

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketersediaan bahan kimia intermediet menjadi salah satu faktor penting dalam mendukung kelangsungan berbagai sektor industri hilir. Senyawa intermediet banyak digunakan sebagai bahan baku utama maupun bahan penunjang dalam proses produksi, sehingga peningkatan aktivitas industri secara langsung berpengaruh terhadap kebutuhan bahan kimia tersebut. Beberapa sektor seperti pengolahan gas, petrokimia, deterjen, kosmetik, farmasi, dan produk perawatan diri membutuhkan pasokan bahan kimia yang stabil agar proses produksi dapat berlangsung secara berkelanjutan. Oleh karena itu, pemenuhan kebutuhan senyawa intermediet di dalam negeri menjadi aspek penting dalam upaya mengurangi ketergantungan impor dan meningkatkan daya saing industri nasional.

Monoethanolamine merupakan senyawa alkanolamina dengan rumus molekul C_2H_7NO yang banyak digunakan dalam berbagai proses industri. Dalam industri pengolahan gas, MEA dikenal sebagai salah satu pelarut amina yang umum digunakan untuk proses absorpsi gas asam, khususnya karbon dioksida (CO_2). Penggunaan MEA dalam proses penyerapan CO_2 didasarkan pada kemampuannya bereaksi dengan gas asam sehingga efektif digunakan dalam proses pemurnian gas alam maupun pengendalian emisi gas buang. Luis (2016) menjelaskan bahwa MEA merupakan salah satu pelarut utama dalam teknologi penangkapan CO_2 karena memiliki reaktivitas tinggi terhadap CO_2 , meskipun proses regenerasinya masih memerlukan energi yang cukup besar.

Selain digunakan sebagai penyerap gas asam, MEA juga dimanfaatkan dalam berbagai industri hilir. Dalam industri kosmetik dan produk perawatan diri, ethanolamine dan garam turunannya digunakan sebagai bahan pengatur pH, surfaktan, hair fixative, maupun bahan tambahan fungsional lainnya. Fiume et al. (2015) menyatakan bahwa ethanolamine berfungsi sebagai pH adjuster, sedangkan beberapa garam ethanolamine dapat digunakan sebagai surfaktan, bahan pengawet, dan bahan pembentuk karakteristik tertentu dalam formulasi kosmetik. Hal ini menunjukkan bahwa MEA memiliki peranan yang cukup luas, tidak hanya pada industri pengolahan gas, tetapi juga pada sektor deterjen, kosmetik, farmasi, dan produk kimia lainnya.

Secara industri, monoethanolamine diproduksi melalui reaksi antara etilen oksida dan amonia. Reaksi tersebut menghasilkan campuran produk berupa monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), dan triethanolamine (TEA). Liu et al. (2020) menjelaskan bahwa proses produksi ethanolamine dari etilen oksida dan amonia dapat dilakukan melalui sistem reactive distillation untuk meningkatkan selektivitas produk dan mengevaluasi konsumsi energi proses. Selain itu, Frauenkron et al. (2012) menyebutkan bahwa kelompok ethanolamine, termasuk MEA, DEA, dan TEA, merupakan senyawa penting dalam industri kimia karena memiliki aplikasi luas dan diproduksi secara komersial dari bahan baku amonia dan etilen oksida.

Keberadaan produk samping berupa diethanolamine (DEA) dan triethanolamine (TEA) menjadi salah satu keunggulan dalam perancangan pabrik monoethanolamine. DEA dan TEA masih termasuk kelompok ethanolamine yang memiliki nilai guna dan nilai ekonomi dalam berbagai aplikasi industri, seperti bahan penyerap gas, surfaktan, bahan tambahan formulasi kimia, serta bahan antara dalam proses produksi lainnya. Dengan demikian, pembentukan DEA dan TEA tidak hanya dipandang sebagai hasil samping reaksi, tetapi juga sebagai produk bernilai ekonomi yang dapat meningkatkan potensi kelayakan pendirian pabrik.

Di Indonesia, kebutuhan monoethanolamine masih sangat bergantung pada impor karena belum tersedianya fasilitas produksi MEA yang beroperasi secara komersial dalam skala industri. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik periode 2020–2025, volume impor monoethanolamine Indonesia mencapai rata-rata sekitar 2.086,83 ton per tahun dengan laju pertumbuhan tahunan sekitar 3,46%. Kondisi ini menunjukkan bahwa kebutuhan MEA di dalam negeri masih cukup tinggi dan cenderung meningkat, sedangkan pemenuhannya belum didukung oleh kapasitas produksi domestik. Ketergantungan terhadap impor tersebut dapat menimbulkan risiko terhadap kestabilan pasokan, fluktuasi harga, serta ketahanan bahan baku bagi industri pengguna MEA.

Berdasarkan luasnya aplikasi monoethanolamine, meningkatnya kebutuhan nasional, serta masih tingginya ketergantungan Indonesia terhadap impor, pendirian pabrik monoethanolamine di dalam negeri menjadi langkah yang strategis. Selain itu, ketersediaan bahan baku utama berupa amonia dan etilen oksida dari sektor petrokimia memberikan peluang bagi pengembangan industri ethanolamine nasional. Pendirian pabrik ini diharapkan mampu mengurangi ketergantungan impor, menjamin ketersediaan bahan baku bagi industri pengolahan gas, deterjen, kosmetik, dan farmasi, serta meningkatkan nilai tambah industri kimia nasional. Oleh karena itu, perancangan pabrik

monoethanolamine perlu dilakukan dengan mempertimbangkan kebutuhan pasar, ketersediaan bahan baku, teknologi proses, serta kondisi industri di Indonesia.

1.2 Kapasitas Rancangan

Penentuan kapasitas produksi suatu pabrik perlu dilakukan secara komprehensif dengan mempertimbangkan berbagai aspek, terutama aspek teknis dan ekonomi, serta kapasitas minimum yang masih layak untuk direalisasikan. Dari sisi teknis, faktor yang menjadi perhatian utama meliputi potensi pasar dan ketersediaan bahan baku, baik yang berasal dari dalam negeri maupun impor. Kapasitas pabrik yang dirancang diharapkan berada pada tingkat yang sebanding atau lebih besar dibandingkan dengan kapasitas pabrik sejenis yang telah beroperasi, sehingga pabrik mampu beroperasi secara efisien dan memiliki daya saing. Oleh karena itu, terdapat beberapa faktor utama yang perlu dikaji dalam penentuan kapasitas pabrik monoethanolamine.

1.2.1 Kebutuhan MEA di Indonesia

Kebutuhan monoethanolamine di Indonesia menunjukkan kecenderungan meningkat dari tahun ke tahun, sebagaimana ditunjukkan oleh data impor MEA yang disajikan pada Tabel 1.1.

