perbandingan bahan benzil sianida : asam sulfat 98% dan air adalah 1 : 1,2 : 1,6 (Adams, 1941).

Potensial Ekonomi:

$$EP = (\text{Value of product}) - (\text{Raw material cost})$$

(Smith, 1995)



Produk :	1	1	2	1	1
Mula mula :	1,25	1,5	2,054	-	-
Bereaksi :	1	1	2	1	1
Sisa :	0,25	0,5	0,054	1	1

Nilai mula-mula didapatkan dari perbandingan produk atau koefisien dengan konversi produk yang didapatkan yaitu sebesar 80%. Kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan harga dengan satuan \$/kgmol dengan mengalikan nilai mula-mula dengan berat molekul bahan baku. Melalui perhitungan didapatkan data sebagai berikut.

Tabel I. 4. Data harga untuk bahan baku dan produk proses I

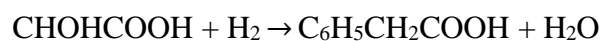
Material	BM (kg/kmol)	Harga Beli (\$/kg)	Harga (\$/kg mol)
C ₆ H ₅ CH ₂ CN	117	0,7	102,375
C ₆ H ₅ CH ₂ COOH	136	8	1.088
NH ₄ HSO ₄	115	-	-
H ₂ SO ₄	98	0,3	44,1
H ₂ O	18	-	-

$$EP = (\text{Harga produk} \times \text{BM}) - (\text{Harga bahan baku} \times \text{BM})$$

$$\begin{aligned} EP &= \$ (136 \times 8) - [\$ (146,25 \times 0,7) + \$ (147 \times 0,3)] \\ &= \$ 941,525 \text{ kg/mol} \end{aligned}$$

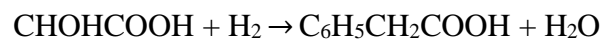
2. Asam Fenil Asetat dan Asam Mandelik

Asam Fenil Asetat dibuat dengan mereaksikan Mandelic Acid dengan proses hidrogenasi menggunakan katalis *Potassium Iodide*, *Red Phosphorus* dan *Phosphoric Acid*. Reaksi:



Kondisi operasi pada proses ini dengan tekanan atmosfer dan dengan temperatur 200 °C dalam reaktor fluized bed. Konversi yang dihasilkan dengan bahan *Mandelic Acid* sebesar 75% (Erowid, 2005).

Potensial Ekonomi:



Produk : 1 1 1 1

Mula mula : 1,3 0,67 - -

Bereaksi : 1 1 1 1

Sisa : 0,3 0,33 1 1

Nilai mula-mula didapatkan dari perbandingan produk atau koefisien dengan konversi produk yang didapatkan yaitu sebesar 75%. Kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan harga dengan satuan \$/kgmol dengan mengalikan nilai mula-mula dengan berat molekul bahan baku. Melalui perhitungan didapatkan data sebagai berikut.

Tabel I. 5 Data harga untuk bahan baku dan produk proses II

Material	BM (kg/kmol)	Harga Beli (\$/kg)	Harga (\$/kgmol)
C ₆ H ₅ CH ₂ COOH	136	8	1.088
H ₂	2	0,6	80,4
C ₆ H ₅ CHOHCOOH	152	3	592,8
H ₂ O	18	-	-

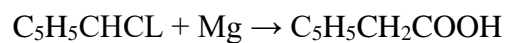
$$EP = (\text{Harga produk} \times \text{BM}) - (\text{Harga bahan baku} \times \text{BM})$$

$$EP = \$ (136 \times 8) - [\$ (1,34 \times 0,6) + \$ (197,6 \times 3)]$$

$$= \$ 494,4 \text{ kgmol}$$

3. Asam Fenil Asetat dari Benzil Klorida dan Magnesium

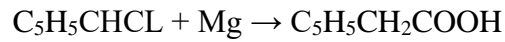
Asam fenil asetat diproduksi dengan mereaksikan larutan benzil klorida 10% dan magnesium kemudian ditambahkan kristal iodin. Reaksi:



