

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri manufaktur di Indonesia terus menunjukkan dinamika yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Namun, pertumbuhan tersebut masih menyisakan tantangan struktural yang belum terselesaikan, yakni tingginya ketergantungan sektor industri terhadap bahan baku impor. Penelitian yang menggunakan data dari Badan Pusat Statistik (BPS) dan Bank Indonesia menunjukkan bahwa ketergantungan yang berlebihan pada impor dapat melemahkan neraca perdagangan dan berdampak negatif terhadap pertumbuhan ekonomi nasional dalam jangka panjang (Faris Fizabillah et al., 2024). Kondisi ini semakin diperparah oleh fluktuasi nilai tukar rupiah yang secara langsung mempengaruhi harga bahan baku impor dan mendorong kenaikan biaya produksi, sehingga mengurangi daya saing industri dalam negeri.

Salah satu subsektor yang sangat terdampak oleh kondisi tersebut adalah industri petrokimia. Ketergantungan terhadap impor masih menjadi tantangan utama industri kimia nasional, di mana kapasitas produksi domestik belum mencukupi kebutuhan dalam negeri sebagai contoh, untuk bahan baku seperti *polyethylene* (PE) dan *polypropylene* (PP), kapasitas produksi lokal hanya mampu memenuhi sekitar 90% dan 65% dari kebutuhan nasional (Sari & Yanto, 2025). Kondisi ini diperparah oleh data defisit yang terus melebar; penelitian yang diterbitkan dalam *Buletin Ilmiah Litbang Perdagangan* (Kementerian Perdagangan RI) mengkaji ketergantungan beberapa sektor industri terhadap bahan baku impor, dan mengidentifikasi bahwa struktur industri yang belum kuat menjadi akar dari permasalahan impor bahan baku yang berkelanjutan di Indonesia (Arianti, 2020). Salah satu komoditas petrokimia yang kebutuhannya terus meningkat namun belum diproduksi secara mandiri adalah *cumene* (*isopropilbenzena*) dengan rumus molekul C_9H_{12} . *Cumene* merupakan senyawa yang sangat penting bagi perkembangan industri kimia, di antaranya digunakan sebagai bahan baku pembuatan *fenol*, *aseton*, *acetophenone*, *resin*, *solven*, dan asam *terephthalat*, serta dalam industri mekanik digunakan sebagai zat aditif pada bahan bakar untuk meningkatkan kemampuan mesin piston (Ansari & Ihsan, 2022).

Dari perspektif proses produksi, *cumene* disintesis melalui reaksi alkilasi benzena dengan propilena menggunakan bantuan katalis. *Cumene* merupakan molekul penting dalam industri petrokimia yang digunakan sebagai senyawa antara dalam produksi fenol dan aseton, di mana sintesisnya didasarkan pada reaksi alkilasi benzena dengan propilena menggunakan katalis asam padat (Torres-Rodríguez et al., 2012). Dalam perkembangannya, katalis aluminium klorida dan asam fosfat padat yang konvensional telah banyak ditinggalkan karena menimbulkan masalah korosi, pencemaran lingkungan, dan konsumsi energi yang tinggi, sehingga zeolit kini banyak digunakan dalam katalisis industri sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan (Guo et al., 2021). Selama proses alkilasi benzena dengan propilena untuk mensintesis *cumene*, zeolit seperti BEA, MFI, dan MWW menunjukkan aktivitas katalitik yang baik, di mana zeolit BEA merupakan yang paling aktif dan mampu menghasilkan *cumene* dengan selektivitas tinggi (Huseynova et al., 2022). Pendirian pabrik *cumene* di Indonesia memiliki justifikasi ekonomi yang kuat ditinjau dari sisi pasar domestik maupun regional. Prarancangan pabrik *cumene* berbahan baku benzena dan propilena yang dirancang berkapasitas 65.000 ton/tahun di Cilegon, Banten menunjukkan bahwa kebutuhan bahan baku benzena dapat diperoleh dari dalam negeri, sementara propilena dapat dipasok dari PT. Chandra Asri Cilegon, mengindikasikan ketersediaan infrastruktur bahan baku yang mendukung. Selain itu, studi prarancangan pabrik *cumene* dengan kapasitas 65.000 ton/tahun yang berlokasi di Cilacap menghasilkan *Return on Investment* (ROI) sebelum pajak sebesar 34.97% dengan waktu pengembalian modal (POT) sebelum pajak selama 4 tahun 11 bulan, yang menunjukkan kelayakan finansial yang sangat menjanjikan.

Tujuan utama pendirian pabrik *cumene* ini adalah untuk memenuhi kebutuhan isopropilbenzena di dalam negeri sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap impor. Selain itu, pembangunan pabrik ini diharapkan mampu mendorong pertumbuhan industri hilir yang menggunakan fenol dan aseton sebagai bahan baku, menciptakan lapangan kerja, meningkatkan nilai tambah sumber daya dalam negeri, memperluas pasar ekspor ke kawasan Asia Tenggara, serta memperkuat devisa negara.

1.2 Penentuan Kapasitas Rancangan Pabrik

Penetapan volume produksi dalam perancangan pabrik *cumene* dilakukan melalui analisis komprehensif yang mengintegrasikan dinamika pasar dan aspek kemandirian industri nasional. Fokus utama dalam tahap ini adalah proyeksi konsumsi *cumene*, baik dalam lingkup domestik, regional ASEAN, maupun pasar global, yang secara konsisten dipicu oleh eskalasi kebutuhan industri hilir seperti manufaktur fenol dan aseton. Mengingat Indonesia hingga saat ini masih mengandalkan jalur impor untuk memenuhi kebutuhan intermediet polimer tersebut, kapasitas yang dirancang harus mampu mengantisipasi celah pasar (*market gap*) secara signifikan. Dengan merujuk pada tren pertumbuhan sektor petrokimia dalam tujuh tahun terakhir, pendirian unit produksi ini diposisikan sebagai langkah strategis untuk mereduksi ketergantungan pada pemasok luar negeri sekaligus memperkuat struktur manufaktur kimia di dalam negeri (Hussain dkk., 2021).

Aspek fundamental kedua yang menentukan besaran kapasitas adalah ketersediaan bahan baku serta standar skala komersial yang berlaku di industri internasional. Kepastian suplai benzena dan propilena, baik melalui integrasi dengan kilang minyak domestik maupun pengadaan dari pasar global, menjadi parameter pembatas primer dalam menjamin kontinuitas operasional pada beban unit yang paling efisien (Nandong dkk., 2023). Secara ekonomi, kapasitas rancangan ini ditetapkan dengan mempertimbangkan prinsip *economies of scale* guna meminimalkan biaya produksi per unit produk dan memastikan harga jual tetap kompetitif di pasar bebas. Melalui studi komparatif terhadap pabrik *cumene* yang telah beroperasi secara komersial di tingkat dunia, kapasitas yang dipilih bertujuan untuk menjamin profitabilitas investasi jangka panjang serta efisiensi modal yang tinggi sesuai dengan standar teknik kimia modern (Sinnott & Towler, 2020).

1.2.1 Proyeksi Kebutuhan *Cumene* Di Indonesia, Asean Dan Global

1.2.1.1 Dalam Negeri

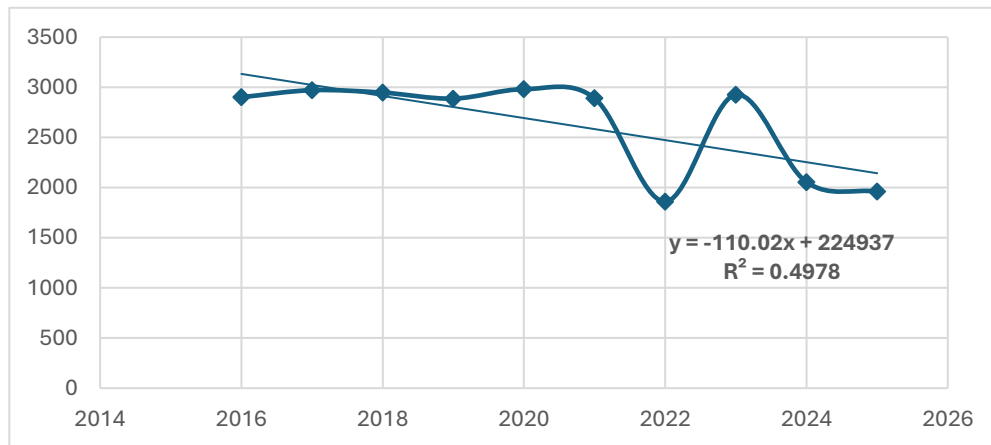
Langkah awal dalam penentuan kapasitas rancangan pabrik adalah melakukan evaluasi terhadap data historis konsumsi produk di dalam negeri. Hal ini dilakukan untuk mengidentifikasi besarnya celah pasar (*market gap*) yang tersedia bagi produsen baru. Hingga saat ini, Indonesia belum memiliki pabrik yang memproduksi *Cumene* secara

mandiri, sehingga seluruh kebutuhan industri domestik sepenuhnya dipenuhi melalui jalur impor.

Cumene merupakan bahan intermedit primer yang tidak tergantikan dalam sintesis Fenol dan Aseton. Di pasar domestik, turunan kimia tersebut merupakan komponen krusial bagi keberlangsungan industri Bisphenol-A (BPA) untuk polikarbonat, resin epoksi sebagai pelapis (*coating*), serta nilon-6 yang menjadi bahan baku vital pada sektor otomotif dan tekstil. Mengingat sektor manufaktur hilir tersebut terus mengalami ekspansi, ketiadaan produksi lokal berisiko memperlemah daya saing industri kimia nasional serta memperlebar defisit neraca perdagangan. Berikut proyeksi data impor *Cumene* di Indonesia selama sepuluh tahun terakhir disajikan pada Tabel 1.1.

Tabel 1. 1 Impor *Cumene* di Indonesia 2016-2025

Tahun	Volume (ton)
2016	2901,318
2017	2970,8
2018	2946,942
2019	2887,079
2020	2980,596
2021	2889,987
2022	1860,192
2023	2926,626
2024	2054,547
2025	1960,545
Rata-rata	2637,863



Grafik 1. 1 Proyeksi Data Impor *Cumene* Indonesia Tahun 2016-2025

Berdasarkan pengolahan data pada Tabel 1.1, volume impor *Cumene* di Indonesia selama periode 2016-2025 menunjukkan nilai rata-rata sebesar 2637,86 ton per tahun (BPS, 2025). Terdapat fluktuasi volume impor penurunan signifikan pada tahun 2022 menjadi 1860,192 ton, diidentifikasi sebagai dampak eksternal dari disrupsi rantai pasok global dan pembatasan logistik selama fase pemulihan pandemi *Covid-19* (Gereffi, 2020). Meskipun secara statistik grafik pada Gambar 1.1 menunjukkan tren penurunan melalui persamaan regresi linear $y = -110,02x + 224937$, kondisi ini dipahami sebagai hambatan akses pengadaan produk dari pasar internasional dan bukan merupakan indikasi penurunan kebutuhan riil industri manufaktur hilir nasional (Aries & Newton, 1955). Hal ini sejalan dengan prinsip perancangan pabrik bahwa penentuan kapasitas tidak hanya bergantung pada tren historis semata, melainkan harus mempertimbangkan dinamika pasar serta potensi substitusi impor guna memperkuat kemandirian industri kimia dalam negeri (Peters & Timmerhaus, 2003).

Hasil proyeksi menggunakan metode *Least Square* menunjukkan bahwa kebutuhan *Cumene* di Indonesia diperkirakan sebesar 1816,44 ton pada tahun 2028 dan terus berlanjut hingga 1596,4 ton pada tahun 2030 (BPS, 2025). Penggunaan metode regresi linear dalam memprediksi kebutuhan masa depan merupakan prosedur standar dalam prarancangan pabrik kimia untuk meminimalkan deviasi antara data historis dan estimasi kapasitas produksi (Coulson & Richardson, 2005). Mengingat *Cumene*

merupakan intermedit primer dalam sintesis fenol dan aseton yang permintaannya terus tumbuh di sektor polimer, angka proyeksi domestik ini ditetapkan sebagai ambang batas minimal dalam penentuan kapasitas rancangan (McKetta & Cunningham, 1984). Namun, agar pabrik memenuhi kriteria skala ekonomi yang menguntungkan (*minimum economic scale*), kapasitas produksi akhir nantinya akan diintegrasikan dengan data kebutuhan regional ASEAN dan global untuk memastikan daya saing terhadap produsen internasional yang sudah beroperasi secara komersial (Ulrich, 1984).

Tabel 1. 2 Data Kebutuhan *Cumene* di Pabrik Indonesia

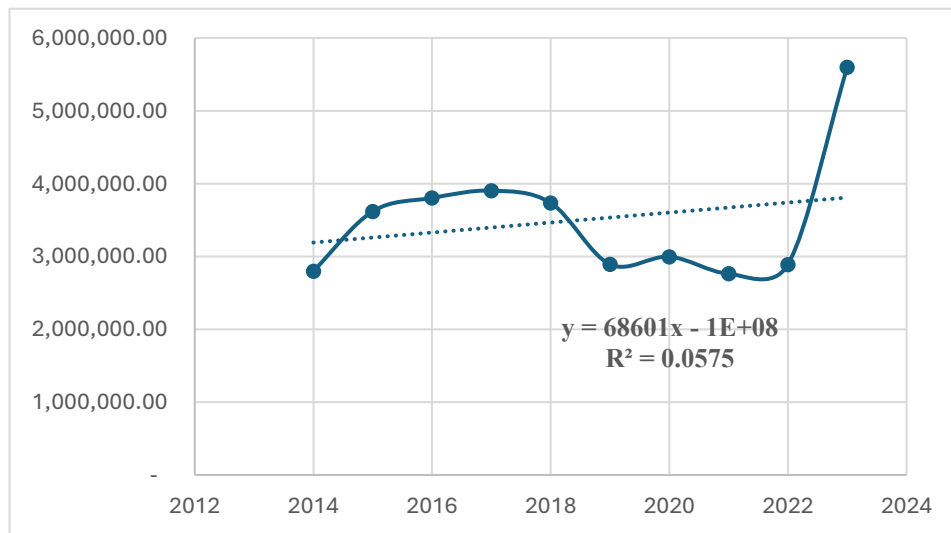
Perusahaan	Kegunaan
PT. Metropolitan Phenol	Fenol
PT Lautan Luas Tbk	Solvent
PT Grammar Pain	Aseton
PT Safana Plastik	Fenol
PT Mitsui Phenols Indonesia	Fenol & Aseton

1.2.1.2 Proyeksi *Cumene* di ASEAN

Evaluasi kebutuhan pasar pada tingkat regional dilakukan untuk memetakan potensi ekspor serta memperluas jangkauan distribusi produk melampaui pasar domestik. Berdasarkan data dari *United Nations Statistics Division*, volume impor *Cumene* di kawasan Asia Tenggara selama periode 2014-2023 menunjukkan nilai rata-rata sebesar 3,314,600.62 kg per tahun . Disusul lonjakan drastis pada tahun 2023 mencapai 5,598.20 kg (UNDATA, 2025). Lonjakan permintaan ini secara teknis didorong oleh posisi *Cumene* sebagai intermedit utama yang diolah menjadi Fenol dan Aseton. Di kawasan ASEAN turunan kimia tersebut sangat krusial bagi keberlangsungan sektor elektronik sebagai pelapis papan sirkuit (PCB) melalui resin epoksi, serta sektor otomotif untuk komponen plastik ringan yang meningkatkan efisiensi bahan bakar (McKetta & Cunningham, 1984). Berikut proyeksi data impor *Cumene* di ASEAN 2014-2023 disajikan pada Tabel 1.3 dan Grafik 1.2.