Tabel 1. 1 Data Impor Monoethanolamine (MEA) di Indonesia

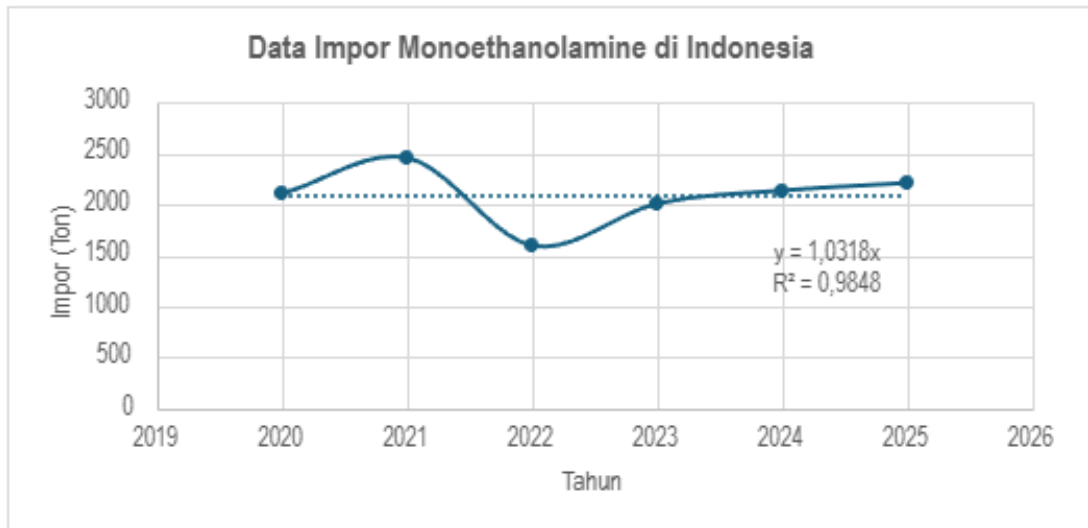
(Badan Pusat Statistik, 2025)

Tahun	Impor (Ton)
2020	2107,376
2021	2456,806
2022	1595,919
2023	2011,404
2024	2137,706
2025	2211,745

Data tersebut menunjukkan bahwa hingga saat ini pemenuhan kebutuhan monoethanolamine di Indonesia masih sangat bergantung pada produk impor, terutama yang berasal dari kawasan Eropa dan Asia. Berdasarkan Tabel 1.1, volume impor MEA secara umum mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Kondisi ini disebabkan oleh belum adanya pabrik monoethanolamine yang beroperasi pada skala industri di dalam negeri, sementara kebutuhan MEA di berbagai sektor industri terus berkembang.

Oleh karena itu, data impor MEA pada Tabel 1.1 digunakan sebagai dasar untuk memproyeksikan kebutuhan monoethanolamine di masa mendatang. Data tersebut selanjutnya diplotkan dalam bentuk grafik, sebagaimana ditunjukkan pada

Gambar 1. 1



Gambar 1. 2 Data Impor Monoethanolamine di Indonesia

Dengan menggunakan metode *least square*, diperoleh persamaan regresi untuk memperkirakan besarnya impor monoethanolamine. Berdasarkan hasil proyeksi untuk tahun 2030 menggunakan persamaan $y = 1,0318x$, dengan x sebagai tahun proyeksi, maka untuk $x = 2030$ diperoleh nilai y sebesar 2.094,554 ton. Dengan demikian, jumlah impor monoethanolamine di Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 2.094,554 ton pada tahun 2030.

1.2.2 Kapasitas Pabrik MEA yang Sudah Beroperasi

Hingga saat ini, pabrik monoethanolamine belum beroperasi di Indonesia, meskipun tingkat kebutuhan terhadap senyawa ethanolamine tergolong tinggi. Hal ini dipengaruhi oleh banyaknya sektor industri dalam negeri yang memanfaatkan monoethanolamine sebagai bahan baku, seperti industri sabun dan deterjen, proses pemurnian gas, serta sebagai agen penjerap karbon dioksida (CO_2) dalam berbagai proses industri petrokimia, khususnya industri pupuk.

Di tingkat global, monoethanolamine telah diproduksi secara komersial oleh sejumlah perusahaan kimia besar. Beberapa pabrik monoethanolamine yang telah beroperasi beserta kapasitas produksinya dapat dilihat pada Tabel 1.2.

Tabel 1. 2 Pabrik Monoethanolamine yang Telah Beroperasi (Independent Commodity Intelligence Services (ICIS), 2023

No	Perusahaan	Lokasi	Kapasitas (Ton/Tahun)	Proses Produksi
1	BASF	Nanjing, China	60.000	Katalitik
2	BASF	Ludwigshafen, Jerman	100.000	Katalitik
3	Dow Chemical	Shanghai, China	120.000	Non Katalitik
4	Dow Chemical	Terneuzen, Belanda	150.000	Non Katalitik
5	Dow Chemical	Freeport, Texas, Amerika Serikat	200.000	Non Katalitik
6	Mitsubishi Chemical	Yokkaichi, Jepang	50.000	Katalitik
7	Sinopec	Beijing, China	100.000	Katalitik
8	INEOS	Hull, Inggris	50.000	Katalitik
9	LyondellBasell	Houston, Texas, Amerika Serikat	100.000	Katalitik

Berdasarkan data tersebut, kapasitas produksi pabrik monoethanolamine di dunia berada pada kisaran puluhan ribu hingga ratusan ribu ton per tahun, dengan penerapan proses katalitik maupun non katalitik. Data ini menjadi salah satu acuan dalam menentukan kapasitas pabrik monoethanolamine yang dirancang agar sesuai dengan kondisi pasar serta perkembangan industri global.

1.2.3 Ketersediaan Bahan Baku

Bahan baku utama yang digunakan dalam pra-rancangan pabrik monoethanolamine (MEA) ini adalah amonia (NH_3) dan etilen oksida (EO). Penentuan kapasitas produksi pabrik didasarkan pada ketersediaan bahan baku tersebut di dalam negeri, khususnya di kawasan industri Cilegon, Banten, sehingga kontinuitas operasi pabrik dapat terjamin.

1.2.3.1 Amonia (NH₃)

Amonia merupakan salah satu bahan kimia dasar yang diproduksi dalam jumlah besar di Indonesia dan sebagian besar dimanfaatkan untuk industri pupuk. Dalam proses produksi monoethanolamine, amonia digunakan dalam kondisi berlebih untuk meningkatkan selektivitas pembentukan MEA serta menekan terbentuknya produk samping berupa diethanolamine dan triethanolamine, sebagaimana dijelaskan dalam paten Johnson Jr. (1984).