Reaksi yang terjadi pada proses tersebut adalah reaksi Grignard dengan pengadukan homogen hingga magnesium larut sempurna. Kondisi operasi pada proses ini dengan temperature 200°C dan tekanan atmosfer. Pengadukan dilakukan selama 2 jam dalam reaktor fluized bed dengan penambahan 1 kg air suling dan CO₂ sebagai larutan pereaksi Grignard, sekaligus ditambahkan eter sekaligus dilakukan pemanasan. Lalu difiltrasi dimana komponen organik dipisahkan, kemudian produk tersebut dicuci dengan air dan dikeringkan. Hasil konversi asam fenil asetat dengan bahan

baku benzil klorida dan magnesium sebesar 75% (Erowid, 2004).

Potensial Ekonomi:



Produk :	1	1	1
Mula mula :	7,06	1,3	-
Bereaksi :	1	1	1
Sisa :	6,6	0,3	-

Nilai mula-mula didapatkan dari perbandingan produk atau koefisien dengan konversi produk yang didapatkan yaitu sebesar 75%. Kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan harga dengan satuan \$/kgmol dengan mengalikan nilai mula-mula dengan berat molekul bahan baku. Melalui perhitungan didapatkan data sebagai berikut.

Tabel I. 6 Data harga untuk bahan baku dan produk proses III

Material	BM (kg/kmol)	Harga Beli (\$/kg)	BM x Harga (\$/kgmol)
$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{COOH}$	136	8	1088
$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{Cl}$	128,6	1,2	1089,48
Mg	24,3	3,3	104,28
H_2O	18	-	-

$$\text{EP} = \$ (136 \times 8) - [\$ (907,9 \times 1,2) + \$ (31,6 \times 3,3)]$$

$$= \$ 148,4 \text{ kgmol}$$

Dari kriteria penelitian, diberikan angka 1-4 dengan untuk setiap kriterianya. Berikut data tinjauan disajikan pada Tabel.I.7.

Tabel I. 7 Tinjauan Dasar Penilaian Kriteria

No	Kriteria Penelitian	Dasar Tinjauan	Nilai
1.	Jenis Reaktor	Berdasarkan tinjauan kinetika, pembuatan Asam Fenil Asetat merupakan reaksi Eksoterm, (mengeluarkan panas) sehingga perlu perhatian terhadap pengontrolan suhu. Reaktor Alir Tangki Berpengaduk cocok untuk reaksi yang memerlukan kontrol suhu.	4
2.	Tekanan	Berdasarkan Smith (2007), Pada umumnya pembuatan Asam Fenil Asetat melibatkan reaksi kimia yang tidak memerlukan tekanan tinggi, walaupun untuk beberapa kondisi tekanan dapat bervariasi tergantung pada metode sintesis yang digunakan. Melihat dari sisi keamanannya bagi alat proses, tekanan rendah lebih dipilih.	4

No	Kriteria Penilaian	Dasar Tinjauan	Nilai
3.	Katalisator	Secara umum, proses yang menggunakan katalis hampir selalu dipilih karena memberikan banyak keuntungan dalam hal efisiensi, selektivitas, kondisi operasi, dan keberlanjutan. Sehingga dalam hal memilih antara proses dengan atau tanpa katalis, proses dengan katalis biasanya merupakan pilihan yang lebih baik.	4
4.	Temperatur	Berdasarkan Erowid 2005, pembuatan Asam Fenil Asetat berkisar dari 77-100 °C.	4
5.	Fasa	Meninjau Smith (2007), dalam pembuatan Asam Fenil Asetat, penggunaan fase cair-cair menghasilkan homogenitas yang efektif, kemudahan dalam pengontrolan suhu dan tekanan, serta efisiensinya berdasarkan jenis reaksinya yaitu Hidrolisis Asam.	4
6.	Yield	Merujuk ke Erowid (2004), dari ketiga proses yield tertinggi yang didapatkan yaitu pada proses hidrolisis asam.	4
7.	EP	Berdasarkan hasil perhitungan, EP tertinggi didapatkan pada proses I.	4