Tabel 1. 3 Data Impor *Cumene* Asean 2014-2023

Tahun	Volume (kg)
2014	2.799.999,00
2015	3.619.334,00
2016	3.803.486,00
2017	3.904.182,00
2018	3.736.503,00
2019	2.892.448,00
2020	2.997.179,00
2021	2.763.674,00
2022	2.890.674,00
2023	5.598.209,00
Rata-rata	3.314.600,63



Grafik 1. 2 Proyeksi Impor *Cumene* ASEAN Tahun 2016-2025

Hasil analisis proyeksi ASEAN menggunakan metode regresi linear dengan persamaan $y = 68.601x - 1E+08$ memprediksi bahwa kebutuhan *Cumene* di kawasan ASEAN akan terus meningkat mencapai 39.260.030 kg pada tahun 2030. Penggunaan metode regresi ini merupakan prosedur standar dalam perancangan industri kimia untuk meminimalkan deviasi antara estimasi kapasitas dengan pertumbuhan pasar nyata di masa depan (Coulson & Richardson, 2005). Dengan menetapkan target pasar di tingkat regional, pabrik di Indonesia memiliki peluang

strategis untuk menyuplai rantai pasok industri global di Asia Tenggara sekaligus mencapai skala ekonomi yang menguntungkan dibandingkan hanya mengandalkan pasar domestik yang terbatas (Ulrich, 1984).

1.2.1.3 Proyeksi Secara Global

Analisis pada skala internasional dilakukan untuk meninjau posisi *Cumene* sebagai komoditas strategis dalam rantai pasok kimia dunia yang dinamis. Berdasarkan data volume impor internasional, permintaan global pada tahun 2015 mencapai 1.120.790 ton dan diprediksi tetap bertahan pada level fungsional sebesar 642.000 ton pada tahun 2025. Secara industri, dominasi pemanfaatan *Cumene* di tingkat global sangat spesifik, di mana hampir 95% dari total produksi dunia dialokasikan khusus untuk sintesis Fenol dan Aseton. Konsumsi masif ini didorong oleh ekspansi sektor manufaktur di wilayah Asia-Pasifik yang kini menjadi pusat produksi polikarbonat dan resin epoksi dunia guna memenuhi kebutuhan pasar infrastruktur serta teknologi berkelanjutan (Zak dkk., 2021). Perkembangan volume impor *Cumene* secara global disajikan secara ringkas pada Tabel 1.4 berikut:

Tabel 1. 4 Data Impor *Cumene* Global 2015-2025

Tahun	Volume Impor Global (Ton)
2015	1.120.790
2016	980.290
2017	1.050.141
2018	1.180.952
2019	985.714
2020	850.374
2021	825.125
2022	992.307
2023	669.090
2024	655.238
2025	642.000
Rata-rata	904.729

Peluang bagi pendirian pabrik baru di Indonesia tetap terbuka lebar mengingat nilai pasar *Cumene* dunia diproyeksikan tumbuh stabil. Pertumbuhan ini diukur menggunakan *Compound Annual Growth Rate* (CAGR), yaitu metode perhitungan laju pertumbuhan tahunan rata-rata yang memperhatikan efek akumulasi nilai selama periode waktu tertentu guna memberikan estimasi tren pasar yang lebih akurat (Peters & Timmerhaus, 2003). Berdasarkan analisis pasar, nilai CAGR untuk *Cumene* global diproyeksikan sebesar 4,3% hingga 4,9% hingga tahun 2030 (Mordor Intelligence, 2024). Faktor utama yang memperkuat peluang ekspor ini adalah peningkatan permintaan akan polikarbonat untuk industri teknologi berkelanjutan (Towler & Sinnott, 2022). Dengan mengoptimalkan efisiensi produksi, pabrik ini diharapkan mampu menangkap ceruk pasar internasional sekaligus mencapai skala ekonomi komersial yang kompetitif (Turton dkk., 2018).

Penetapan kapasitas rancangan pabrik ini didasarkan pada integrasi data kebutuhan dari tiga tingkatan wilayah guna memastikan kelayakan ekonomi dan keberlangsungan usaha. Berdasarkan hasil proyeksi kebutuhan *Cumene* di Indonesia pada tahun 2030 diperkirakan sebesar 1.596,40 ton. Untuk mengoptimalkan operasional pabrik strategi pengembangan diarahkan pada penetrasi pasar ekspor di kawasan regional ASEAN yang memiliki potensi serapan masif sebesar 39.260,03 ton pada periode yang sama.

Penetapan kapasitas rancangan pabrik ini didasarkan hasil akumulasi kebutuhan pasar Indonesia dan ASEAN menunjukkan total proyeksi sebesar 40.856,43 ton. Dalam prosedur perancangan pabrik kimia, kapasitas akhir harus mempertimbangkan faktor ketidakpastian serta potensi pertumbuhan industri hilir melalui penerapan *safety reason* (Turton dkk., 2018). Melalui pertimbangan tersebut, diperoleh nilai kebutuhan sebesar 61.284,65 ton, sehingga kapasitas rancangan pabrik *Cumene* ditetapkan sebesar 65.000 ton per tahun. Kapasitas ini dinilai sebagai titik optimal (*minimum economic scale*) yang mampu mensubstitusi seluruh kebutuhan impor nasional sekaligus mengambil ceruk pasar ekspor secara kompetitif (Towler & Sinnott, 2022). Dalam analisis kebutuhan Global diposisikan sebagai parameter

fundamental untuk menjamin bahwa kualitas produk yang dihasilkan memenuhi standar internasional, sehingga memiliki daya saing yang kuat di pasar dunia (Ulrich, 1984; Peters & Timmerhaus, 2003). Diversifikasi pasar ini menjamin fleksibilitas operasional pabrik terhadap dinamika suplai kimia global di masa mendatang (Turton dkk., 2018).

1.2.2 Ketersediaan Bahan Baku

Ketersediaan bahan baku secara kontinu dari sumber domestik merupakan parameter fundamental untuk menjamin keberlangsungan operasional pabrik sekaligus menghilangkan ketergantungan pada impor (Towler & Sinnott, 2022). Untuk memenuhi kapasitas rancangan 65.000 ton per tahun, kebutuhan utama Propilena (C_3H_6) seluruhnya dapat dipenuhi oleh produsen dalam negeri yang berlokasi strategis di kawasan industri Cilegon. Pemasok utama Propilena adalah PT Chandra Asri Petrochemical Tbk dengan kapasitas produksi *Propylene* 470.000 ton/tahun. Benzena diproduksi oleh PT Pertamina (Persero) dari kilang RU IV Cilacap sebesar 120.000 ton/tahun. yang memiliki kapasitas produksi mumpuni untuk menjamin kestabilan pasokan *feedstock* secara jangka panjang (Chandra Asri, 2025). Integrasi lokasi ini secara teknis meningkatkan efisiensi proses dan memastikan bahwa seluruh kebutuhan bahan baku terpenuhi tanpa perlu melakukan pengadaan dari luar negeri (Ulrich, 1984).

Sebagai langkah mitigasi risiko untuk menjamin keberlanjutan produksi, tersedia sumber pasokan cadangan (*backup supply*) di dalam negeri untuk menjaga stabilitas operasional (Peters & Timmerhaus, 2003). Selain dari pemasok utama di Cilegon, kebutuhan Benzena dapat didukung oleh PT Pertamina (Persero) melalui kilang *Refinery Unit* (RU) IV Cilacap yang memiliki rekam jejak produksi Benzena berskala industri (Pertamina, 2025). Melalui skema kemitraan strategis antar-produsen domestik ini, pabrik *Cumene* memiliki tingkat kemandirian bahan baku yang sangat tinggi, yang pada akhirnya memperkuat struktur industri petrokimia nasional dan meminimalkan defisit neraca perdagangan (Towler & Sinnott, 2022).

1.2.3 Skala Komersial Pabrik Yang Didirikan

Penetapan kapasitas akhir sebuah pabrik kimia harus memenuhi kriteria skala ekonomi agar mampu bersaing secara harga dan operasional di pasar regional maupun internasional. Pabrik harus didirikan pada skala komersial yang mampu mencapai titik impas operasional atau *minimum economic scale*, di mana biaya modal dan biaya operasional dapat terdistribusi secara optimal terhadap volume produk yang dihasilkan (Towler & Sinnott, 2022). Kapasitas yang terlalu kecil akan menyebabkan harga jual produk tidak kompetitif, sementara kapasitas yang terlalu besar tanpa didukung serapan pasar yang pasti akan meningkatkan risiko kerugian investasi (Turton dkk., 2018).

Tabel 1. 5 Produsen *Cumene* di ASEAN 2026

Negara	Perusahaan	Kapasitas (Ton/Tahun)
Singapura	Mitsui Phenols Singapore	410.000
Singapura	Shell Eastern Petroleum	260.000
Thailand	PTT Phenol Co	650.000
Thailand	Thai Mitsui Specialty Chemicals	150.000

Berdasarkan Tabel 1.5, produksi di Asia Tenggara didominasi oleh unit skala besar di Singapura dan Thailand. Mengingat Indonesia masih mengandalkan impor untuk memenuhi kebutuhan domestik sebesar 1.596,40 ton serta adanya potensi pasar ASEAN sebesar 39.260,03 ton pada tahun 2030, maka diperoleh total potensi serapan sebesar 40.856,43 ton. Guna menjamin fleksibilitas operasional dan mengantisipasi ketidakpastian pertumbuhan ekonomi, diterapkan *overdesign factor* sebesar 1,5 (faktor keamanan 50%) sehingga diperoleh nilai kapasitas sebesar 61.284,65 ton (Towler & Sinnott, 2022). Berdasarkan pertimbangan teknis dan pembulatan ekonomis tersebut, kapasitas rancangan pabrik ditetapkan sebesar 65.000 ton per tahun.

Tabel 1. 6 Produsen *Cumene* Secara Global 2026

Lokasi	Nama Perusahaan	Kapasitas (Ton/Tahun)
INEOS Phenol	Gladbeck, Jerman	2.200.000
Sintez-Kauchuk	Sterlitamak, Rusia	60.000
Shell PLC	Texas, AS	1.750.000
SINOPEC	Shanghai, China	1.600.000
Kumho P&B Chem.	Yeosu, Korsel	750.000

Nippon Steel Chem.	Tobata, Jepang	80.000
PTT Phenol	Map Ta Phut, Thailand	650.000
Mitsui Phenols	Jurong, Singapura	410.000
SABIC-	Al-Jubail, S. Arabia	1.050.000

1.3 Pemilihan Lokasi Pabrik

Pemilihan lokasi pabrik merupakan keputusan strategis yang memerlukan analisis komprehensif terhadap aspek teknis, ekonomi, dan keselamatan kerja. Secara geografis, ketepatan lokasi tidak hanya menjamin efisiensi distribusi, tetapi juga menentukan resiliensi industri terhadap fluktuasi pasar global. Pemilihan lokasi harus didasarkan pada optimasi biaya variabel (*variable cost*) dan stabilitas infrastruktur energi guna menjamin keberlangsungan operasional yang bersifat kontinyu (*continuous process*) (Peters dkk., 2003).

Salah satu pendekatan fundamental dalam perancangan industri petrokimia adalah melalui Analisis Klaster Industri (*Industrial Clustering*). Teori ini menekankan bahwa efisiensi operasional tertinggi dicapai saat pabrik terintegrasi dalam ekosistem hulu-hilir yang matang. Berdasarkan studi penempatan pabrik pada klaster terpadu dapat mereduksi intensitas energi dan emisi karbon secara signifikan melalui skema simbiose industri, seperti pemanfaatan uap panas bumi (*excess steam*) dan pertukaran material antar unit (Gong dkk., 2023). Dalam konteks ini, lokasi ideal bagi pabrik *Cumene* adalah wilayah yang memiliki akses langsung ke terminal bahan kimia khusus demi mereduksi biaya investasi awal pada fasilitas penyimpanan (Sinnott, 2005).

Mengingat sintesis *Cumene* melibatkan reaksi alkilasi antara Benzena dan Propilena yang bersifat eksotermis dan memerlukan pengendalian tekanan tinggi, aspek keselamatan menjadi parameter kritis. Pabrik dengan bahan baku gas berisiko tinggi (*hazardous gas*) harus memprioritaskan lokasi yang memiliki jaringan perpipaan terintegrasi guna meminimalkan risiko kecelakaan selama transportasi darat (Turton dkk., 2012). Selain itu, kedekatan dengan pemasok bahan baku utama memungkinkan penerapan sistem *just-in-time* yang krusial untuk menjaga kemurnian bahan baku sebelum masuk ke reaktor tetap (*fixed-bed reactor*).

Selain itu terdapat pendekatan lain dalam pemilihan lokasi yaitu, mempertimbangkan teori *weight gain* dan *weight loss* yang menjelaskan penentuan lokasi berdasarkan efisiensi logistik dan karakteristik fisik material. Teori *weight gain* menyarankan lokasi pabrik dekat dengan pasar jika produk memiliki massa lebih besar dari bahan bakunya, sedangkan teori *weight loss* menyarankan lokasi dekat sumber bahan baku apabila produk lebih ringan atau jika bahan baku memiliki karakteristik yang sulit dan mahal untuk ditransportasikan. Dalam perancangan pabrik *Cumene*, pendekatan *weight loss* (orientasi bahan baku) menjadi dasar utama karena bahan baku Propilena dari PT Chandra Asri berada dalam kondisi cair bertekanan tinggi (11,5 atm), yang memerlukan penanganan khusus dan biaya transportasi yang lebih tinggi serta risiko lebih besar dibandingkan Benzena dari PT Pertamina (1 atm) maupun produk akhir *Cumene* yang berfasa cair stabil. Oleh karena itu, lokasi di Cilegon dipilih agar pabrik berada sedekat mungkin dengan sumber bahan baku utama guna menekan biaya logistik, meminimalkan risiko selama pengangkutan material bertekanan, dan menjamin kelancaran suplai bahan baku secara keseluruhan.

Berdasarkan pertimbangan mendalam mengenai integrasi kawasan, keamanan transportasi bahan baku bertekanan, serta efisiensi energi tersebut, terdapat tiga wilayah potensial di Indonesia yang memenuhi kriteria sebagai lokasi pembangunan pabrik *Cumene*, yaitu:

- Cilegon, Banten
- Cilacap, Jawa Tengah
- Bontang, Kalimantan Timur

Tabel 1. 7 Parameter 3 Lokasi Pabrik

Lokasi / Parameter	Cilegon, Banten	Cilacap, Jawa Tengah	Bontang, Kalimantan Timur
Bahan Baku	Sangat dekat dengan PT. Chandra Asri Petrochemical (suplai Propilena). Bahan Benzena PT Pertamina RU IV	Dekat dengan PT Pertamina RU IV sebagai penyedia aromatik dan produk kilang.	Dekat dengan kawasan Kaltim Industrial Estate (suplai berbasis gas dan minyak).

Pemasaran Produk	Potensi pasar besar di Jabodetabek untuk industri turunan (Fenol, Aseton, Nilon).	Pasar terfokus di Jawa Tengah dan distribusi merata ke arah timur/barat Jawa.	Pasar domestik terbatas, posisi strategis lebih mengarah pada ekspor Asia Timur.
Harga Tanah	Relatif tinggi (Rp 3 – 5 juta/m ²) karena zona industri berat eksklusif.	Sedang (Rp 1,5 – 3 juta/m ²) di area sekitar kawasan industri Cilacap.	Lebih rendah (Rp 1 – 2 juta/m ²) namun lahan siap bangun cukup terbatas.
Sistem Penguapan	Tinggi (Rp 4,8 – 5,2 juta), sesuai UMK Cilegon sebagai kota industri.	Rendah (Rp 2,5 – 3,0 juta), kompetitif untuk biaya operasional tenaga kerja.	Sedang-Tinggi (Rp 3,5 – 4,5 juta) karena tunjangan area industri luar Jawa.
Persediaan Tenaga Kerja	Sangat Tinggi; banyak lulusan teknik kimia dari universitas ternama dan politeknik lokal.	Tinggi; tersedia tenaga terampil berpengalaman di bidang kilang dan perminyakan.	Sedang; didominasi tenaga kerja lokal ahli gas, namun mobilitas pendatang terbatas.
Utilitas	Sangat lengkap; listrik dari PLTU Suralaya dan air industri dari PT KTI.	Terjamin melalui integrasi utilitas dengan unit kilang Pertamina dan PLTU Cilacap.	Tersedia di dalam kawasan terpadu, namun biaya pengolahan air relatif tinggi.
Limbah	Fasilitas pengolahan terpadu tersedia dengan akses pihak ketiga pengolah B3 berizin.	Terintegrasi dengan sistem pengolahan limbah kilang yang sangat ketat.	Standar pengelolaan limbah industri gas yang baik di kawasan KIE.
Transportasi	Strategis dengan Pelabuhan Ciwandan dan akses tol langsung ke pusat industri.	Didukung Pelabuhan Tanjung Intan dan jalur kereta api logistik yang mapan.	Mengandalkan jalur laut melalui dermaga khusus untuk distribusi antar pulau.