Untuk kapasitas produksi monoethanolamine sebesar 14.700 ton/tahun, kebutuhan amonia dihitung berdasarkan pendekatan stoikiometri industri dengan rasio mol amonia terhadap etilen oksida sebesar 39,88:1. Perhitungan kebutuhan bahan baku dilakukan dengan menggunakan data berat molekul sebagai berikut:

- Monoethanolamine (MEA) = 61 kg/kmol
- Amonia (NH₃) = 17 kg/kmol

Jumlah MEA yang diproduksi per tahun:

$$n_{MEA} = \frac{14.700.000}{61} = 240.983,61 \text{ kmol/tahun}$$

Kebutuhan amonia secara teoritis:

$$m_{NH_3 \text{ teori}} = 240.983,61 \times 17 = 4.096.722 \text{ kg/tahun}$$

Dengan penggunaan amonia berlebih:

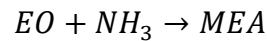
$$m_{NH_3} = 4.096.722 \times 39,88 = 163.332.434 \text{ kg/tahun}$$

Sehingga kebutuhan amonia adalah sekitar 163.332,43 ton/tahun. Jumlah ini relatif kecil jika dibandingkan dengan kapasitas produksi amonia nasional yang mencapai ratusan ribu hingga jutaan ton per tahun, sehingga ketersediaan amonia untuk pabrik MEA dapat dikatakan sangat mencukupi. Amonia berlebih yang tidak bereaksi selanjutnya dapat dipisahkan dan direcycle kembali ke dalam sistem proses.

1.2.3.2 Etilen Oksida (EO)

Etilen oksida merupakan bahan baku utama lainnya dalam produksi monoethanolamine. Etilen oksida diproduksi oleh industri petrokimia berbasis etilena dan tersedia di kawasan industri Cilegon, Banten, sehingga mendukung pemilihan lokasi pabrik. Berat molekul etilen oksida Adalah $EO = 44 \text{ kg/kmol}$.

Kebutuhan etilen oksida dihitung berdasarkan reaksi stoikiometri pembentukan MEA:



Dengan perbandingan mol 1:1 antara EO dan MEA, maka kebutuhan etilen oksida adalah:

$$mEO = 240.983,61 \times 44 = 10.603.279 \text{ kg/tahun}$$

Atau setara dengan 10.603,28 ton/tahun.

Berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan bahan baku dan data ketersediaannya di dalam negeri, khususnya di kawasan industri Cilegon, maka kapasitas produksi monoethanolamine sebesar 14.700 ton/tahun dinilai layak untuk diterapkan. Baik amonia maupun etilen oksida tersedia dalam jumlah yang jauh melebihi kebutuhan pabrik, sehingga tidak menjadi faktor pembatas dalam operasional pabrik.

Dengan demikian, penetapan kapasitas pabrik monoethanolamine sebesar 14.700 ton/tahun telah mempertimbangkan aspek ketersediaan bahan baku, kontinuitas pasokan, serta kesesuaian dengan kondisi industri petrokimia nasional.

1.3 Penentuan Lokasi Pabrik

Kemajuan serta keberlanjutan suatu industri sangat bergantung pada ketepatan dalam menentukan lokasi pendirian pabrik. Pemilihan lokasi yang tepat dapat memberikan keuntungan baik dari sisi teknis maupun ekonomi, sekaligus menunjang efisiensi proses produksi serta memudahkan pengembangan pabrik di masa mendatang. Oleh karena itu, penentuan lokasi pabrik harus mempertimbangkan berbagai faktor secara menyeluruh agar diperoleh manfaat jangka panjang dan biaya operasional yang lebih

efisien. Lokasi yang strategis akan berperan penting dalam menjamin kelancaran proses produksi, distribusi produk, serta pemanfaatan sumber daya secara optimal.

Selain pertimbangan teknis dan ekonomi, pemilihan lokasi pabrik juga dipengaruhi oleh karakteristik proses produksi, khususnya berdasarkan klasifikasi *weight loss* atau *weight gain*. Proses produksi monoethanolamine tergolong sebagai proses *weight loss*, karena massa produk akhir yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan total massa bahan baku yang digunakan. Dengan karakteristik tersebut, lokasi pabrik idealnya berada dekat dengan sumber bahan baku untuk menekan biaya transportasi. Berdasarkan pertimbangan tersebut, pemilihan lokasi pendirian pabrik monoethanolamine difokuskan pada tiga alternatif wilayah, yaitu Cilegon, Gresik, dan Bontang. Ketiga lokasi tersebut selanjutnya dianalisis dan dibandingkan menggunakan metode matriks penilaian guna menentukan lokasi yang paling optimal, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.3.

Tabel 1. 3 Matriks Penentuan Lokasi Pabrik

Aspek	Cilegon	Gresik	Bontang
Bahan Baku	Amonia: ±600 ribu ton/tahun (Pupuk Kujang & distribusi Banten).Etilen Oksida: PT Polychem Indonesia Tbk (±50.000 ton/tahun).	Amonia: ±1,1 juta ton/tahun (PT Petrokimia Gresik).Etilen Oksida: pasokan dari Banten (jalur laut).	Amonia: ±2,7 juta ton/tahun (PKT).Etilen Oksida: dari Pulau Jawa.
Skor	3	2	2
Pemasaran	Dekat pusat industri Jabodetabek dan Banten (industri kimia, kosmetik, farmasi, deterjen).	Terpusat di Jawa Timur dan sebagian Jawa Barat.	Terbatas, jauh dari pasar utama nasional.
Skor	3	2	1
Utilitas	Air industri, listrik PLN, gas bumi tersedia di kawasan industri terintegrasi.	Utilitas lengkap kawasan industri.	Utilitas tersedia namun terbatas.
Skor	3	3	2

Aspek	Cilegon	Gresik	Bontang
Transportasi	Pelabuhan Merak & Ciwandan, tol Trans-Jawa, dekat Tanjung Priok.	Pelabuhan Gresik & Tanjung Perak.	Pelabuhan tersedia namun jauh dari pasar.
Skor	3	2	1
Pembuangan Limbah	IPAL kawasan industri.	IPAL kawasan industri.	IPAL kawasan industri.
Skor	2	2	2
Peraturan Daerah	Kawasan industri kimia prioritas nasional.	Kawasan industri berkembang.	Kawasan industri regional.
Skor	3	3	3
Harga Tanah	Rp 2–6 juta/m ²	Rp 3–5 juta/m ²	Rp 1,5–3 juta/m ²
Skor	2	2	3
Tenaga Kerja	Akses tenaga kerja industri & lulusan Jabodetabek.	Tenaga kerja industri melimpah.	Tenaga ahli terbatas.
Skor	3	3	2
UMK	±Rp5.500.000	±Rp5.200.000	±Rp3.700.000
Skor	2	2	1
Geografis	Strategis, dekat pasar nasional & ekspor.	Akses logistik baik regional.	Jauh dari pusat ekonomi nasional.
Skor	3	2	2
Total Skor	27	23	20