Tabel I. 8 Perbandingan Proses Pembuatan Asam Fenil Asetat

No	Kriteria Penilaian	Proses I		Proses II	Proses III		
		Hidrolisis (Kamm dan Mathews, 1941)	Nilai	Hidrogenasi (Erowid, 2005)	Nilai	Karbonilasi (Erowid, 2004)	Nilai
1.	Reaktor	RATB	4	Fluized Bed	3	Fluized Bed	3
2.	Tekanan	1 atm	4	1 atm	4	1 atm	4
3.	Katalisator	-	3	<i>Potassium Iodide, Red Phosphorus dan Phosphoric Acid.</i>	4	kristal iodin	4
4.	Temperatur	100 °C	4	200 °C	3	200 °C	3
5.	Fasa	Cair	4	Gas dan Padat	3	Gas dan Padat	3
6.	Yield	80%	4	75%	3	75%	3
7.	EP	\$ 979,7	4	\$ 620	3	\$ 853,49	2
Total nilai			28		23		21

Keterangan nilai :

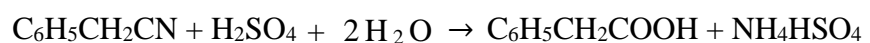
1 = sangat kurang 3 = cukup
 2 = kurang 4 = baik

Berdasarkan peninjauan perbandingan ketiga proses tersebut, maka proses yang digunakan adalah proses I yaitu proses kontinyu cair cair dalam Reaktor Alir Tangki Berpengaduk, dengan beberapa pertimbangan sebagai berikut:

1. Suhu reaktor tidak terlalu tinggi
2. Yield yang didapatkan tinggi
3. Bahan baku mudah didapat
4. Memiliki nilai EP yang lebih besar daripada Proses II & Proses III

I.1.4. Tinjauan Kinetika

Reaksi yang terjadi:



Perbandingan antara benzil sianida, asam sulfat, dan air adalah 1 : 1,2 : 1,6. Disini, H₂O dianggap sebagai *excess* atau pereaksi berlebih, sehingga reaksi dianggap berorde 2 (Cumming, 1937).

Dengan kecepatan reaksi:

$$(-r_A) = k \cdot C_A \cdot C_B, \text{ kgmol/m}^3 \text{ jam}$$

$$C_A = \text{konsentrasi C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{CN, kgmol/m}^3$$

$$C_B = \text{konsentrasi H}_2\text{SO}_4, \text{ kmol/m}^3$$

$$k = \text{konstanta kecepatan reaksi}$$

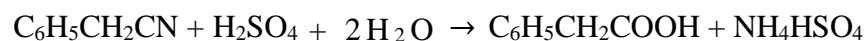
$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = \frac{dC_B}{dt} k \cdot C_A \cdot C_B$$

(Levenspiel, 1999)

Tinjauan secara kinetika untuk mengetahui pengaruh perubahan suhu terhadap kecepatan reaksi. Berdasarkan Adams & Thal (1941) kondisi operasi proses dengan mencampur 700 gram benzil sianida, 1,15 liter air, dan 0,84 liter asam sulfat 98%, C_{A0} sebesar 3,9252, C_{B0} sebesar 4,7112. Dengan waktu operasi 3 jam, konversi yang dihasilkan 80 %. Dengan data tersebut, diperoleh nilai k sebesar 0,840 m²/kmol.jam.

I.1.5. Tinjauan Termodinamika

Dalam tinjauan termodinamika dilakukan untuk menentukan jenis reaksi apakah endotermis atau eksotermis dan arah reaksi (*reversible* atau *irreversible*). Dapat dihitung panas pembentukan standar (ΔH°_f) pada P = 1 atmosfer dan T = 298 K digunakan untuk menentukan reaksi yang terjadi:



Nilai ΔH°_r dari tiap komponen pada $T = 373,15$ K disajikan pada tabel dibawah ini:

Tabel I. 8 Nilai (ΔH°_f) dari Tiap Komponen pada Suhu 298 K

Komponen	ΔH°_f (kJ/mol)
$C_6H_5CH_2CN$	156,6
H_2SO_4	-813,989
H_2O	-285,83
$C_6H_5CH_2COOH$	-322,8
NH_4HSO_4	-1.026,96

(Yaws, 1999)

Nilai ΔG°_f masing-masing komponen di $T = 298$ K disajikan pada tabel dibawah ini:

Tabel I. 9 Nilai (ΔH°_f) dari Tiap Komponen pada Suhu 373,15 K

Komponen	ΔH°_f (kJ/mol)
$C_6H_5CH_2CN$	293,254
H_2SO_4	-742,590
H_2O	-197,735
$C_6H_5CH_2COOH$	-275,798
NH_4HSO_4	-956,707

$$\begin{aligned}\Delta H_{373,15} &= \sum \Delta H \text{ produk} - \sum \Delta H \text{ reaktan} \\ &= ((-275,798) + (-956,707)) - (293,254 + (-742,590) + 2*(-197,735)) \\ &= -390,699 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

Nilai ΔH°_r yang didapatkan negatif, maka jenis reaksi bersifat eksotermik. Energi bebas Gibbs (ΔG) digunakan untuk menentukan apakah suatu reaksi akan terjadi secara spontan, tidak spontan, atau mencapai kesetimbangan. Apabila nilai ΔG negatif, menunjukkan bahwa reaksi tersebut akan berlangsung secara spontan. Sebaliknya, jika nilai ΔG positif, menandakan bahwa reaksi akan bersifat tidak spontan. Sementara itu, jika nilai ΔG sama dengan nol, maka reaksi dianggap berada dalam keadaan kesetimbangan.

Nilai ΔG°_f masing-masing komponen di $T = 298$ K disajikan pada tabel dibawah ini:

Tabel I. 10 Nilai ΔG°_f Masing-masing komponen

Komponen	ΔG°_f (kJ/mol)
$C_6H_5CH_2CN$	237,30
H_2SO_4	-689,9
H_2O	-237,129
$C_6H_5CH_2COOH$	-213,35
NH_4HSO_4	-835,38

(Yaws,199)

Persamaan:

$$\Delta G^\circ = \sum(n\Delta G^\circ_f) \text{ produk} - \sum(n\Delta G^\circ_f) \text{ reaktan}$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K$$

$$K = \exp(\Delta G^\circ/RT)$$

Dimana:

 ΔG° : Energi Gibbs keadaan standar (kJ.mol)R : Konstanta gas ($8,314 \times 10^{-3}$ kJ/mol K)K : Konstanta kesetimbangan pada $T = 298$ K

(Smith & Ness, 1975)

Maka:

$$\begin{aligned} \Delta G^\circ &= \sum(n\Delta G^\circ_f) \text{ produk} - \sum(n\Delta G^\circ_f) \text{ reaktan} \\ &= (-213,35 + (-835,38)) - (237,30 + (689,9) + (2*(-237,129))) \\ &= -121,872 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

Pada $T = 298,15$ K, konstanta kesetimbangannya adalah:

$$\begin{aligned} \ln K &= \frac{\Delta G}{RT} \\ \ln K &= \frac{121.872 \frac{J}{mol}}{8.314 \frac{J}{mol} \times 298.15 K} \\ \ln K &= 49.1653 \\ K &= 2.25 \times 10^{21} \end{aligned}$$

Untuk harga tetapan kesetimbangan pada $T = 373,15$ K

$$\ln\left(\frac{K}{K_1}\right) = \frac{\Delta H^\circ}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)$$

$$\ln \frac{K}{2.25E + 21} = \frac{120.711 \frac{J}{mol}}{8.314 \frac{J}{mol}} \left(\frac{1}{373.15} - \frac{1}{298.15} \right)$$

$$\ln \frac{K}{2.25E + 21} = 9.7877$$

$$K = 2.20 \times 10^{20}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai K jauh melebihi angka 1, mengindikasikan bahwa reaksi tersebut bersifat satu arah (*irreversible*).