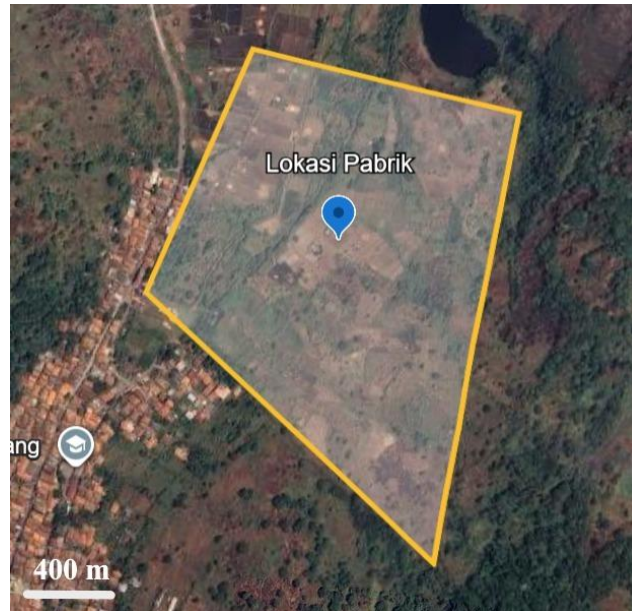
Berikut ini disajikan Tabel 1.8 analisis parameter-parameter yang penting untuk menentukan lokasi pabrik *cumene* pada tabel sebelumnya. Analisis parameter tersebut berdasarkan scoring skala prioritas sesuai dengan kondisi paling menguntungkan dalam pemilihan lokasi pabrik.

Tabel 1. 8 Matriks Penilaian 3 Lokasi Pabrik *Cumene*

Parameter	Cilegon	Cilacap	Bontang
Bahan Baku	5	4	4
Pemasaran Produk	5	4	3
Harga Tanah	3	4	5
Sistem Pengupahan	3	5	4
Persediaan Tenaga Kerja	5	4	3
Kebijakan Pemda	5	4	4
Utilitas	5	5	4
Limbah	5	5	4
Transportasi	5	4	3
Total Skor	41	39	34
Rata-rata	4,55	4,33	3,78

Berdasarkan hasil analisis terhadap berbagai parameter di atas, diperoleh kesimpulan bahwa Cilegon, Banten merupakan lokasi yang paling layak dengan skor tertinggi 4,55. Keunggulan utama Cilegon terletak pada integrasi bahan baku. Kedekatan dengan pemasok utama (PT Chandra Asri) memungkinkan pengiriman propilena melalui jalur pipa yang secara drastis menurunkan biaya logistik dan risiko transportasi. Selain itu, Cilegon memiliki infrastruktur utilitas (air dan listrik) yang paling stabil serta kedekatan dengan pasar industri hilir di Jawa Barat. Meskipun memiliki beban upah dan harga tanah yang lebih tinggi, efisiensi operasional jangka panjang menjadikannya lokasi paling strategis untuk pra-rancang pabrik *Cumene* ini.

1.3.1 Spesifikasi Lokasi



Gambar 1. 1 Lokasi Pabrik *Cumene*

Berdasarkan hasil skoring pada matriks pemilihan lokasi yang menempatkan Cilegon sebagai wilayah dengan total nilai tertinggi (4,55), maka ditentukan lokasi spesifik pembangunan pabrik *Cumene* berada di kawasan industri Ciwandan, Cilegon. Secara geografis, tapak pabrik terletak pada koordinat $5^{\circ}53'39.5''S$ $106^{\circ}03'24.2''E$ (atau -5.894305, 106.056722). Lokasi ini dipilih karena merupakan zona industri berat yang telah terverifikasi dalam sistem informasi pertanahan BHUMI, dengan peruntukan lahan industri yang siap bangun dan memiliki legalitas hukum yang kuat.

Pemilihan titik koordinat tersebut didasarkan pada keunggulan strategis yang menunjang operasional pabrik *Cumene* dari berbagai aspek teknis. Hal ini selaras dengan nilai tinggi pada parameter bahan baku di Tabel 1, karena menghilangkan ketergantungan pada logistik darat yang berisiko tinggi. Selain itu, berdasarkan data BHUMI, tersedia luas lahan sebesar 126.163 m^2 (sekitar 12,6 Ha). Luasan ini sangat memadai untuk menampung unit proses, area penyimpanan (*tank farm*), unit pengolahan limbah, hingga penyediaan zona hijau (*buffer zone*) sebagai pemenuhan standar K3 industri petrokimia. Estimasi harga lahan di zona strategis ini berkisar antara Rp 3.000.000,- hingga Rp 5.000.000,- per m^2 , sebuah investasi yang sebanding dengan ketersediaan infrastruktur pendukung yang mapan.

Dukungan utilitas di lokasi ini juga sangat memadai, di mana tapak pabrik berada dalam jangkauan distribusi air industri dari PT Krakatau Tirta Industri (KTI) dan jaringan listrik transmisi tinggi dari PLTU Suralaya. Kedekatannya dengan Pelabuhan Ciwandan memudahkan mobilisasi peralatan berat selama masa konstruksi serta memperlancar jalur distribusi produk ke pasar internasional. Integrasi di kawasan Ciwandan ini juga mempermudah koordinasi tanggap darurat antar-industri (*Mutual Aid*) mengingat statusnya sebagai Objek Vital Nasional. Dengan demikian, pemilihan spesifikasi lokasi ini menjamin efisiensi ekonomi jangka panjang serta keamanan operasional pabrik secara menyeluruh.

1.4 Pemilihan dan Penentuan Proses

Penentuan proses merupakan salah satu tahap penting dalam perancangan pabrik *Cumene*. Proses yang dipilih dapat menentukan efisiensi produksi, kualitas produk, kebutuhan energi, aspek ekonomi maupun operasional pabrik secara keseluruhan. Seiring dengan perkembangan teknologi industri petrokimia berbagai metode produksi *Cumene* telah digunakan. Beberapa perbedaan yang paling mencolok adalah pada penggunaan jenis katalis dan kondisi operasi. Perbedaan ini mempengaruhi konversi reaksi, selektivitas terhadap produk utama, kemurnian produk maupun biaya operasional. Oleh karena itu, diperlukan kajian terhadap beberapa alternatif proses produksi *Cumene* yang telah diterapkan di industri. Kajian ini bertujuan untuk memahami karakteristik masing masing proses sebagai dasar dalam menentukan proses yang paling sesuai untuk digunakan dalam perancangan pabrik dengan kapasitas yang telah ditentukan.

1.4.1 Proses AlCl_3 (Monsanto-Kellogg)

Proses AlCl_3 merupakan metode generasi pertama yang dikembangkan oleh Monsanto-Kellogg untuk produksi *cumene* secara komersial. Benzena segar maupun daur ulang dicampur dengan propilena di zona reaksi alkilasi menggunakan katalis AlCl_3 dan HCl pada suhu di bawah 135°C dan tekanan di bawah 0,4 MPa (Stefanidakis & Gwyn., 1977). Efluen dari zona alkilasi kemudian digabungkan dengan poliisopropilbenzena (PIPB) daur ulang dan diumpankan ke zona transalkilasi yang juga menggunakan katalis AlCl_3 , di mana DIPB dikonversi kembali menjadi *cumene* (Stefanidakis & Gwyn., 1977). Katalis asam kuat dipisahkan dari fasa organik dengan mencuci efluen reaktor

menggunakan air dan larutan basa (Hwang et al., 2013). Meskipun proses ini mampu menghasilkan *cumene* dengan yield hingga ~99 wt% berbasis benzena, penggunaan AlCl_3 membawa dampak serius berupa korosi tinggi, risiko keselamatan personel, serta permasalahan lingkungan akibat pembuangan katalis bekas (Hwang et al., 2013).

1.4.2 Proses SPA / Solid Phosphoric Acid (UOP)

Proses SPA dikembangkan oleh UOP menggunakan katalis asam fosfat padat yang disangga pada kieselguhr dalam konfigurasi *fixed-bed*. Proses ini beroperasi pada suhu 170–280°C dengan tekanan yang cukup untuk mempertahankan propilena dalam fasa cair, serta menggunakan rasio molar benzena/propilena di bawah 6:1 (Ghirga et al., 1982). Dalam skema dua tahap seri, tahap pertama terdiri dari beberapa bed katalis yang disusun seri, sedangkan tahap kedua menggunakan satu bed katalis dengan volume setara dengan total bed tahap pertama, beroperasi pada suhu 170–270°C dan tekanan 30–50 kg/cm² (Calcagno et al., 1982). Kelemahan utama proses ini adalah ketidakmampuan SPA dalam mempromosikan transalkilasi DIPB kembali menjadi *cumene*, sehingga DIPB dan komponen berat harus dibuang sebagai produk bawah kolom distilasi terakhir, yang mengakibatkan kerugian yield (Calcagno et al., 1982). Selain itu, katalis SPA tidak dapat diregenerasi dan harus dibuang setelah 6–18 bulan operasi, sehingga menimbulkan beban pembuangan limbah yang signifikan (Ghirga et al., 1982).

1.4.3 Proses Zeolit (*UOP Q-Max* / ExxonMobil-Badger)

Proses berbasis zeolit merupakan teknologi generasi ketiga yang saat ini mendominasi lebih dari 80% kapasitas produksi *cumene* global. Teknologi ini pertama kali dikembangkan pada akhir 1980-an, mencakup proses fixed-bed Unocal dan proses distilasi katalitik CR&L, sebelum kemudian berkembang menjadi teknologi Q-Max yang ditawarkan oleh UOP dan Badger *Cumene* Technology dari ExxonMobil (Busca., 2007). Alkilasi benzena dengan propilena dilakukan dalam reaktor fixed-bed multi-bed pada kondisi fasa cair, menggunakan katalis zeolit seperti beta, Y, MCM-22, atau UZM-8 pada suhu 50–300°C dan tekanan 0,5–10 MPa (Schmidt., 2012; Hwang & Johnson., 2017). Produk sampingan DIPB dan TIPB yang terbentuk selanjutnya diumpankan ke reaktor transalkilasi terpisah bersama benzena daur ulang untuk menghasilkan *cumene* tambahan

(Hwang & Johnson, 2017). Proses ini mampu menghasilkan *cumene* dengan kemurnian lebih dari 99,95 wt% dan yield lebih dari 99,9 wt%, sekaligus mengeliminasi masalah korosi dan pembuangan limbah katalis yang menjadi kelemahan teknologi AlCl_3 dan SPA sebelumnya (Torres-Rodríguez et al., 2012;Hwang et al., 2013).

1.4.4 Matriks dari Proses Pembuatan *Cumene*

Tabel 1. 9 Matriks Proses Pembuatan *Cumene*

Parameter	Generasi 1	Generasi 2	Generasi 3
	AlCl_3 — Monsanto	SPA — UOP	Zeolit — Q-Max / Badger
Katalis	$\text{AlCl}_3 + \text{HCl}$	H_3PO_4	Zeolit beta / Y / MCM-22 / UZM-8
Fase Reaksi	Cair	Cair/campuran	Cair (liquid phase)
Suhu operasi	<135 °C	170 – 280 °C	50 – 300 °C
Tekanan operasi	<4 bar	15-50 bar	5-30 bar
Rasio B/P molar	Tidak dipublikasikan	2:1 – 6:1	1,1:1-10:1
Tipe reaktor	Reaktor cair homogen	Fixed-bed	Fixed bed
Kemurnian <i>Cumene</i>	99 wt%	99wt%	99.95-99.97 wt%
Umur katalis	Sekali pakai (disposable)	6-18 bulan, tidak dapat diregenerasi	Panjang, dapat diregenerasi hingga 5 tahun
Korosi peralatan	Sangat tinggi (HCl)	Sedang (H_3PO_4)	Sangat rendah
Yield (basis benzena)	99 wt%	95-97 wt%	$\geq 99,95$ -99,97 wt%
Yield (basis propilene)	98 wt%	Rendah (DIPB tidak dapat di transkilasi)	≥ 98 wt%
Transalkilasi DIPB	Ya (zona AlCl_3 terpisah)	Tidak-SPA tidak aktif	Ya (reaktor transalkilasi)
Teknologi lisensi	Monsanto-Kellogg	UOP (SPA Process)	UOP Q-Max ² , ExxonMobil-Badger, EniChem

1.4.4 Uraian Umum Proses Terpilih

Proses yang dipilih pada perancangan ini mengacu pada teknologi alkilasi fasa cair berbasis zeolit yang dikembangkan serupa dengan pendekatan *UOP Q-Max*, dengan menggunakan katalis zeolit beta dalam konfigurasi dua reaktor fixed-bed seri. Pemilihan proses ini didasarkan pada beberapa pertimbangan teknis dan ekonomis.

Ditinjau dari aspek teknologi, proses berbasis zeolit telah terbukti mendominasi lebih dari 80% kapasitas produksi *cumene* global karena keunggulannya dalam hal kemurnian produk, yield, dan dampak lingkungan dibandingkan proses AlCl_3 maupun SPA (Busca., 2007). Zeolit beta dipilih sebagai katalis karena memiliki aktivitas yang lebih tinggi dibandingkan zeolit Y serta selektivitas yang lebih baik terhadap produk monoalkilasi, dengan pembentukan DIPB sebagai produk samping yang lebih rendah (Hwang et al., 2008). Konfigurasi fixed-bed dipilih karena kemudahan operasi dan kesesuaiannya dengan kondisi fasa cair yang diperlukan untuk meminimalkan reaksi oligomerisasi propilena (Bhan et al., 1990).

Ditinjau dari aspek kondisi operasi, reaktor alkilasi (R-01) dioperasikan pada suhu 150–200°C dan tekanan 30 bar dalam fasa cair, sedangkan reaktor transalkilasi (R-02) dioperasikan pada suhu 100–200°C dan tekanan 20–30 bar (Bhan et al., 1990; Bokade & Kharul., 2005). Rasio molar benzena terhadap propilena ditetapkan sebesar 5:1 untuk menekan pembentukan poliisopropilbenzena (PIPB) sekaligus mengurangi beban daur ulang benzena pada kolom distilasi (Schmidt., 2012). DIPB yang terbentuk sebagai produk samping di reaktor alkilasi direcovery dan dikonversi kembali menjadi *cumene* di reaktor transalkilasi, sehingga yield keseluruhan proses meningkat secara signifikan dibandingkan proses SPA yang tidak memiliki unit transalkilasi (Hwang & Johnson., 2017).

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1 Spesifikasi Bahan Baku Produk

Bahan baku yang digunakan dalam proses produksi *cumene* dengan skema alkilasi–transalkilasi adalah propilena dan benzena. Propilena yang digunakan memiliki kemurnian sebesar 99,60% dan dipasok oleh PT Chandra Asri Petrochemical Tbk, sedangkan benzena memiliki kemurnian 99,90% yang diperoleh dari PT Pertamina RU IV Cilacap, Jawa Tengah.

Spesifikasi dan tingkat kemurnian bahan baku menjadi aspek penting yang harus diperhatikan karena berpengaruh terhadap metode penanganan, baik selama proses transportasi maupun pada tahap produksi. Oleh karena itu, evaluasi terhadap karakteristik fisik dan kimia bahan baku perlu dilakukan untuk memastikan kesesuaian dengan kebutuhan proses serta menjaga kestabilan dan efisiensi operasi.

2.1.1 Spesifikasi Propilena (C₃H₆)

1. Sifat Fisika

Tabel 2. 1 Sifat Fisika dan Termodinamika Propilena

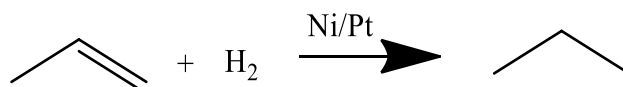
Parameter	Nilai
Berat molekul	42,08 g/mol
Titik didih (1 atm)	–47,7 °C
Titik leleh (1 atm)	–185,17 °C
Densitas (20 °C, 1 atm)	0,00178 g/cm ³
Titik nyala	–108 °C
Suhu penyalan otomatis (autoignition temperature)	455 °C
Tekanan uap (25 °C)	1159 kPa
Viskositas (25 °C)	0,00858 mPa·s
Konduktivitas termal (25 °C)	0,017 W/m·°C
Panas pembentukan (25 °C)	–124 kJ/mol
Kapasitas panas pada titik didih	0,9208 × 10 ⁵ J/kmol·°C
Tekanan kritis	4239 kPa
Suhu kritis	99,2 °C
Wujud pada 25 °C dan 1 atm	Gas

2. sifat kimia

Secara kimia, propilena merupakan senyawa alkena yang memiliki ikatan rangkap dua (C=C), sehingga bersifat reaktif terhadap berbagai reaksi adisi dan polimerisasi.

a. Reaksi Hidrogenasi

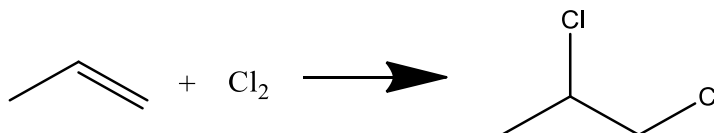
Propilena dapat mengalami reaksi hidrogenasi dengan penambahan gas hidrogen (H₂) menggunakan katalis logam seperti nikel atau platina. Reaksi ini menghasilkan senyawa alkana, yaitu propana (Solomons & Fryhle, 2012).