Tabel 1.3 menunjukkan perbandingan beberapa lokasi yang berpotensi untuk pembangunan pabrik monoethanolamine. Dari ketiga lokasi yaitu Cilegon, Gresik, dan Bontang, Cilegon memperoleh skor tertinggi sehingga dipilih sebagai lokasi pendirian pabrik. Pemilihan Cilegon sebagai lokasi ini didukung oleh faktor-faktor berikut:

1.3.1 Ketersediaan Bahan Baku

Bahan baku utama dalam produksi monoethanolamine adalah amonia dan etilen oksida. Monoethanolamine dihasilkan melalui reaksi antara amonia dan etilen oksida, sehingga lokasi pabrik perlu dipilih sedekat mungkin dengan sumber bahan baku guna meningkatkan efisiensi proses dan menekan biaya

transportasi. Rencana pendirian pabrik berada di Cilegon, Banten. Pasokan amonia diperoleh dari PT Pupuk Kujang Cikampek yang memiliki kapasitas produksi dalam skala besar dan mampu menjamin kontinuitas pasokan bahan baku. Sementara itu, etilen oksida dipasok dari PT Polychem Indonesia Tbk yang berlokasi di Banten sehingga pengiriman dapat dilakukan dengan jarak relatif dekat dan biaya logistik yang lebih rendah. Katalis yang digunakan dalam proses produksi monoethanolamine adalah silika-alumina ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) yang diperoleh dari produsen internasional sesuai dengan spesifikasi proses yang dibutuhkan.

1.3.2 Daerah Pemasaran

Monoethanolamine (MEA) memiliki peluang pasar yang sangat luas karena perannya yang penting di berbagai sektor industri strategis. Pada industri kosmetik dan produk perawatan diri, MEA digunakan sebagai pengatur pH, emulsifier, dan komponen formulasi, dengan potensi penyerapan pasar oleh perusahaan besar seperti PT Paragon Technology and Innovation, dan PT Kino Indonesia Tbk.

Di sektor pengolahan gas dan petrokimia, MEA menjadi bahan utama dalam proses penyerapan gas asam (CO_2 dan H_2S) serta pemurnian gas, sehingga memiliki permintaan yang berkelanjutan dari perusahaan seperti PT Chandra Asri Petrochemical Tbk, dan PT Linde Indonesia.

Selain itu, industri surfaktan dan deterjen merupakan pasar potensial lainnya karena MEA berfungsi sebagai bahan baku utama dalam pembuatan surfaktan, emulsifier, dan agen pembersih. Permintaan pada sektor ini didukung oleh keberadaan produsen berskala nasional seperti PT Unilever Indonesia Tbk, PT Kao Indonesia, dan PT P&G Manufacturing Indonesia.

1.3.3 Sarana Transportasi

Ketersediaan sarana transportasi yang memadai merupakan faktor penting dalam menunjang kelancaran distribusi bahan baku dan produk jadi. Kawasan Cilegon didukung oleh infrastruktur transportasi yang lengkap, antara lain Pelabuhan Ciwandan dan Pelabuhan Merak, akses jalan tol Jakarta–Merak, serta jaringan transportasi laut dan darat yang terintegrasi. Infrastruktur tersebut memungkinkan pengangkutan bahan baku maupun penyaluran produk jadi dilakukan secara efisien dan berkelanjutan. Dengan dukungan sistem transportasi

yang baik, Cilegon menjadi lokasi yang strategis untuk pendirian pabrik monoethanolamine.

1.3.4 Utilitas

Proses produksi memerlukan dukungan berbagai fasilitas utilitas, antara lain pasokan listrik, air untuk keperluan proses dan sanitasi, serta steam. Kawasan industri Cilegon telah dilengkapi dengan infrastruktur utilitas yang memadai, meliputi ketersediaan air industri, pasokan listrik dari PT PLN, serta jaringan gas bumi. Air industri digunakan untuk menunjang proses produksi, sistem pendinginan, dan kegiatan pembersihan. Kebutuhan energi utama dipenuhi melalui pasokan gas alam yang disediakan oleh PT Pertamina, sedangkan kebutuhan listrik dipasok oleh PT PLN dengan dukungan unit generator sebagai sumber daya cadangan. Ketersediaan utilitas yang lengkap ini mendukung kelancaran dan efisiensi operasional pabrik.

1.3.5 Ketersediaan Tenaga Kerja

Ketersediaan tenaga kerja merupakan faktor utama dalam kelancaran produksi. Kawasan industri Cilegon memiliki tenaga kerja industri yang melimpah, wilayah Jabodetabek didukung oleh sejumlah perguruan tinggi negeri yang berperan dalam penyediaan sumber daya manusia di bidang teknik dan sains, seperti Universitas Indonesia, Politeknik Negeri Jakarta, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Universitas Negeri Jakarta, serta Politeknik Energi dan Mineral Akamigas.

1.3.6 Pembuangan Limbah

Kegiatan produksi memerlukan dukungan berbagai fasilitas utilitas, antara lain pasokan listrik, air untuk keperluan proses dan sanitasi, serta steam. Kawasan industri Cilegon didukung oleh infrastruktur utilitas yang memadai, meliputi ketersediaan air industri, pasokan listrik dari PT PLN, serta jaringan gas bumi. Air industri dimanfaatkan untuk kebutuhan proses produksi, sistem pendinginan, dan kegiatan pembersihan. Kebutuhan energi utama dipenuhi melalui pasokan gas alam yang disediakan oleh PT Pertamina, sedangkan kebutuhan listrik dipasok oleh PT PLN dengan dukungan unit generator sebagai sumber daya cadangan. Ketersediaan utilitas yang lengkap tersebut mendukung kelancaran dan efisiensi operasional pabrik.