Gambar 2. 1 Reaksi hidrogenasi propilena

b. Reaksi Adisi Halogen

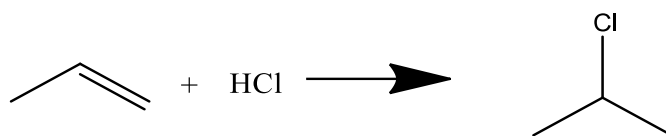
Ikatan rangkap pada propilena memungkinkan terjadinya reaksi adisi dengan halogen, misalnya Cl₂, membentuk senyawa dihaloalkana seperti 1,2-dikloropropana (Solomons & Fryhle, 2012).



Gambar 2. 2 Reaksi adisi halogen dari propilena

c. Reaksi Adisi Asam Halida

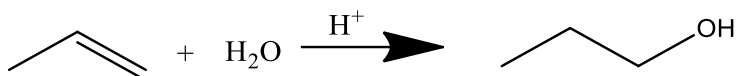
Propilena juga dapat bereaksi dengan asam halida (contohnya HCl) melalui mekanisme adisi elektrofilik, menghasilkan senyawa haloalkana seperti 2-kloropropana sesuai dengan aturan Markovnikov (Solomons & Fryhle, 2012).



Gambar 2. 3 Reaksi adisi asam halogen dari propilena

d. Reaksi Hidrasi

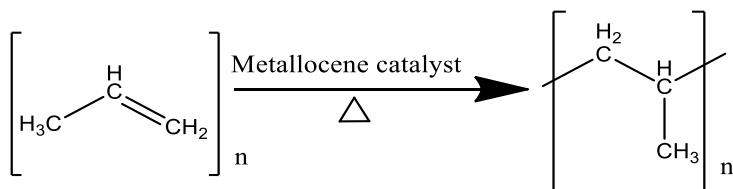
Dalam kondisi asam, propilena dapat bereaksi dengan air membentuk alkohol. Produk yang terbentuk bergantung pada kondisi reaksi, namun secara umum menghasilkan turunan propanol (Solomons & Fryhle, 2012).



Gambar 2. 4 Reaksi hidrasi propilena

e. Reaksi Polimerisasi

Propilena dapat mengalami polimerisasi melalui mekanisme radikal atau katalitik, menghasilkan polipropilena. Proses ini melibatkan tahap inisiasi, propagasi, dan terminasi, yang diawali dengan pembentukan spesies aktif pada atom karbon ikatan rangkap (Solomons & Fryhle, 2012).



Gambar 2. 5 Reaksi polimerisasi propilena menjadi polipropilena

2.1.2 Spesifikasi Benzena

1. Sifat Fisika

Tabel 2. 2 Sifat Fisika dan Termodinamika Benzena

Parameter	Nilai
Rumus molekul	C ₆ H ₆
Berat molekul	78,11 g/mol

Wujud pada 25 °C dan 1 atm	Cair
Titik didih (1 atm)	80,08 °C
Titik leleh	5,5 °C
Densitas (20 °C)	0,878–0,879 g/cm ³
Tekanan uap (25 °C)	12,7 kPa
Viskositas (25 °C)	0,604 mPa·s
Titik nyala	–11 °C
Suhu penyalan otomatis	498 °C
Suhu kritis	288 °C
Tekanan kritis	4852 kPa
Panas penguapan	33,83 kJ/mol

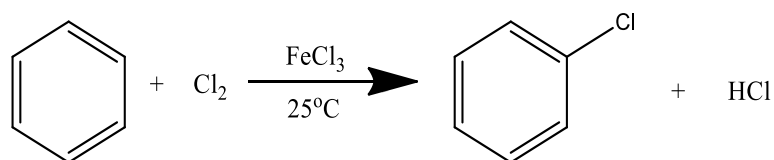
2. Sifat Kimia

a. Karakteristik Kimia Cincin Aromatik

Benzena merupakan senyawa aromatik yang memiliki sistem cincin dengan ikatan rangkap terkonjugasi. Delokalisasi elektron π pada struktur cincin menyebabkan kestabilan aromatik yang tinggi, sehingga benzena tidak mudah mengalami reaksi adisi seperti alkena. Sebaliknya, reaksi yang umum terjadi pada benzena adalah reaksi substitusi aromatik elektrofilik, seperti substitusi oleh gugus halogen, nitro, sulfonat, maupun alkil (Solomons & Fryhle, 2012).

b. Reaksi Halogenasi

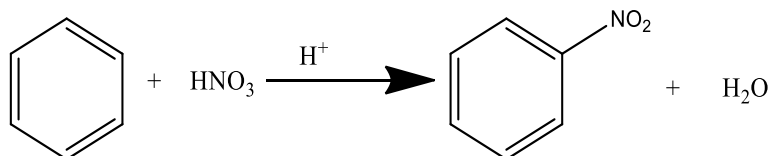
Benzena dapat bereaksi dengan halogen, misalnya klorin (Cl_2), melalui mekanisme substitusi aromatik elektrofilik dengan bantuan katalis asam Lewis seperti FeCl_3 . Pada kondisi suhu sekitar 25 °C, reaksi ini menghasilkan klorobenzena sebagai produk utama.



Gambar 2. 6 Reaksi halogenasi benzena

c. Reaksi Nitrasi

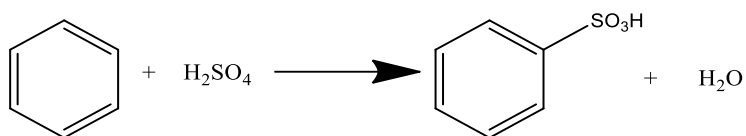
Dalam campuran asam nitrat (HNO_3) dan asam kuat sebagai katalis, benzena mengalami reaksi substitusi membentuk nitrobenzena. Reaksi ini berlangsung melalui pembentukan elektrofil kuat (ion nitronium) yang menyerang cincin aromatik.



Gambar 2. 7 Reaksi nitrasi benzena

d. Reaksi Sulfonasi

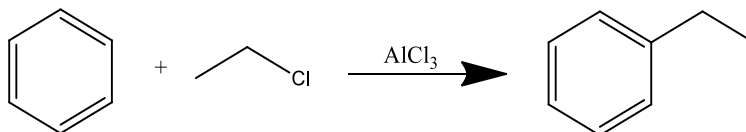
Benzena juga dapat mengalami reaksi substitusi dengan asam sulfat pekat atau sulfur trioksida (SO_3), menghasilkan asam benzenasulfonat. Reaksi ini bersifat reversibel dan termasuk dalam mekanisme substitusi aromatik elektrofilik.



Gambar 2. 8 Reaksi sulfatasi benzena

e. Reaksi Alkilasi dan Transalkilasi

Benzena dapat bereaksi dengan senyawa alkil halida melalui reaksi alkilasi Friedel–Crafts dengan bantuan katalis asam Lewis seperti AlCl_3 , menghasilkan alkilbenzena. Selain itu, dalam sistem tertentu dapat terjadi reaksi transalkilasi, yaitu perpindahan gugus alkil antar molekul aromatik. Reaksi inilah yang menjadi dasar dalam proses produksi *cumene* melalui alkilasi benzena dengan propilena.



Gambar 2. 9 Reaksi alkilasi benzena

2.2 Spesifikasi bahan penunjang

2.2.1 Spesifikasi Katalis

Dalam proses produksi *cumene* melalui reaksi alkilasi benzena dengan propilena digunakan katalis padat berupa β -zeolite. Katalis ini dipilih karena memiliki aktivitas dan selektivitas yang tinggi terhadap pembentukan *cumene*, stabil pada kondisi reaksi fase cair, serta lebih ramah lingkungan dibandingkan katalis asam konvensional seperti *solid phosphoric acid* (SPA). Selain itu, β -zeolite memiliki struktur pori besar (*large pore zeolite*) yang memudahkan difusi molekul benzena, propilena, dan *cumene* sehingga banyak diaplikasikan pada proses alkilasi aromatik di industri (Ercan et al., 1998; Perego et al., 1996).

Pada penelitian Ercan et al. (1998), katalis β -zeolite komersial yang digunakan berbentuk ekstrudat berdiameter ekuivalen 1,6 mm, dengan densitas partikel sebesar 1000 kg/m³, porositas partikel sebesar 0,5, dan faktor tortuositas sebesar 5,0. Nilai porositas dan tortuositas tersebut digunakan sebagai asumsi untuk evaluasi perpindahan massa pada reaktor fase cair. Spesifikasi katalis β -zeolite ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Spesifikasi Katalis β -Zeolite

Parameter	Nilai
Nama	β -Zeolite
Struktur	BEA
Bentuk	Ekstrudat (<i>extrudate</i>)
Diameter partikel ekuivalen	1,6 mm
Densitas partikel	1000 kg/m ³
Porositas partikel	0,5
Faktor tortuositas	5,0
Luas permukaan BET	690 m ² /g
Rasio Si/Al	10
Kandungan Na ₂ O	0,11 wt%

2.3 Spesifikasi Produk

2.3.1 Spesifikasi Isopropil Benzena (*Cumene*)

1. Sifat Fisika

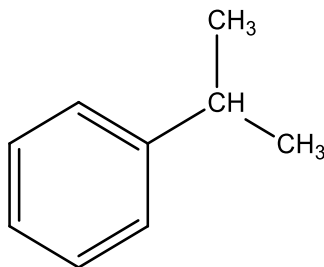
Tabel 2. 4 Sifat Fisika dan Termodinamika Isopropil Benzena

Parameter	Nilai
Berat molekul	120,19 gr/mol
Titik beku	-96,03°C
Titik didih	152,39°C
Titik leleh	-96,0°C
Titik nyala	44°C
Tekanan uap (pada 35°C)	1 kPa
Densitas (pada 20°C)	0.8619 g/cm ³
Densitas uap (terhadap udara)	4:1
Viskositas (pada 25 °C)	0,737 mPa.s
Panas penguapan	45,13 kJ/mol
Konduktivitas termal (pada 25°C)	1,4915 kJ/mol
Indeks bias	0,124 n_D^{20}
Kelarutan (air, pada 25°C)	61,3 mg/L

2. Sifat Kimia

Isopropil benzena (*cumene*) merupakan senyawa aromatik yang tersusun atas satu cincin benzena dengan sistem ikatan rangkap terkonjugasi serta satu gugus isopropil sebagai substituen. Keberadaan sistem aromatik menyebabkan *cumene* memiliki kestabilan yang tinggi terhadap reaksi adisi, sehingga secara umum senyawa ini lebih cenderung mengalami reaksi substitusi aromatik dibandingkan reaksi adisi. Reaksi yang umum terjadi meliputi substitusi aromatik elektrofilik maupun, dalam kondisi tertentu, substitusi yang dipengaruhi oleh keberadaan gugus pengarah pada cincin (Solomons & Fryhle, 2012).

Selain reaksi substitusi, *cumene* memiliki kecenderungan untuk mengalami reaksi oksidasi apabila bereaksi dengan oksigen pada kondisi tertentu. Reaksi oksidasi ini menghasilkan senyawa antara berupa *cumene* hidroperoksida, yang merupakan intermediate utama dalam proses industri produksi fenol dan aseton (Kharlampidi et al., 2021).

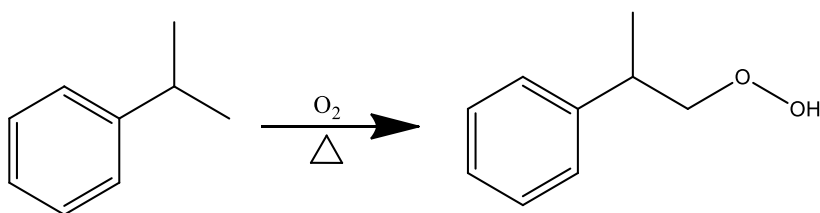


Gambar 2. 10 Struktur molekul Isopropil Benzena (PubChem, 2023)

a. Reaksi Oksidasi *Cumene*

Cumene dapat teroksidasi oleh oksigen membentuk *cumene* hidroperoksida melalui mekanisme reaksi radikal bebas. Proses ini umumnya berlangsung pada suhu sekitar 90–100 °C dalam reaktor fase cair dengan pengendalian suplai oksigen. Dalam beberapa sistem, digunakan katalis berbasis logam untuk meningkatkan laju reaksi.

Reaksi oksidasi *cumene* berlangsung relatif lambat dan kinetiknya dipengaruhi oleh konsentrasi oksigen terlarut dalam fase cair. Oleh karena itu, pengendalian suhu dan tekanan sangat penting untuk menjaga kestabilan proses serta mencegah reaksi samping yang tidak diinginkan (Kharlampidi et al., 2021).

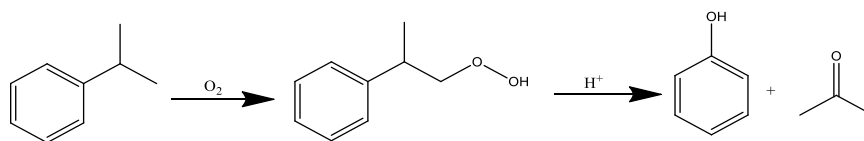


Gambar 2. 11 Reaksi oksidasi Isopropil benzene

b. Reaksi Pembentukan Fenol dan Aseton

Produksi fenol dan aseton dari *cumene* dikenal sebagai Proses *Cumene* dan berlangsung melalui dua tahap utama. Tahap pertama adalah oksidasi *cumene* membentuk *cumene* hidroperoksida. Tahap kedua adalah pemecahan (cleavage) atau dekomposisi *cumene* hidroperoksida dalam suasana asam, yang menghasilkan fenol dan aseton sebagai produk utama.

Secara keseluruhan, reaksi ini sangat penting dalam industri petrokimia karena menyediakan rute produksi fenol dan aseton dengan efisiensi tinggi dan nilai ekonomi yang besar. Fenol digunakan dalam pembuatan resin fenolik dan bisfenol-A, sedangkan aseton dimanfaatkan sebagai pelarut dan bahan baku sintesis berbagai senyawa organik.



Gambar 2. 12 Reaksi pembentukan fenol dari Isopropil benzene

2.4 Kegunaan Produk Isopropil Benzena (*Cumene*)

Isopropil benzena (*cumene*) merupakan salah satu senyawa aromatik yang memiliki peranan penting dalam industri kimia. Senyawa ini banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku maupun bahan antara dalam berbagai proses industri, dengan kegunaan sebagai berikut:

1. Bahan baku utama produksi fenol dan aseton

Sebagian besar *cumene* digunakan sebagai bahan baku dalam proses *cumene* (*cumene* process) untuk menghasilkan fenol dan aseton melalui tahap oksidasi menjadi *cumene* hidroperoksida yang kemudian dipecah. Fenol digunakan dalam industri resin, plastik, dan farmasi, sedangkan aseton banyak digunakan sebagai pelarut industri.

2. Bahan baku industri resin dan plastik

Produk turunan dari *Cumene* merupakan prekursor fenol yang selanjutnya digunakan dalam industri resin fenolik dan bisfenol-A (BPA), yang merupakan bahan

dasar dalam produksi plastik polikarbonat dan resin epoksi. Material ini digunakan dalam industri elektronik, otomotif, dan konstruksi.

3. Pelarut dalam industri kimia

Cumene dapat digunakan sebagai pelarut untuk berbagai senyawa organik, terutama dalam proses yang melibatkan zat non-polar. Sifatnya yang relatif stabil dan non-polar membuatnya cocok untuk aplikasi ini.

4. Komponen dalam bahan bakar

Cumene dapat digunakan sebagai aditif dalam bahan bakar untuk meningkatkan nilai oktan. Struktur aromatiknya membantu meningkatkan performa pembakaran pada mesin.

5. Intermediat dalam sintesis kimia lainnya

Cumene juga digunakan sebagai bahan antara dalam sintesis berbagai senyawa kimia lainnya, termasuk bahan kimia khusus (specialty chemicals) dan beberapa produk farmasi.

2.5 Konsep Proses

2.5.1 Dasar Reaksi

Proses *cumene* merupakan metode industri yang digunakan untuk menghasilkan fenol dan aseton dari bahan baku benzena dan propena dengan bantuan oksigen. Proses ini menjadi sangat penting karena mampu menghasilkan dua produk bernilai tinggi secara simultan dalam satu rangkaian reaksi. Selain itu, bahan baku yang digunakan relatif murah dan tersedia dalam jumlah besar, sehingga proses ini banyak diterapkan secara komersial.

Cumene atau isopropylbenzene adalah senyawa aromatik dengan rumus molekul C_9H_{12} yang terdiri atas cincin benzena yang terikat pada gugus isopropil. Keberadaan karbon benzylic, yaitu karbon yang terikat langsung pada cincin aromatik, memberikan sifat reaktivitas yang khas pada senyawa ini. Karbon benzylic mudah mengalami reaksi oksidasi karena radikal yang terbentuk pada posisi tersebut dapat distabilkan oleh resonansi dengan sistem π pada cincin benzena.

Secara umum, proses *cumene* melibatkan tiga konsep utama dalam kimia organik, yaitu substitusi elektrofilik aromatik, reaksi radikal bebas, dan rearrangement molekul.

Tahap pertama melibatkan reaksi alkilasi benzena oleh propena untuk menghasilkan *cumene*. Tahap kedua adalah oksidasi *cumene* menjadi *cumene* hydroperoxide melalui mekanisme radikal berantai. Tahap terakhir adalah pemecahan *cumene* hydroperoxide dalam suasana asam melalui reaksi yang dikenal sebagai Hock rearrangement, yang menghasilkan fenol dan aseton sebagai produk akhir.

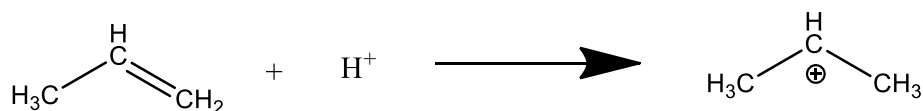
2.5.1.1 Mekanisme Reaksi *Cumene*

Mekanisme reaksi dalam proses *cumene* terdiri atas tiga tahap utama yang berlangsung secara berurutan, diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Mekanisme Tahap 1: Pembentukan Karbokation (Protonasi Propilena)

Pada tahap awal, propilena berinteraksi dengan situs asam Brønsted (H^+) yang terdapat pada katalis zeolit. Ikatan rangkap $C=C$ pada propilena memiliki kerapatan elektron tinggi sehingga bersifat nukleofilik dan mudah mengalami serangan oleh proton. Protonasi terjadi mengikuti aturan Markovnikov, di mana proton berikatan dengan atom karbon yang memiliki jumlah atom hidrogen lebih banyak, sehingga menghasilkan karbokation sekunder (isopropil kation) yang lebih stabil dibandingkan kemungkinan karbokation primer.

Stabilitas karbokation ini sangat penting karena akan menentukan kelanjutan reaksi. Dalam sistem zeolit, karbokation tidak sepenuhnya bebas, melainkan terstabilkan oleh lingkungan pori dan situs asam katalis, sehingga meningkatkan peluang terjadinya reaksi lanjutan secara selektif.

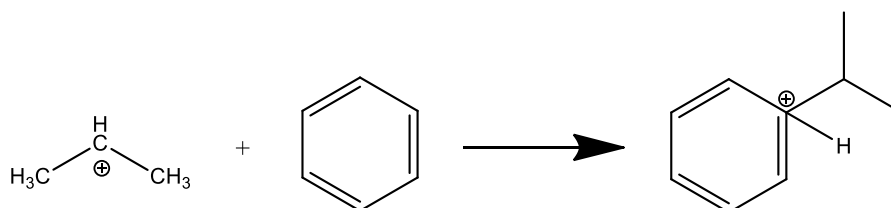


Gambar 2. 13 Tahap Alkilasi Benzena

2. Mekanisme Tahap II: Serangan Elektrofilik ke Benzena (Alkilasi)

Karbokation isopropil yang terbentuk selanjutnya bertindak sebagai elektrofil kuat dan menyerang cincin benzena yang kaya elektron (π -elektron). Serangan ini menghasilkan ikatan baru antara karbon karbokation dengan salah satu atom karbon pada cincin benzena, membentuk suatu intermediat yang dikenal sebagai kompleks sigma (arenium ion).

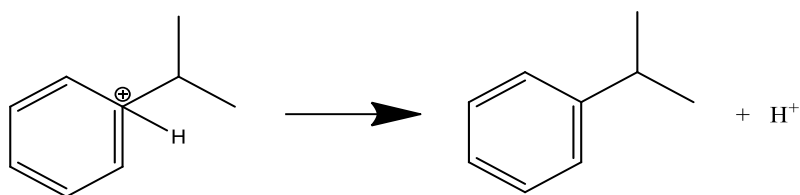
Pada tahap ini, sistem aromatik benzena sementara terganggu karena salah satu atom karbon berubah dari hibridisasi sp^2 menjadi sp^3 . Muatan positif pada kompleks sigma tidak terlokalisasi pada satu atom, melainkan terdelokalisasi di sepanjang cincin aromatik melalui resonansi, yang memberikan stabilisasi parsial terhadap intermediat tersebut. Tahap ini merupakan tahap yang paling menentukan dalam mekanisme reaksi karena melibatkan pembentukan intermediat berenergi tinggi, sehingga sering dianggap sebagai tahap penentu laju reaksi (rate determining step).



Gambar 2. 14 Tahap Oksidasi *Cumene*

3. Mekanisme Tahap III: Deprotonasi dan Pembentukan *Cumene*

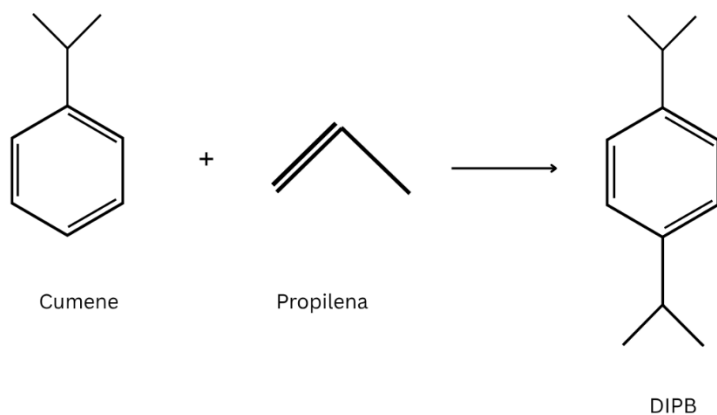
Pada tahap akhir, kompleks sigma mengalami pelepasan proton (H^+) dari atom karbon yang terikat pada gugus isopropil. Pelepasan proton ini bertujuan untuk mengembalikan struktur aromatik benzena yang stabil. Proton yang dilepaskan akan kembali ke situs asam katalis zeolit, sehingga katalis dapat digunakan kembali dalam siklus reaksi berikutnya. Hasil dari tahap ini adalah terbentuknya *cumene* (isopropilbenzena) sebagai produk utama. Proses regenerasi katalis ini menunjukkan bahwa zeolit berperan sebagai katalis sejati yang tidak habis selama reaksi berlangsung.



Gambar 2. 15 Tahap Hock Rearrangement

2.5.1.2 Mekanisme Reaksi Samping Pembentukan Diisopropilbenzena (DIPB)

Pembentukan diisopropilbenzena (DIPB) terjadi sebagai reaksi samping (over-alkylation) pada proses alkilasi benzena-propilena. Reaksi ini berlangsung ketika *cumene* yang telah terbentuk kembali bereaksi dengan propilena melalui mekanisme substitusi aromatik elektrofilik (*Electro Aromatic Substitution, EAS*) menggunakan katalis zeolit. Pada reaksi ini, propilena akan membentuk karbokation isopropil sebagai elektrofil aktif yang kemudian menyerang cincin aromatik *cumene* sehingga menghasilkan DIPB.

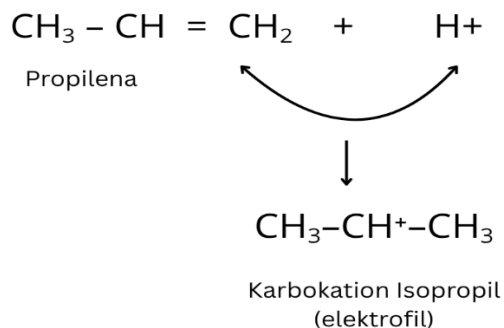


Gambar 2. 16 Reaksi pembentukan DIPB

1. Mekanisme Tahap I: Pembentukan Karbokation Isopropil

Pada tahap awal, propilena berinteraksi dengan situs asam Brønsted (H^+) pada katalis zeolit. Ikatan rangkap $C=C$ pada propilena memiliki kerapatan elektron tinggi sehingga mudah mengalami protonasi mengikuti aturan Markovnikov. Proton akan berikatan dengan atom karbon yang memiliki jumlah atom hidrogen lebih banyak sehingga terbentuk karbokation sekunder (isopropyl cation) yang lebih stabil.

Karbokation isopropil yang terbentuk berfungsi sebagai elektrofil aktif pada mekanisme substitusi aromatik elektrofilik (EAS). Dalam sistem zeolit, karbokation distabilkan oleh lingkungan pori dan situs asam katalis sehingga meningkatkan selektivitas reaksi.

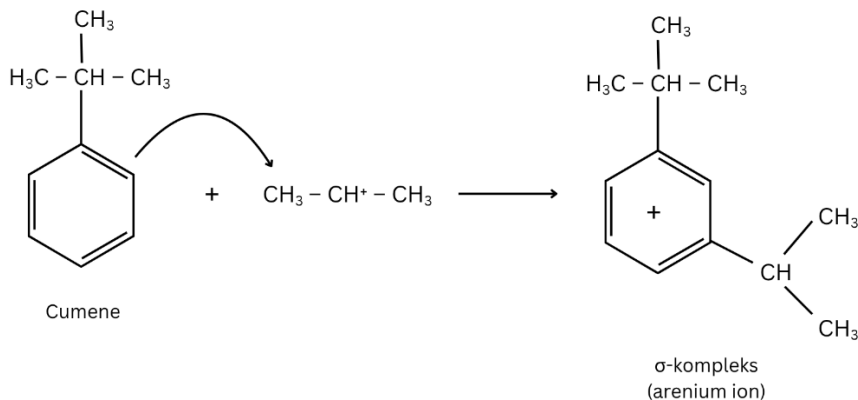


Gambar 2. 17 Tahap Pembentukan Karbokation Isopropil

2. Mekanisme Tahap II: Serangan Elektrofilik pada Cincin Aromatik *Cumene*

Karbokation isopropil yang terbentuk kemudian menyerang cincin aromatik *cumene* sehingga terbentuk σ -kompleks (arenium ion). Gugus isopropil pada *cumene* bersifat pengarah orto-para sehingga substitusi gugus isopropil kedua cenderung terjadi pada posisi orto atau para terhadap gugus isopropil pertama.

Tahap pembentukan σ -kompleks merupakan tahap paling lambat (*rate determining step*) karena aromatisitas cincin benzena sementara hilang akibat terbentuknya ikatan baru antara cincin aromatik dan elektrofil. Muatan positif pada σ -kompleks terdelokalisasi pada cincin aromatik sehingga intermediate yang terbentuk relatif lebih stabil.

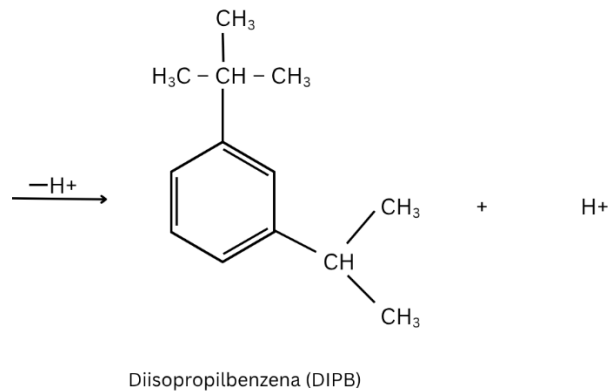


Gambar 2. 18 Tahap Serangan Elektrofilik pada *Cumene*

3. Mekanisme Tahap III: Deprotonasi dan Pembentukan DIPB

Pada tahap akhir, σ -kompleks mengalami pelepasan proton (deprotonasi) sehingga aromatisitas cincin benzena kembali terbentuk dan menghasilkan diisopropilbenzena (DIPB). Proton yang dilepaskan akan kembali ke permukaan katalis zeolit sehingga katalis dapat diregenerasi selama proses berlangsung.

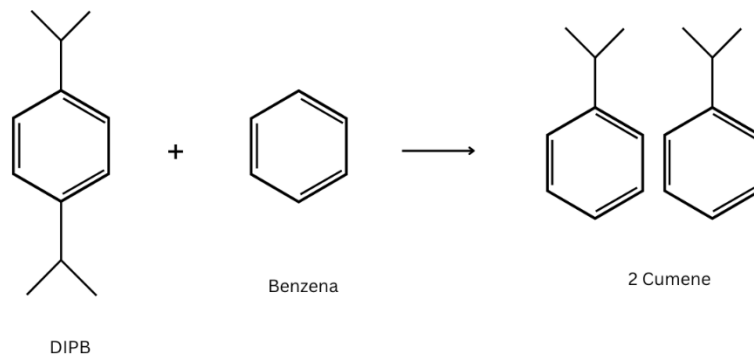
Pembentukan DIPB umumnya meningkat ketika konsentrasi propilena terlalu tinggi atau rasio benzena terhadap propilena terlalu rendah di dalam reaktor alkilasi.



Gambar 2. 19 Tahap Pembentukan Diisopropilbenzena (DIPB)

2.5.1.3 Mekanisme Reaksi Transalkilasi DIPB menjadi *Cumene*

Reaksi transalkilasi merupakan reaksi konversi produk samping diisopropilbenzena (DIPB) menggunakan benzene untuk menghasilkan *cumene* tambahan. Reaksi ini bertujuan meningkatkan yield *cumene* dan mengurangi akumulasi produk samping berat didalam sistem proses.

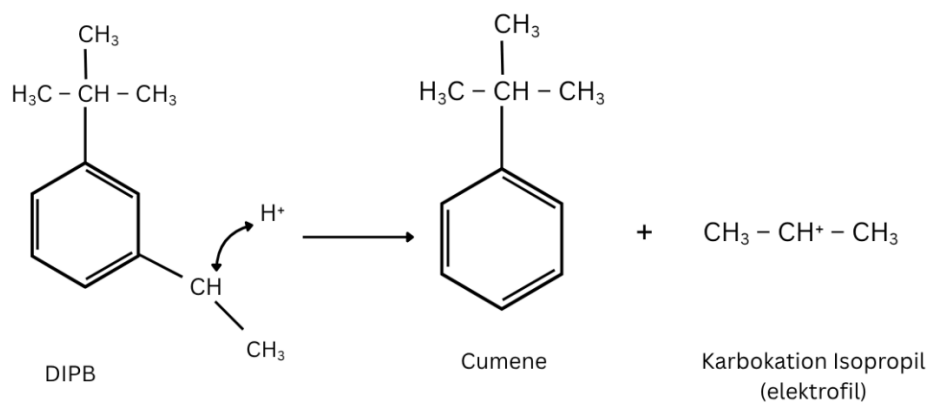


Gambar 2. 20 Reaksi Transalkilasi DIPB menjadi *Cumene*

1. Mekanisme Tahap I: Pelepasan Gugus Isopropil dari DIPB

Pada tahap awal reaksi transalkilasi, salah satu gugus isopropil pada molekul DIPB diprotonasi oleh situs asam Brønsted katalis zeolit. Protonasi ini menyebabkan ikatan antara gugus isopropil dan cincin aromatik melemah sehingga salah satu gugus isopropil dapat terlepas membentuk karbokation isopropil sebagai elektrofil aktif.