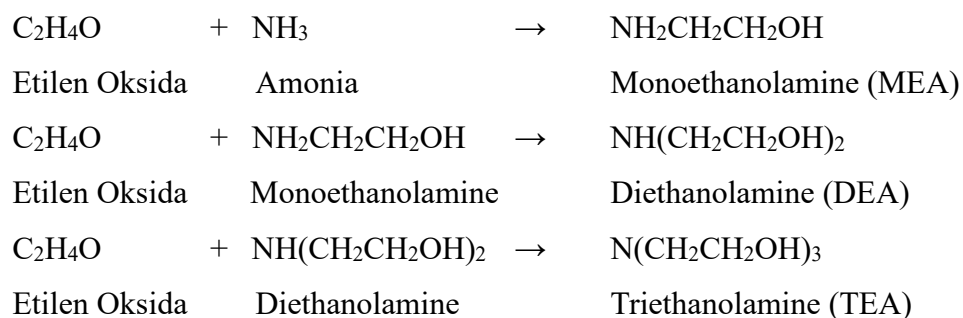
1.3.7 Geografis

Secara geografis, Cilegon terletak di salah satu kawasan industri utama di Provinsi Banten yang memiliki akses logistik yang luas dan terintegrasi. Letaknya yang strategis memudahkan distribusi bahan baku dan produk jadi ke berbagai wilayah di Pulau Jawa maupun untuk keperluan ekspor melalui fasilitas pelabuhan. Kondisi tersebut menjadikan Cilegon sebagai lokasi yang ideal dan strategis untuk pendirian pabrik monoethanolamine. Selain itu, peran pemerintah sebagai fasilitator juga memberikan dukungan melalui berbagai kemudahan, seperti penyederhanaan perizinan, pemberian insentif fiskal, serta dukungan teknis lainnya yang mendorong pendirian dan pengembangan industri kimia di kawasan tersebut.

1.4 Tinjauan Proses

1.4.1 Macam-macam Proses Pembuatan MEA

Sintesis monoethanolamine (MEA) berlangsung melalui reaksi kimia antara etilen oksida dan amonia. Dalam proses tersebut, selain menghasilkan monoethanolamine sebagai produk utama, juga terbentuk produk samping berupa diethanolamine (DEA) dan triethanolamine (TEA). Berdasarkan penelitian yang dilaporkan oleh Zahedi et al. (2009), reaksi-reaksi yang terjadi dalam proses sintesis monoethanolamine dapat dinyatakan melalui persamaan reaksi sebagai berikut.



Secara umum, proses produksi monoethanolamine dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu:

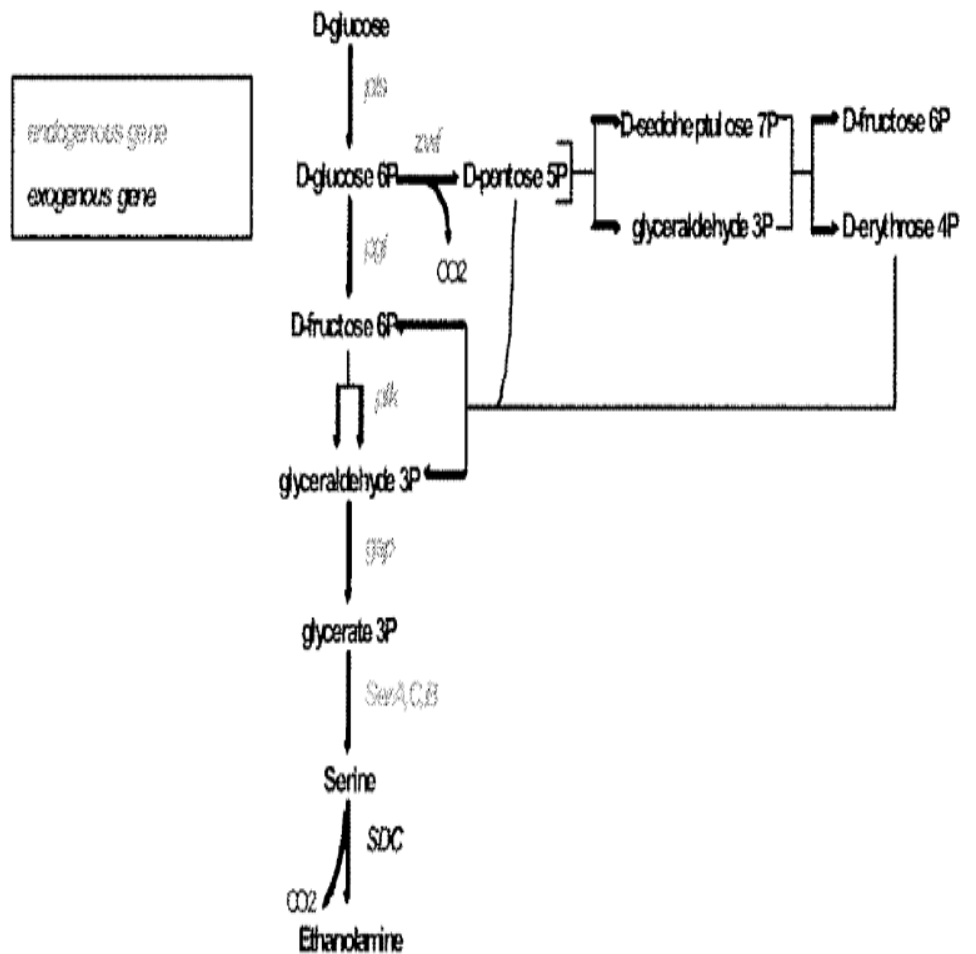
1. Proses Fermentasi

Ethanolamine dapat disintesis melalui jalur fermentasi dengan memanfaatkan sumber karbon yang dapat difermentasi oleh bakteri rekombinan yang tumbuh secara aerob. Pada mekanisme ini, serine berperan sebagai senyawa antara yang selanjutnya dikonversi menjadi

ethanolamine melalui katalisis enzim serine decarboxylase. Enzim tersebut diekspresikan oleh gen serine decarboxylase encoded (SDC) yang berasal dari tanaman *Arabidopsis thaliana* dan diekspresikan pada mikroorganisme inang.

Secara umum, proses fermentasi untuk produksi ethanolamine terdiri atas tiga tahapan utama. Tahap pertama adalah proses fermentasi menggunakan mikroorganisme yang telah direkayasa untuk menghasilkan ethanolamine. Tahap kedua meliputi peningkatan akumulasi ethanolamine, baik di dalam sel mikroorganisme maupun di medium fermentasi. Tahap terakhir adalah pemisahan ethanolamine dari medium fermentasi dan sisa biomassa, yang dapat dilakukan secara parsial atau menyeluruh sesuai dengan spesifikasi dan kebutuhan produk akhir.

Berbagai jenis mikroorganisme dapat digunakan dalam proses fermentasi ini, antara lain *Escherichia coli*, *Corynebacterium glutamicum*, dan *Saccharomyces cerevisiae*. Proses fermentasi umumnya berlangsung pada rentang suhu 20–55°C, dengan kondisi operasi yang paling sering digunakan berada pada kisaran 25–40°C. Secara spesifik, suhu optimum fermentasi dilaporkan sekitar 30°C untuk *Corynebacterium glutamicum* dan sekitar 37°C untuk *Escherichia coli*. Diagram alir biokimia proses fermentasi pada produksi ethanolamine disajikan pada Gambar 1.2.



Gambar 1. 3 Diagram Alir Biokimia Fermentasi pada Produksi Ethanolamine

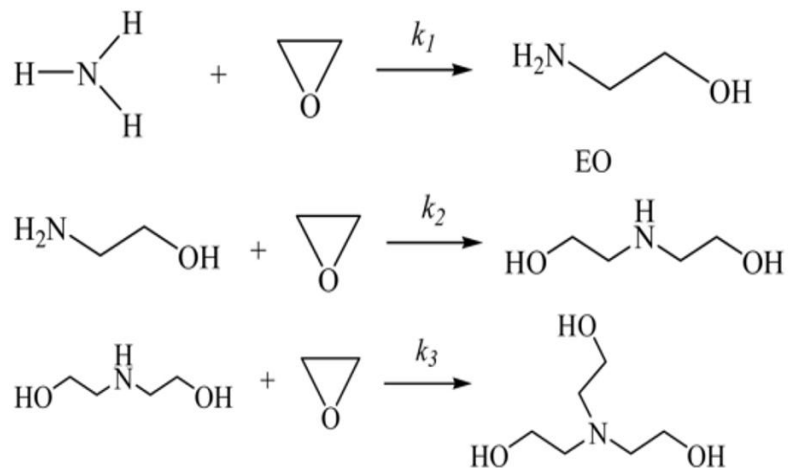
2. Proses Katalitik

Proses katalitik adalah salah satu metode pembentukan monoethanolamine yang melibatkan penggunaan katalis berbentuk partikel dan diaplikasikan pada reaktor tipe fixed bed. Jenis katalis yang dapat digunakan dalam proses ini meliputi silica-alumina, zeolit, tanah liat asam, serta berbagai logam oksida yang bersifat asam. Keberadaan katalis berperan penting dalam mempercepat laju reaksi sekaligus meningkatkan efisiensi proses pembentukan monoethanolamine. Dengan penggunaan katalis, produk monoethanolamine yang dihasilkan memiliki selektivitas tinggi, sementara pembentukan produk samping dapat ditekan seminimal mungkin. Proses ini umumnya dijalankan pada rentang suhu antara 75 hingga 132°C.

Dari sudut pandang ekonomi, proses katalitik dinilai lebih menguntungkan karena mampu menghasilkan produktivitas reaktor

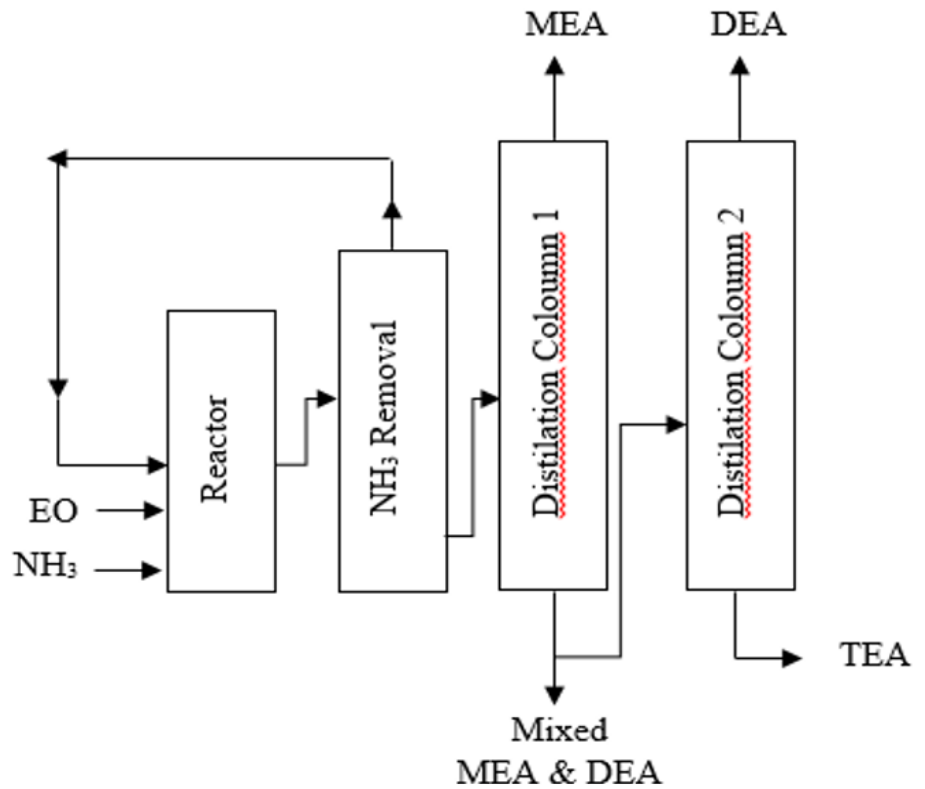
yang tinggi, yang merupakan dampak langsung dari peran katalis dalam meningkatkan laju reaksi. Selain itu, reaksi katalitik bersifat relatif sederhana dan bersih, sehingga lebih mudah dikendalikan serta dioperasikan. Proses ini dijalankan dalam fase cair pada tekanan tinggi, yaitu sekurang-kurangnya setara dengan tekanan uap amonia pada suhu maksimum operasi. Kondisi tersebut diperlukan untuk memastikan seluruh komponen reaktan tetap berada dalam fase cair selama berlangsungnya reaksi (Bengt J. G. Weibull & Alfredshem, 1972).

Reaksi proses katalitik pembuatan ethanolamine dapat dilihat pada Gambar 1.3 berikut.



Gambar 1. 4 Reaksi Proses Katalitik Pembuatan Ethanolamine

Blok diagram pembuatan MEA dapat dilihat pada Gambar 1.4 sebagai berikut.