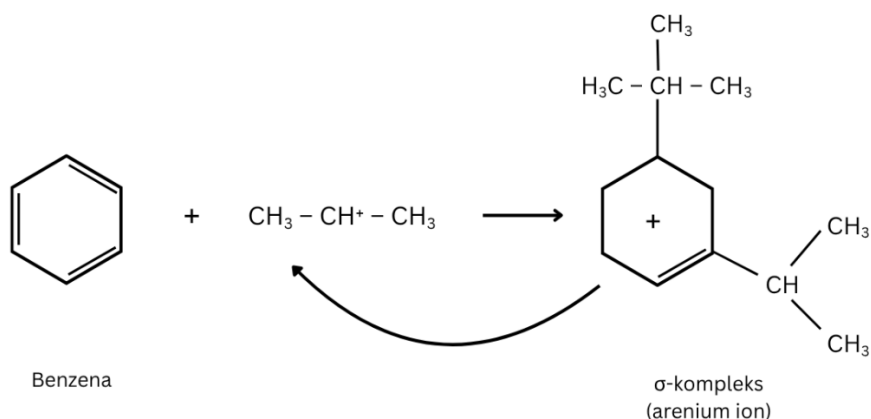
Tahap ini menghasilkan satu molekul *cumene* dan satu karbokation isopropil yang selanjutnya akan bereaksi dengan benzena.



Gambar 2. 21 Tahap Pelepasan Gugus Isopropil dari DIPB

2. Mekanisme Tahap II: Serangan Elektrofilik ke Benzena

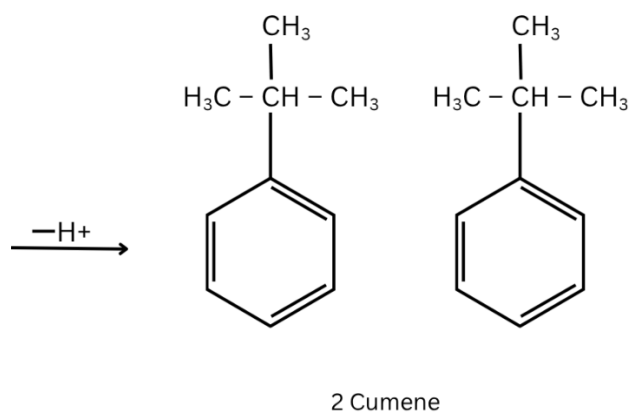
Karbokation isopropil yang terbentuk kemudian menyerang cincin aromatik benzena sehingga membentuk σ -kompleks (arenium ion). Tahap ini menjadi tahap pengendali laju (*rate determining step*) karena membutuhkan energi aktivasi untuk mengganggu kestabilan aromatik benzena.



Gambar 2. 22 Tahap Serangan Elektrofilik pada Benzena

3. Mekanisme Tahap III: Deprotonasi dan Pembentukan *Cumene*

σ -kompleks yang terbentuk selanjutnya mengalami deprotonasi sehingga aromatisitas cincin benzena kembali terbentuk dan menghasilkan *cumene* sebagai produk akhir. Karena itu satu molekul DIPB memiliki dua gugus isopropil, maka secara keseluruhan reaksi transalkilasi dapat menghasilkan dua molekul *cumene*.



Gambar 2. 23 Tahap Pembentukan *Cumene* pada Reaksi Transalkilasi

2.5.2 Kondisi Operasi

Pada perancangan ini, reaksi berlangsung pada temperatur 150–200°C dan tekanan 30 bar. Kondisi tersebut dipilih untuk memastikan seluruh komponen berada dalam fase cair selama reaksi berlangsung, sekaligus meningkatkan laju reaksi dan selektivitas terhadap *cumene*. Selain itu, digunakan kelebihan benzena dengan rasio mol benzena terhadap propilena yaitu 5:1. Penggunaan benzena berlebih ini berfungsi sebagai penyerap

panas reaksi dan untuk menekan pembentukan produk samping seperti diisopropilbenzena (DIPB), sehingga diperoleh selektivitas yang lebih tinggi.

Reaktor alkilasi dioperasikan secara adiabatik dengan temperatur umpan berkisar antara 150–200°C. Karena reaksi bersifat sangat eksotermis, temperatur keluaran reaktor dapat meningkat secara signifikan, misalnya dari sekitar 170°C hingga lebih dari 250°C. Oleh karena itu, pengendalian temperatur, tekanan, serta rasio umpan menjadi parameter kunci dalam menjaga kestabilan proses, sehingga konversi propilena dapat mendekati 100% dengan selektivitas tinggi terhadap *cumene*.

Tabel 2. 5 Kondisi Operasi pada Pembuatan Isopropil Benzene

Parameter	Nilai
Fase	Liquid
Suhu	170-250°C
Tekanan	30 bar
Rasio Molar Propilene : Benzena	1:5

2.5.3 Tinjauan Termodinamika

a. Tinjauan Kapasitas Panas (Cp)

Berdasarkan data yang diperoleh dari literatur Chemical Properties Handbook (Yaws, 1999), nilai kapasitas panas pada tekanan konstan (Cp) untuk masing-masing komponen yang terlibat dalam reaksi pembentukan isopropil benzena dari propilena dan benzena dapat dinyatakan sebagai fungsi temperatur. Data konstanta yang digunakan disajikan pada Tabel 2.6 berikut.

Tabel 2. 6 Nilai kapasitas panas

Komponen	A	B	C	ΔH_f° (kJ/mol K)
Propilena (C ₃ H ₆)	37,334	$-6,5191 \times 10^{-2}$	$2,8085 \times 10^{-5}$	20,42
Benzena (C ₆ H ₆)	101,403	$-7,2136 \times 10^{-2}$	$3,2877 \times 10^{-5}$	82,93

Isopropil benzene (C ₉ H ₁₂)	36,884	-1,1368 × 10 ⁻¹	6,3911 × 10 ⁻⁵	3,93
--	--------	----------------------------	---------------------------	------

Pada perancangan ini ditetapkan kondisi operasi reaksi pada temperatur 250°C (523 K). Oleh karena itu, diperlukan perhitungan nilai kapasitas panas masing-masing komponen pada temperatur tersebut. Menurut Yaws (1999), kapasitas panas pada tekanan konstan dapat dihitung menggunakan persamaan empiris sebagai berikut:

$$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3$$

di mana:

- C_p = kapasitas panas (kJ/kmol·K atau J/mol)
- T = temperatur (K)
- A, B, C, D = konstanta empiris masing-masing komponen

b. Tinjauan Entalpi Pembentukan (ΔH_f)

Data nilai entalpi pembentukan standar untuk masing-masing komponen yang terlibat dalam reaksi pembentukan isopropil benzena diperoleh dari literatur *Chemical Properties Handbook* (Yaws, 1999), yang disajikan dalam bentuk konstanta empiris sebagai fungsi temperatur. Data konstanta tersebut disajikan pada Tabel 2.7 berikut.

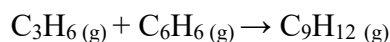
Tabel 2. 7 Nilai entalpi pembentukan pada 298K

Komponen	ΔH_f° (kJ/mol K) T = 298K
Propilena (C ₃ H ₆)	20,42
Benzena (C ₆ H ₆)	82,93
Isopropil Benzena (C ₉ H ₁₂)	3,93

c. Tinjauan Perubahan Entalpi Reaksi (ΔH_r)

Perubahan entalpi reaksi (ΔH_r) merupakan besaran yang menunjukkan jumlah panas yang dilepaskan atau diserap selama reaksi berlangsung. Nilai ΔH_r dihitung berdasarkan data entalpi pembentukan (ΔH_f) dari masing-masing komponen, yaitu selisih antara jumlah entalpi produk dan reaktan sesuai stoikiometri reaksi.

Reaksi yang berlangsung pada desain ini dapat dituliskan seperti berikut.



Perhitungan nilai panas reaksi pada desain ini ialah seperti berikut.

$$\Delta H_r = [\Delta H_f C_9H_{12}] - [(\Delta H_f C_3H_6) + (\Delta H_f C_6H_6)]$$

$$\Delta H_r = [3.93] - [(20.42) + (82.93)] \text{ kJ/mol K}$$

$$\Delta H_r = -99.42 \text{ kJ/mol K}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, dapat disimpulkan bahwa reaksi bersifat eksotermis dengan nilai $\Delta H_r = -99.42 \text{ kJ/mol K}$.

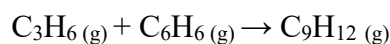
d. Konstanta Kesetimbangan pada Kondisi Standar (K_o)

Konstanta kesetimbangan pada kondisi standar (K_o) merupakan parameter yang menunjukkan kecenderungan arah reaksi pada temperatur 298 K. Nilai K_o dihitung berdasarkan perubahan energi bebas Gibbs standar (ΔG°) dari reaksi. Nilai entropi pembentukan standar dapat dilihat pada Tabel 2.8 berikut.

Tabel 2. 8 Nilai entropi pembentukan standar

Komponen	A	B	C	ΔG_f° (kJ/mol K)
Propilena (C_3H_6)	19,412	$1,3685 \times 10^{-1}$	$2,5749 \times 10^{-5}$	62,72
Benzena (C_6H_6)	81,512	$1,5282 \times 10^{-1}$	$2,6522 \times 10^{-5}$	129,66
Isopropil Benzena	0,983	$4,4175 \times 10^{-1}$	$4,3406 \times 10^{-5}$	136,98

Perhitungan ΔG° dilakukan menggunakan data energi bebas pembentukan (ΔG_f°) masing-masing komponen, yaitu selisih antara energi bebas produk dan reaktan sesuai stoikiometri reaksi.



Perhitungan nilai energi gibbs ialah seperti berikut.

$$\begin{aligned}\Delta G_r &= [\Delta G_f \text{ Produk}] - [\Delta G_f \text{ Reaktan}] \\ \Delta G_r &= [\Delta G_f \text{ C}_9\text{H}_{12}] - [(\Delta G_f \text{ C}_3\text{H}_6) + (\Delta G_f \text{ C}_6\text{H}_6)] \\ \Delta G_r &= [136.98] - [(62.72) + (129.66)] \text{ kJ/mol K} \\ \Delta G_r &= -55.40 \text{ kJ/mol K}\end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, sehingga diperoleh kesimpulan dengan nilai $\Delta G_r = -55.40 \text{ kJ/mol K}$ atau -55.400 J/mol .

Selanjutnya, nilai K_0 dapat ditentukan dari hubungan antara ΔG° dan konstanta kesetimbangan.

$$\begin{aligned}K_0 &= \exp\left(\frac{-\Delta G_r^\circ}{RT}\right) \\ K_0 &= \exp\left(\frac{55.400 \text{ J/mol K}}{(8.314 \text{ J/mol K})(298 \text{ K})}\right) \\ K_0 &= 5.1 \times 10^9\end{aligned}$$

Pada suhu tertentu, nilai konstanta kesetimbangan (K) ditetapkan melalui persamaan seperti berikut.

$$\ln \frac{K}{K_0} = -\frac{\Delta H_r}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298 \text{ K}} \right)$$

Substitusi:

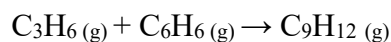
- $\Delta H = -99420 \text{ J/mol}$
- $T = 523 \text{ K}$

Sehingga

$$\begin{aligned}\ln \frac{K}{5.1 \times 10^9} &= -\frac{-99.420}{8.314} \left(\frac{1}{523} - \frac{1}{298 \text{ K}} \right) \\ \ln \frac{K}{5.1 \times 10^9} &= e^{-17.2} \\ K &= 168.\end{aligned}$$

e. Nilai Derajat Reaksi

Basis reaksi yang digunakan adalah sebagai berikut:



Tabel 2. 9 Extent of reaction pada reaksi pembentukan *cumene*

Komponen	Mol awal	Perubahan	Mol akhir
C ₃ H ₆	1	-ε	1-ε
C ₆ H ₆	1	-ε	1-ε
C ₉ H ₁₂	0	+ε	ε

Sehingga didapatkan:

$$n_{total} = 2 - \varepsilon$$

Derajat kesetimbangan reaksi (ε) digunakan untuk mengetahui sejauh mana reaksi berlangsung pada kondisi kesetimbangan. Untuk reaksi pembentukan isopropil benzena, hubungan antara konstanta kesetimbangan dan derajat reaksi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$K = \frac{\varepsilon(2 - \varepsilon)}{(1 - \varepsilon)^2}$$

Dengan menggunakan nilai konstanta kesetimbangan pada temperatur operasi sebesar $K = 168$, maka diperoleh nilai derajat reaksi sebesar:

$$\varepsilon \approx 0,92$$

Nilai ε yang mendekati satu menunjukkan bahwa sebagian besar reaktan telah bereaksi menjadi produk. Dengan demikian, reaksi berlangsung dominan ke arah pembentukan *cumene*, sehingga dapat dianggap sebagai reaksi irreversible.

2.5.4 Tinjauan Kinetika

Tinjauan kinetika reaksi pada proses pembentukan kumena dalam perancangan ini mengacu pada literatur yang disusun oleh Dimian dan Bildea dalam buku *Chemical Process Design: Computer-Aided Case Studies* (2008). Buku ini dipilih karena menyajikan model kinetika yang telah divalidasi berdasarkan studi kasus industri, serta memberikan pendekatan yang komprehensif dalam perancangan proses kimia, khususnya untuk sistem reaksi katalitik heterogen.

Reaksi pembentukan kumena merupakan reaksi alkilasi antara benzena dan propilena yang berlangsung dalam fase cair dengan bantuan katalis padat berupa zeolit. Proses ini dioperasikan pada temperatur 150–230 °C dan tekanan 25–35 bar untuk

menjaga reaktan tetap berada dalam fase cair serta meningkatkan laju reaksi dan aktivitas katalis. Selain itu, kondisi operasi tersebut juga bertujuan untuk meminimalkan pembentukan produk samping.

Mekanisme reaksi dikendalikan oleh interaksi antara molekul reaktan dan permukaan katalis. Dalam sistem ini, propilena memiliki kecenderungan lebih tinggi untuk teradsorpsi pada permukaan katalis dibandingkan benzena karena sifatnya yang lebih reaktif. Sementara itu, benzena tetap berada di fase fluida dan bereaksi langsung dengan spesies yang telah teradsorpsi.

Dari mekanisme tersebut, diperoleh persamaan laju reaksi yang mempertimbangkan kesetimbangan adsorpsi sebagai berikut:

$$r = \frac{k_0 K_p C_p}{1 + K_p C_p}$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa laju reaksi dipengaruhi oleh konstanta reaksi intrinsik, konstanta adsorpsi, serta konsentrasi propilena. Namun, pada kondisi operasi industri, nilai $K_p C_p$ relatif kecil sehingga permukaan katalis tidak mengalami kejenuhan. Dengan demikian, persamaan dapat disederhanakan menjadi:

$$r = k C_p$$

dengan $k = k_0 K_p$, sehingga reaksi dapat dianggap mengikuti orde satu semu terhadap propilena. Penyederhanaan ini umum digunakan dalam perancangan reaktor karena tetap merepresentasikan sistem secara fisik namun lebih mudah digunakan dalam perhitungan.

Konstanta laju reaksi bergantung pada temperatur dan dinyatakan melalui persamaan Arrhenius:

$$k_1 = 6510 \exp\left(-\frac{52.564}{RT}\right)$$

Nilai konstanta 6510 merupakan faktor frekuensi yang menggambarkan intensitas tumbukan efektif, sedangkan energi aktivasi sebesar 52564 kJ/kmol menunjukkan energi minimum yang diperlukan agar reaksi berlangsung. Nilai energi aktivasi yang cukup besar

menunjukkan bahwa laju reaksi sangat dipengaruhi oleh temperatur, sehingga peningkatan temperatur akan meningkatkan laju reaksi secara signifikan.

Selain reaksi utama pembentukan kumena, terdapat reaksi samping yang menghasilkan di-isopropilbenzena (DIPB) melalui alkilasi lanjutan. Konstanta laju reaksi samping ini dinyatakan sebagai:

$$k_2 = 450 \exp\left(-\frac{55.000}{RT}\right)$$

Energi aktivasi yang lebih tinggi pada reaksi samping menunjukkan bahwa reaksi ini berlangsung lebih lambat dibandingkan reaksi utama. Namun demikian, pada temperatur yang lebih tinggi, reaksi samping dapat menjadi signifikan sehingga perlu dipertimbangkan dalam perancangan proses untuk menjaga selektivitas produk.