Gambar 1. 5 Blok Diagram Produksi MEA Proses Katalitik

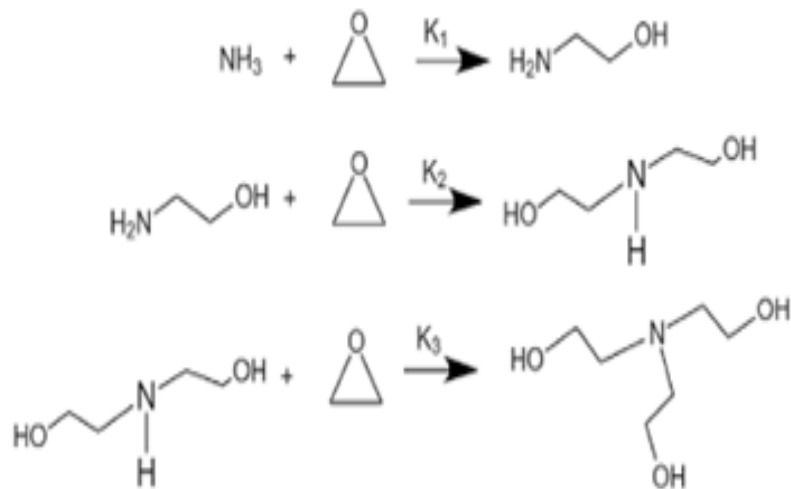
3. Proses Non-Katalitik

Proses aqueous adalah salah satu metode pembentukan monoethanolamine yang tidak melibatkan penggunaan katalis. Pada proses ini, amonia, etilen oksida, dan air direaksikan secara langsung di dalam reaktor. Produk hasil reaksi selanjutnya dipisahkan dengan cara menghilangkan amonia menggunakan unit ammonia stripper, sedangkan air dipisahkan melalui proses evaporasi dengan menggunakan evaporator.

Pada penerapan proses aqueous, terdapat beberapa parameter operasi yang perlu dikendalikan secara cermat, terutama jumlah air yang digunakan dalam sistem reaksi. Penggunaan air dalam jumlah yang terlalu sedikit dapat menyebabkan tekanan operasi menjadi tinggi, sehingga berpotensi meningkatkan kebutuhan spesifikasi peralatan dan biaya investasi. Sebaliknya, penggunaan air dalam jumlah yang berlebihan dapat menurunkan tekanan operasi, namun berdampak pada meningkatnya konsumsi energi proses, khususnya pada tahap pemisahan dan pemurnian produk.

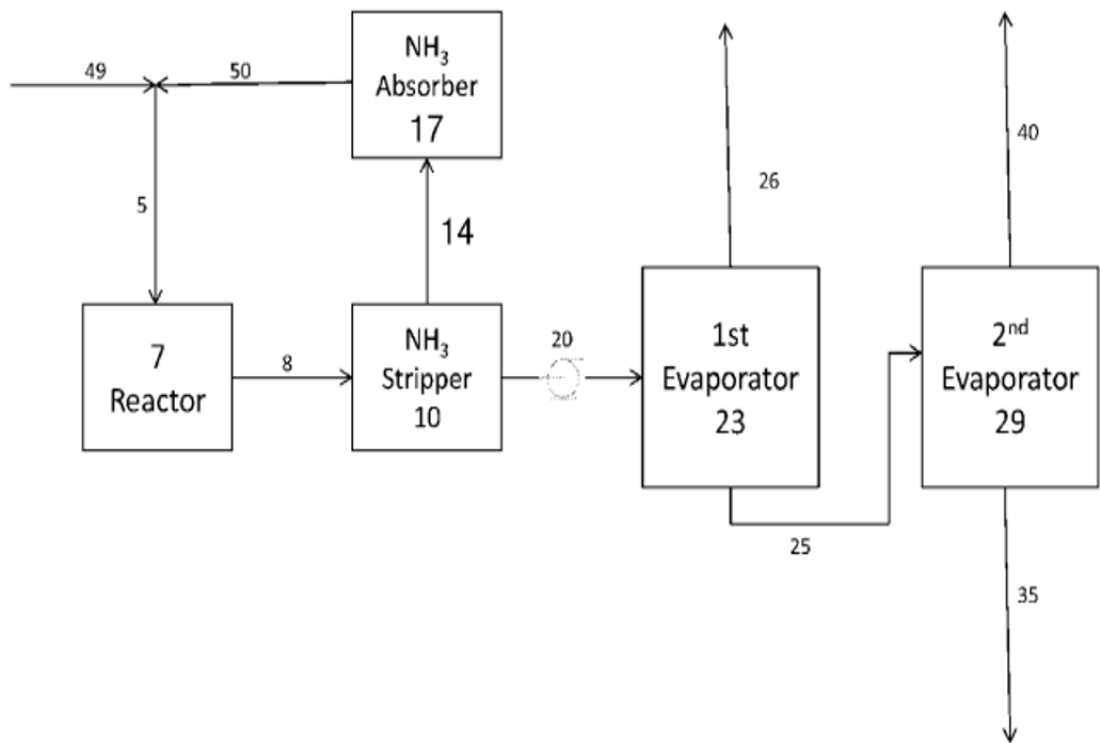
Dalam sistem aqueous, amonia berada dalam fase cair pada tekanan yang relatif lebih rendah. Kondisi ini berkontribusi terhadap penurunan reaktivitas etilen oksida, sehingga risiko terjadinya reaksi tak terkendali atau ledakan dapat diminimalkan, mengingat etilen oksida merupakan senyawa yang sangat reaktif. Meskipun demikian, pengendalian suhu dan tekanan tetap menjadi faktor penting dalam proses. Suhu dan tekanan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan etilen oksida bereaksi dengan air membentuk etilen glikol sebagai produk samping yang tidak diinginkan. Selain itu, suhu reaksi yang terlalu rendah yang dikombinasikan dengan waktu tinggal yang lama juga dapat mempengaruhi selektivitas dan laju reaksi.

Reaksi yang terjadi pada proses aqueous dalam produksi ethanolamine ditunjukkan pada Gambar 1.5, di mana air berfungsi sebagai media reaksi sekaligus pengendali kondisi proses.



Gambar 1. 6 Reaksi Proses Non-Katalitik Pembuatan Ethanolamine

Blok diagram proses pembuatan monoethanolamine dengan metode aqueous dapat dilihat pada Gambar 1.6 berikut.



Gambar 1. 7 Blok Diagram Produksi MEA Proses Non-Katalitik

Perbandingan proses fermentasi, katalitik dan aqueous (*non* katalitik) dapat diketahui melalui Tabel 1.4 berikut:

Tabel 1. 4 Perbandingan Proses Proses Pembuatan Ethanolamine

Faktor Pemanding	Proses Fermentasi [1]	Proses Aqueous (Non Katalitik) [2]	Proses Katalitik [3]
Tekanan Operasi	Tekanan ruang	49,3 – 118,4 atm	34 – 136,1 atm
Suhu Operasi	20 – 55°C	110 – 150°C	75 – 132°C
Bahan Baku	Karbon dan <i>Acetobacterium bacterium</i>	Liquid ammonia	Liquid ammonia (H ₂ O <1%) dan ammonia anhydrous
Produk Samping	CO ₂	TEA dan DEA	TEA dan DEA
Konversi	79 g/L	95% (Etilen Oksida)	98% (Etilen Oksida)

Faktor Pemanding	Proses Fermentasi [1]	Proses Aqueous (Non Katalitik) [2]	Proses Katalitik [3]
Sifat Bahan Baku	Tergantung pada bakteri yang digunakan	Larutan ammonia lebih aman	Liquid ammonia dan ammonia anhydrous lebih berbahaya
Kandungan Air	Produk tidak mengandung air	Diperlukan energi untuk menurunkan kandungan air pada produk sehingga konsumsi energi lebih tinggi	Produk tidak mengandung air sehingga tidak diperlukan tambahan energi untuk menurunkan kandungan air
Kemurnian	98%	99,6%	99,7%
Molar Ratio	–	1:1 hingga 100:1	10:1 hingga 40:1
Selektivitas (1:40)	0–100% Ethanolamine	MEA: 76,12% TEA: 19,96% DEA: 3,89%	MEA: 87,04% TEA: 10,12% DEA: 2,10%

[1] US Patent 0325245 A1 dan EP 904524 A1

[2] US Patent 5,545,757

[3] US Patent 4,438,281

Berdasarkan EP Patent 3904524 A1, hingga saat ini metode fermentasi atau biosintesis alami monoethanolamine dalam skala besar belum dapat diaplikasikan secara komersial di industri. Hal ini disebabkan oleh rendahnya efisiensi proses serta tingginya kompleksitas pada tahap pemurnian dan pemisahan produk, sehingga metode tersebut belum mampu bersaing secara teknis maupun ekonomis dengan proses kimia konvensional.

Proses non-katalitik memiliki keunggulan berupa penggunaan air sebagai media reaksi yang dapat mempercepat interaksi antara

amonia dan etilen oksida. Namun demikian, kelemahan utama dari proses ini adalah tingginya kandungan air pada produk akhir, sehingga diperlukan unit pemisahan tambahan seperti stripper atau evaporator. Penambahan tahapan pemisahan tersebut menyebabkan peningkatan konsumsi energi dan biaya operasional secara signifikan.

Sebaliknya, proses katalitik menawarkan keunggulan utama berupa kemampuan menghasilkan monoethanolamine dengan konsentrasi tinggi tanpa memerlukan tahap pemisahan air. Dengan demikian, proses ini lebih sederhana dari sisi pemurnian produk. Keterbatasan dari proses katalitik terletak pada kebutuhan penggunaan amonia anhidrat atau amonia cair dengan kadar air yang sangat rendah ($H_2O < 1\%$), yang memiliki tingkat risiko operasional lebih tinggi dibandingkan larutan amonia berair. Namun, berdasarkan US Patent 3,697,598, keberadaan air dalam jumlah kecil pada sistem tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap rendemen monoethanolamine yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil evaluasi dan perbandingan antara proses non-katalitik dan proses katalitik, maka proses yang dipilih dalam perancangan ini adalah proses katalitik. Proses ini memiliki sejumlah keunggulan, antara lain kestabilan reaksi pada suhu tinggi, selektivitas yang relatif tinggi terhadap pembentukan monoethanolamine, kebutuhan energi yang lebih rendah, serta tingkat keekonomian yang lebih baik. Keunggulan ekonomi tersebut didukung oleh tingginya konversi etilen oksida, tidak diperlukannya tahap pemisahan air, umur katalis yang panjang, serta kemungkinan penerapan sistem daur ulang amonia.

Dalam proses katalitik, katalis yang digunakan umumnya berupa asam anorganik heterogen, seperti silika-alumina, zeolit, molecular sieve, acid clays, atau oksida asam lainnya, sebagaimana dilaporkan dalam US Patent 4,438,281. Berdasarkan pertimbangan selektivitas, stabilitas termal, aktivitas katalitik, serta aspek keekonomian, katalis yang dipilih dalam proses ini adalah silika-alumina ($SiO_2-Al_2O_3$).

1.4.2 Tinjauan Proses Secara Umum

Bahan baku berupa amonia cair dan etilen oksida yang berasal dari unit penyimpanan, bersama dengan aliran amonia hasil daur ulang, diumpankan ke dalam Reaktor Fixed Bed Multitube yang berisi katalis silika-alumina ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$). Reaktor dioperasikan pada tekanan sekitar 100 atm dan suhu operasi 100°C untuk memungkinkan terjadinya reaksi antara etilen oksida dan amonia. Reaksi tersebut menghasilkan monoethanolamine (MEA) sebagai produk utama, serta diethanolamine (DEA) dan triethanolamine (TEA) sebagai produk samping.

Menurut US Patent 4,438,281, pada kondisi operasi tekanan 1450 psig dan suhu jaket reaktor sebesar 100°C , dengan perbandingan molar amonia terhadap etilen oksida sebesar 39,88:1, diperoleh selektivitas produk sebesar 87,04% mol MEA, 10,12% mol DEA, dan 2,10% mol TEA, dengan konversi etilen oksida mencapai 98%. Diagram alir proses produksi monoethanolamine menggunakan metode katalitik ditunjukkan pada Gambar 1.4.

Aliran keluaran dari reaktor selanjutnya dialirkan ke unit pemisahan awal berupa separator yang terdiri atas kolom dan menara distilasi pertama. Pada tahap ini, amonia, etilen oksida, dan sebagian air dipisahkan dari campuran produk. Aliran atas yang didominasi oleh amonia, etilen oksida, dan air dikembalikan ke reaktor sebagai aliran daur ulang (recycle), sedangkan aliran bawah yang mengandung campuran MEA, DEA, dan TEA dialirkan ke menara distilasi kedua.

Pada menara distilasi kedua, dilakukan pemisahan antara monoethanolamine dan fraksi yang lebih berat, yaitu diethanolamine dan triethanolamine. Produk atas menara distilasi ini didominasi oleh monoethanolamine karena memiliki titik didih yang lebih rendah dibandingkan kedua senyawa tersebut. Sementara itu, aliran bawah yang mengandung DEA dan TEA diteruskan ke menara distilasi ketiga.

Pada menara distilasi ketiga, dilakukan pemisahan lanjutan antara diethanolamine dan triethanolamine. Produk atas menara

distilasi ketiga didominasi oleh DEA, sedangkan produk bawah sebagian besar berupa TEA, mengingat TEA memiliki titik didih tertinggi di antara ketiga senyawa tersebut (Kirk-Othmer et al., 1998).