2.6 Langkah proses

2.6.1 Tahap penyimpanan Bahan Baku

2.6.1.1 Propilena

Propilena 99,60% (w/w) dan propana (sebagai diluent) 0,40% (w/w) dalam fase cair disimpan di dalam tangki silinder horizontal berbentuk ellipsoidal head (TK-102) pada suhu 30°C dan tekanan 13–14 bar. Pemilihan tangki bertekanan tinggi ini didasarkan pada sifat termodinamika propilena yang memiliki titik didih -47,6°C, sehingga pada suhu ambient 30°C propilena hanya dapat dipertahankan dalam fase cair apabila disimpan pada tekanan saturasi sekitar 12,6–14 bar. Desain tangki horizontal tipe bullet dengan ellipsoidal head (rasio 2:1) dipilih karena mampu mendistribusikan tegangan secara merata pada dinding bejana tekan, sehingga sesuai dan andal untuk kondisi operasi pada rentang tekanan tersebut sesuai standar ASME Section VIII.

2.6.1.2 Benzena

Benzena 99,90% (w/w) dan toluena 0,10% (w/w) dalam fase cair disimpan di dalam tangki silinder vertikal berbentuk torispherical head (TK-101) pada suhu 35°C dan tekanan 1,5 bar. Kedua komponen ini memiliki titik didih yang jauh di atas suhu penyimpanan (benzena 80°C, toluena 111°C), sehingga keduanya berada dalam fase cair

yang stabil pada kondisi tersebut. Tekanan operasi sebesar 1,5 bar termasuk dalam kategori low-to-moderate pressure, sehingga desain tangki vertikal dengan torispherical head (flanged and dished) dipilih sebagai penutup bejana yang paling ekonomis dan praktis untuk rentang tekanan ini. Selain itu, orientasi vertikal dipilih untuk memfasilitasi pengelolaan inventaris cairan dan meminimalkan emisi uap dari senyawa aromatik yang mudah menguap dan mudah terbakar tersebut.

2.6.2 Tahap Persiapan Bahan Baku

Pada tahapan ini dilakukan preparasi bahan baku dengan tujuan menyamakan tekanan, menaikkan temperatur, serta mempersiapkan kondisi umpan sebelum memasuki reaktor. Benzena dari tangki penyimpanan (TK-101) dialirkan menggunakan pompa sentrifugal (P-101 A/B) untuk dinaikkan tekanannya dari 1,5 bar hingga mencapai 30 bar. Sementara itu, propilena dari tangki penyimpanan (TK-102) yang memiliki kondisi awal sekitar 13–14 bar dan suhu 30°C juga dialirkan menggunakan pompa sentrifugal (P-102 A/B) hingga tekanannya meningkat menjadi 30 bar.

Setelah kedua aliran mencapai tekanan yang sama, benzena dan propilena dicampurkan dalam satu aliran umpan, kemudian dialirkan menuju heat exchanger (E-201) yang berfungsi sebagai preheater. Pada unit ini, campuran umpan dipanaskan dari kondisi awal hingga mencapai suhu sekitar 170°C pada tekanan tetap 30 bar. Keluaran dari preheater berada dalam kondisi dua fasa, yaitu benzena dalam fasa cair dan propilena dalam fasa gas, yang disebabkan oleh perbedaan volatilitas masing-masing komponen.

2.6.3 Tahap reaksi dan pembentukan produk

Pada tahap ini berlangsung reaksi pembentukan *cumene* di dalam reaktor alkilasi (R-201). Umpan berupa campuran benzena dan propilena diumpankan pada kondisi 170°C dan tekanan 30 bar ke dalam reaktor jenis Plug Flow Reactor (PFR) yang berisi katalis padat tersusun tetap (fixed bed). Rasio molar benzena terhadap propilena dijaga sekitar 5:1 untuk meningkatkan selektivitas produk utama.

Reaksi utama yang terjadi adalah pembentukan *cumene* dari benzena dan propilena yang bersifat eksotermis, disertai reaksi samping pembentukan diisopropilbenzena (DIPB) dari reaksi lanjutan antara *cumene* dan propilena. Reaktor ini menggunakan katalis

Beta Zeolite yang berperan dalam meningkatkan laju reaksi dan selektivitas terhadap *cumene*. Akibat reaksi eksotermis, temperatur keluaran meningkat hingga sekitar 257,5°C pada tekanan tetap 30 bar.

Keluaran reaktor didominasi fasa cair yang terdiri dari *cumene*, benzena sisa, dan DIPB, sedangkan propilena hampir seluruhnya habis bereaksi. Komponen inert seperti propana tetap berada dalam fasa gas dan akan dipisahkan pada tahap pemurnian selanjutnya.

2.6.4 Tahap Pemurnian Produk

Tahap pemurnian diawali dengan pemisahan komponen ringan menggunakan kolom distilasi jenis depropanizer (T-201), di mana umpan dari reaktor (R-201) yang terdiri atas campuran *cumene*, benzena, dan diisopropilbenzena (DIPB) dalam fasa cair serta propana dalam fasa gas diumpankan ke bagian atas kolom. Pemisahan berlangsung berdasarkan perbedaan volatilitas pada kondisi operasi sekitar 222,54°C, sehingga propana sebagai komponen ringan terpisah dan keluar sebagai produk atas (distilat) dalam fasa gas menuju tangki penyimpanan propana (TK-301), sedangkan komponen berat berupa *cumene*, benzena, dan DIPB diperoleh sebagai produk bawah dalam fasa cair. Produk bawah ini selanjutnya dialirkan ke unit pemurnian lanjutan untuk memperoleh *cumene* dengan kemurnian tinggi, sehingga (T-201) berperan sebagai tahap awal pemisahan komponen ringan dalam rangka meningkatkan efisiensi proses keseluruhan.

Selanjutnya, produk bawah dari (T-201) yang berupa heavy product dialirkan menuju kolom distilasi benzena (T-202). Umpan ini terdiri atas campuran *cumene*, benzena, dan diisopropilbenzena (DIPB), serta dikombinasikan dengan aliran recycle dari reaktor transalkilasi yang juga diumpankan ke bagian atas kolom. Di dalam (T-202), terjadi pemisahan berdasarkan perbedaan volatilitas pada kondisi operasi sekitar 87,35°C, di mana benzena sebagai komponen yang lebih ringan dipisahkan sebagai produk atas (distilat), sedangkan komponen yang lebih berat berupa *cumene* dan DIPB diperoleh sebagai produk bawah. Benzena hasil distilasi selanjutnya direcycle kembali ke reaktor untuk menjaga rasio umpan dan meningkatkan efisiensi proses, sementara produk bawah dialirkan ke tahap pemurnian berikutnya.

Selanjutnya, produk bawah dari kolom distilasi benzena (T-202) yang berupa campuran *cumene* dan diisopropilbenzena (DIPB) dialirkan menuju kolom distilasi *cumene* (T-203) melalui bagian atas kolom. Pada unit ini terjadi pemisahan lanjutan berdasarkan perbedaan volatilitas pada kondisi operasi sekitar 155,5°C, di mana *cumene* sebagai komponen yang lebih ringan diperoleh sebagai produk atas (distilat), sedangkan diisopropilbenzena sebagai komponen yang lebih berat keluar sebagai produk bawah. *Cumene* yang dihasilkan selanjutnya ditetapkan sebagai produk akhir dengan kemurnian tinggi dan dialirkan ke tangki penyimpanan *cumene* (TK-302), sementara diisopropilbenzena direcycle kembali ke unit reaksi, khususnya reaktor transalkilasi, untuk dikonversi kembali menjadi *cumene* sehingga meningkatkan efisiensi keseluruhan proses.

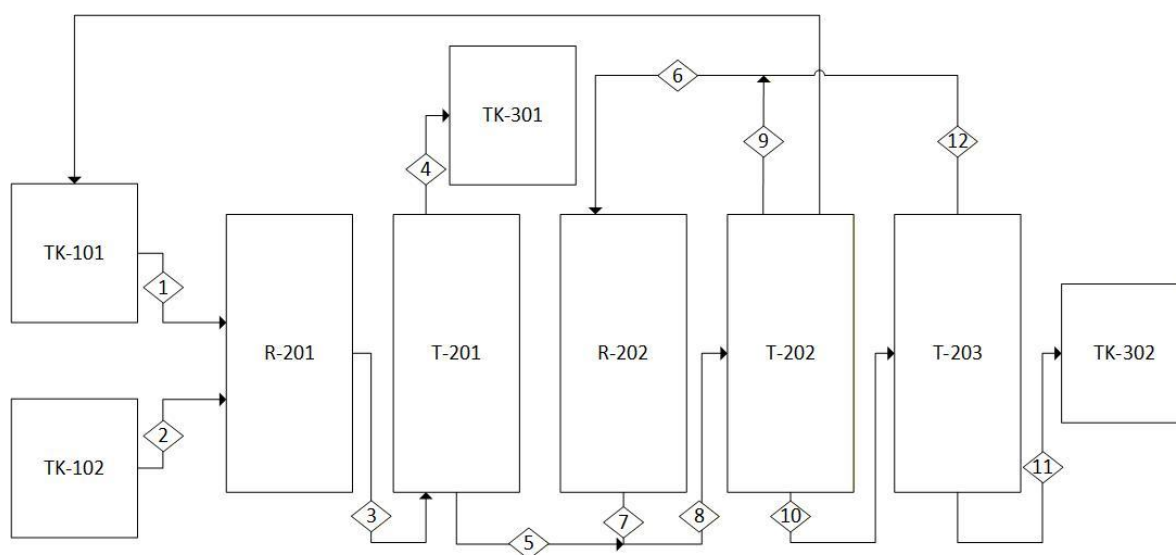
Selanjutnya, untuk memaksimalkan pemanfaatan komponen yang belum terkonversi, aliran benzena hasil distilat dari kolom (T-202) yang telah terkondensasi dalam fasa cair dipompa menggunakan (P-202 A/B) dan dialirkan kembali sebagai aliran recycle. Aliran ini kemudian dibagi menjadi dua, di mana sebagian dikembalikan ke tahap persiapan bahan baku untuk dicampurkan dengan benzena segar dan diumpankan kembali ke reaktor alkilasi, sedangkan sebagian lainnya dialirkan menuju heat exchanger (E-204) untuk dipanaskan lebih lanjut. Pada (E-204), benzena dipanaskan dari sekitar 155,5°C hingga mencapai 220°C sebelum diumpankan ke reaktor transalkilasi.

Di sisi lain, diisopropilbenzena (DIPB) sebagai produk bawah dari kolom distilasi *cumene* (T-203) juga dipompa menggunakan (P-201 A/B) untuk menaikkan tekanannya, kemudian dialirkan dan dicampurkan dengan benzena recycle menuju heat exchanger (E-204). Campuran ini selanjutnya diumpankan ke reaktor transalkilasi (R-202). Di dalam reaktor ini terjadi reaksi antara benzena dan DIPB untuk menghasilkan kembali *cumene*, sehingga komponen berat yang sebelumnya merupakan produk samping dapat dikonversi ulang menjadi produk utama. Reaktor transalkilasi (R-202) beroperasi pada suhu masuk sekitar 220°C dan suhu keluar sekitar 215,56°C pada tekanan yang tetap tinggi.

Produk keluaran dari reaktor (R-202) kemudian dialirkan kembali dan digabungkan ke aliran menuju kolom distilasi benzena (T-202), sehingga membentuk

suatu siklus proses yang terintegrasi. Dengan demikian, sistem recycle ini tidak hanya mengurangi kehilangan bahan, tetapi juga meningkatkan pemanfaatan komponen dalam proses melalui konversi ulang menjadi *cumene*.

2.6.5 Diagram Alir Proses Produksi



Gambar 2. 24 Diagram Alir Proses Produksi

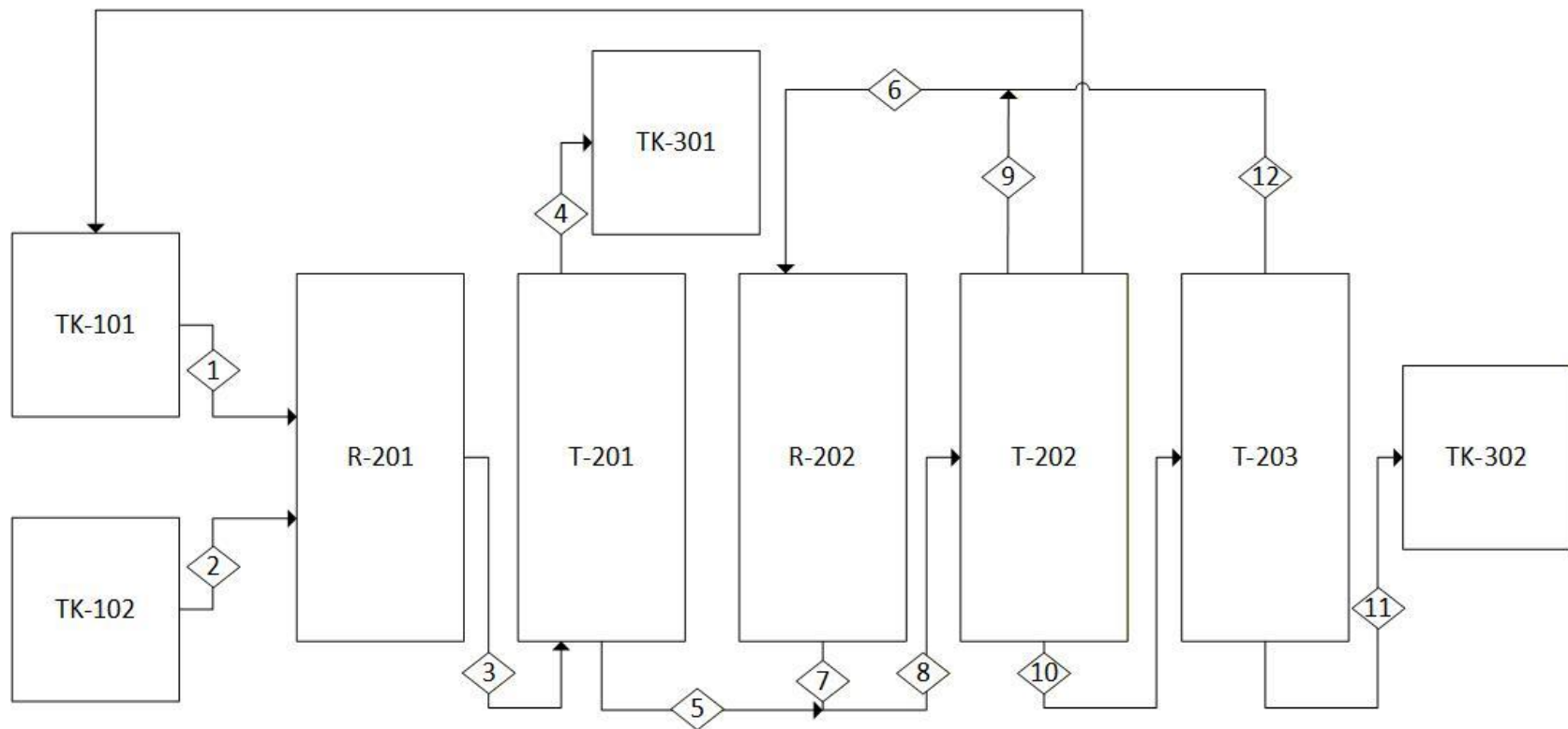
Tabel 2. 10 Kode Alat

Kode	Alat
E-201	: Alkylation Reactor Feed Preheater
E-202	: Depropanizer Overhead Condenser
E-203	: Depropanizer Reboiler
E-204	: Transalkylation Reactor Feed Heat Exchanger
E-205	: Benzene Recovery Column Overhead Condenser
E-206	: Benzene Recovery Column Reboiler
E-207	: <i>Cumene</i> Purification Column Overhead Condenser
E-208	: <i>Cumene</i> Purification Column Reboiler
P-101 A/B	: Benzene Feed Pump
P-102 A/B	: Propylene Feed Pump
P-201 A/B	: Transalkylation Reactor Feed Pump

P-202 A/B	:	Benzene Recycle Pump
R-201	:	Alkylation Reactor
R-202	:	Transalkylation Reactor
T-201	:	Depropanizer Column
T-202	:	Benzene Recovery Column
T-203	:	<i>Cumene</i> Purification Column
TK-101	:	Benzene Storage Tank
TK-102	:	Propylene Storage Tank
TK-301	:	Propane Storage Tank
TK-302	:	<i>Cumene</i> Product Storage Tank
V-201	:	Alkylation Reactor Effluent Control Valve
V-202	:	Transalkylation Reactor Effluent Control Valve

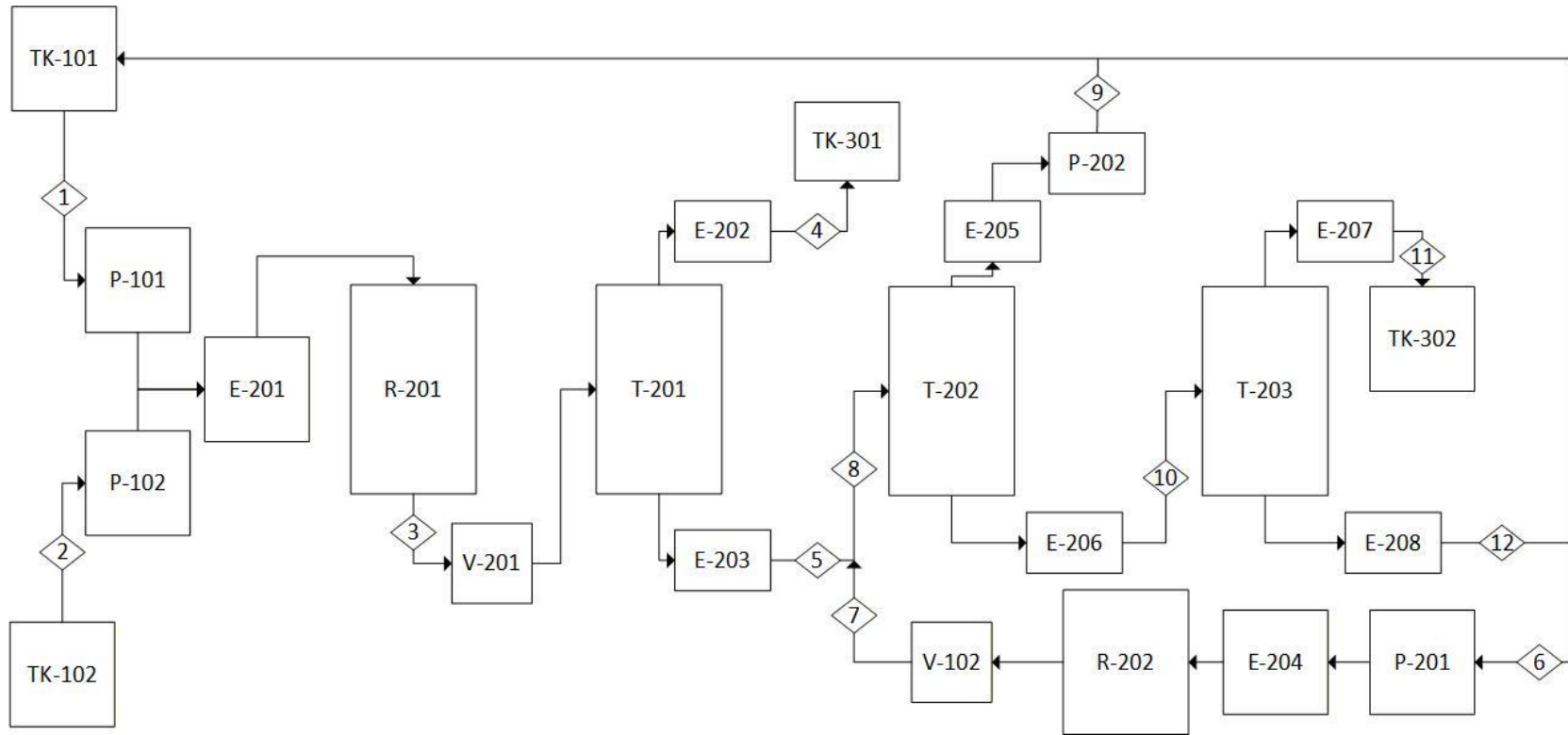
2.7 Diagram Alir

2.7.1 Diagram Alir Neraca Massa



Gambar 2. 25 Diagram Alir Neraca Massa

2.7.2 Diagram Alir Neraca Panas



Gambar 2. 26 Diagram Alir Neraca Panas

2.8 Neraca Massa Dan Neraca Panas

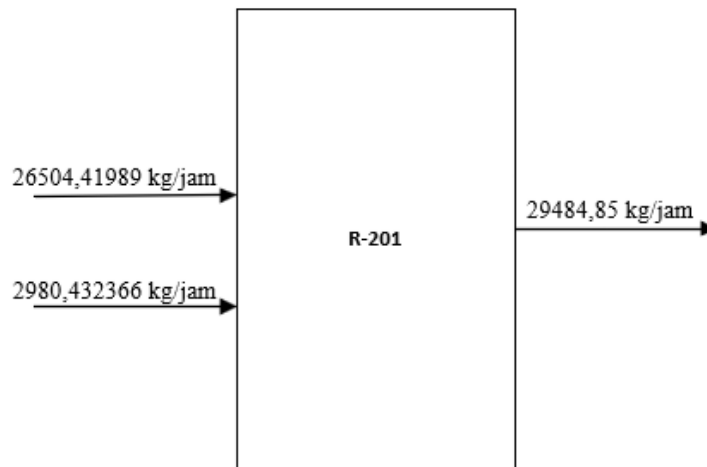
2.8.1 Neraca Massa

Ringkasan hasil perhitungan neraca massa pada Pra-Rancangan Pabrik Isopropil Benzena (*Cumene*) dengan kapasitas 65.000 ton/tahun disajikan berikut ini, sedangkan perhitungan secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran A.

Basis perhitungan neraca massa:

- Kapasitas produksi: 65.000 ton cumene/tahun.
- Waktu operasi: 300 hari efektif/tahun dengan operasi secara kontinu.

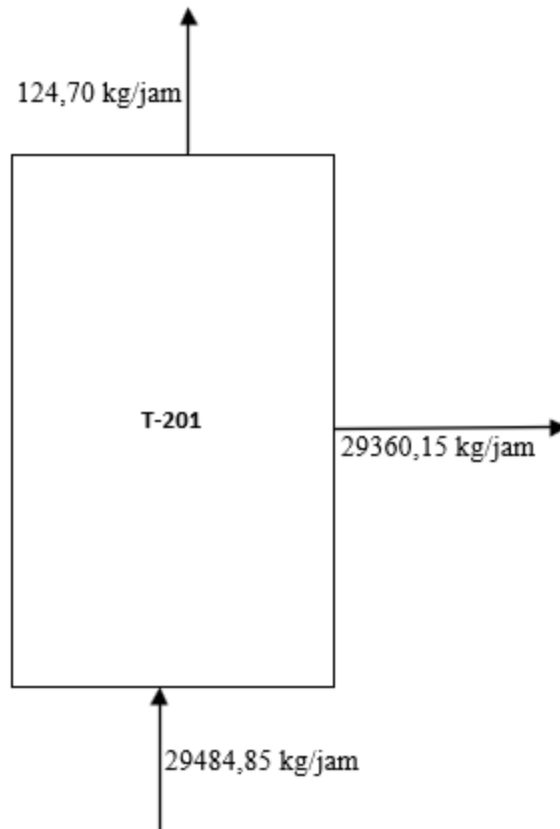
1. Neraca Massa pada Reaktor Alkilasi



Tabel 2. 11 Neraca Massa pada Reaktor Alkilasi

Komponen	Input (kg/jam)		Output (kg/jam)
	Arus 1	Arus 2	Arus 3
Propylene		2855,731632	
Propane		124,70	124,70
Benzene	26504,41989		21556,93
<i>Cumene</i>			7069,07
DIPB			734,16
Sub-Total	26504,41989	2980,432366	29484,85
Total		29484,85	29484,85

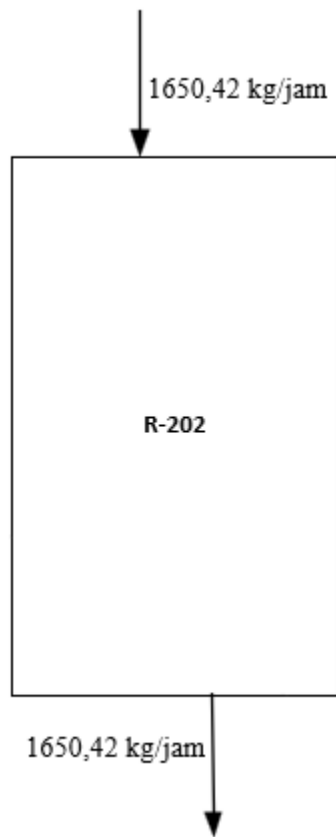
2. Neraca Massa pada Depropanizer



Tabel 2. 12 Neraca Massa pada Depropanizer

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)		
	Arus 3	Arus 4	Arus 5	
Propylene				
Propane	124,70	124,70		
Benzene	21556,93			21556,93
<i>Cumene</i>	7069,07			7069,07
DIPB	734,16			734,16
Sub-Total	29484,85	124,70		29360,15
Total	29484,85		29484,85	

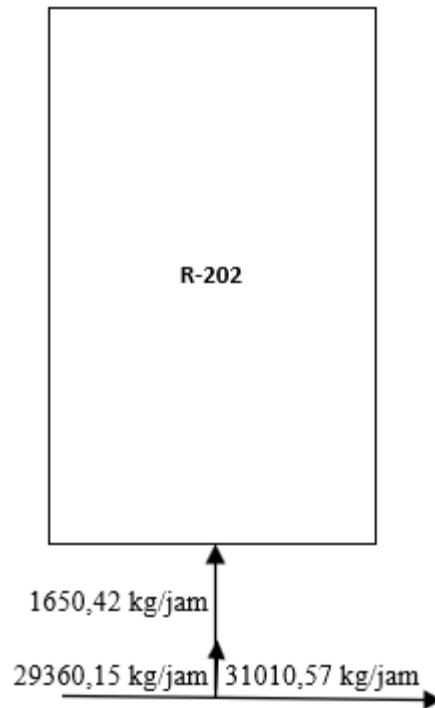
3. Neraca Massa pada Reaktor Transalkilasi



Tabel 2. 13 Neraca Massa pada Reaktor Transalkilasi

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Propylene		
Propane		
Benzene	536,29	214,52
<i>Cumene</i>		990,25
DIPB	1114,13	445,65
Sub-Total	1650,42	1650,42
Total	1650,42	1650,42

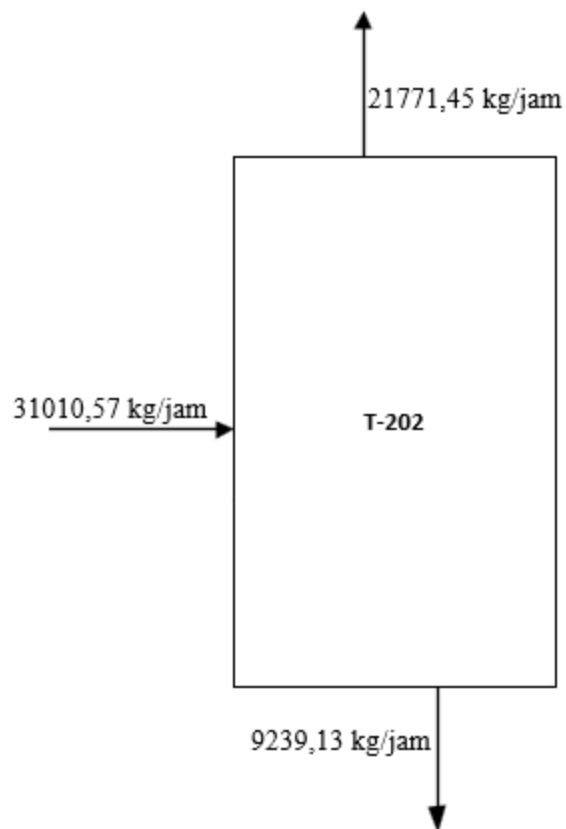
Mixing point pada Reaktor Transalkilasi



Tabel 2. 14 Mixing point pada Reaktor Transalkilasi

Komponen	Input (kg/jam)		Output (kg/jam)
	Arus 7	Arus 5	Arus 8
Propylene			
Propane			
Benzene	214,52	21556,93	21771,45
<i>Cumene</i>	990,25	7069,07	8059,32
DIPB	445,65	734,16	1179,81
Sub-Total	1650,42	29360,15	31010,57
Total	31010,57		31010,57

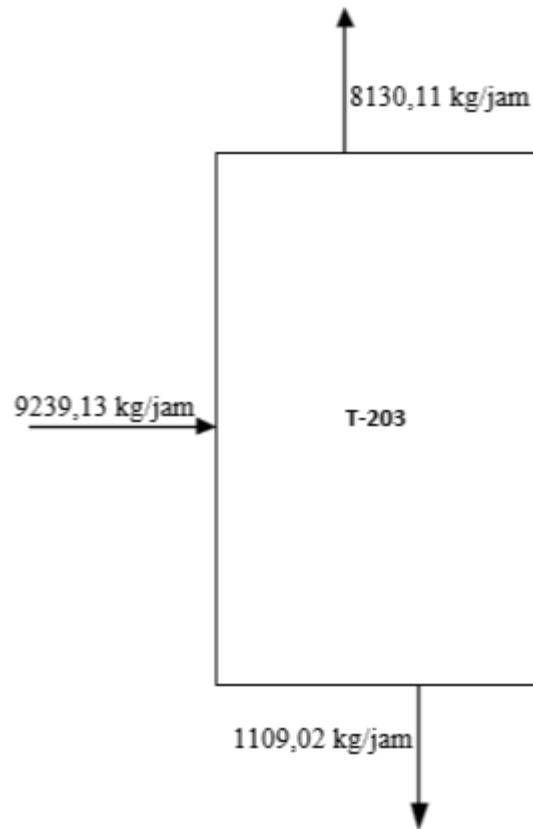
4. Neraca Massa pada Kolom Benzena



Tabel 2. 15 Neraca Massa pada Kolom Benzena

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	
	Arus 8	Arus 9	Arus 10
Propylene			
Propane			
Benzene	21771,45	21771,45	
<i>Cumene</i>	8059,32		8059,32
DIPB	1179,81		1179,81
Sub-Total	31010,57	21771,45	9239,13
Total	31010,57	31010,57	

5. Neraca Massa pada Kolom *Cumene*



Tabel 2. 16 Neraca Massa pada Kolom *Cumene*

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)		
	Arus 10	Arus 11	Arus 12	
Propylene				
Propane				
Benzene				
<i>Cumene</i>	8059,32	8059,32	1109,02	
DIPB	1179,81	70,79		
Sub-Total	9239,13	8130,11	1109,02	
Total	9239,13	9239,13		

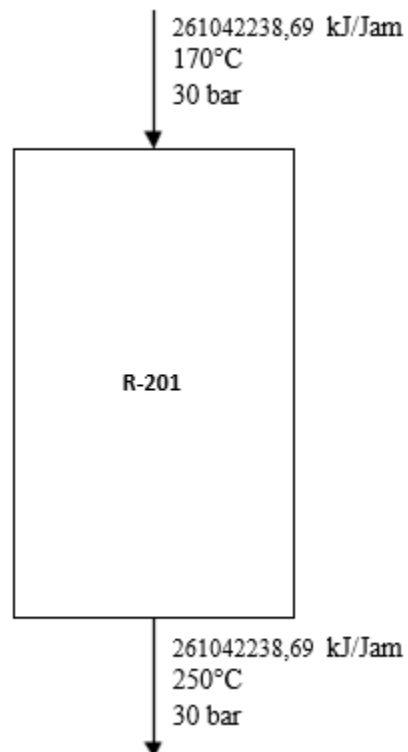
6. Neraca Massa *Overall*

Tabel 2. 17 Neraca Massa *Overall*

Alat	Komponen	Input (kg)	Output (kg)
Reaktor	Propylene	2607.97	
	Propane	113.88	
	Benzene	4812.12	
Depropanizer	Propane		113.88
Kolom <i>Cumene</i>	<i>Cumene</i>		7360.11
	DIPB		59.98
Total		7533.97	7533.97

2.8.2 Neraca Panas

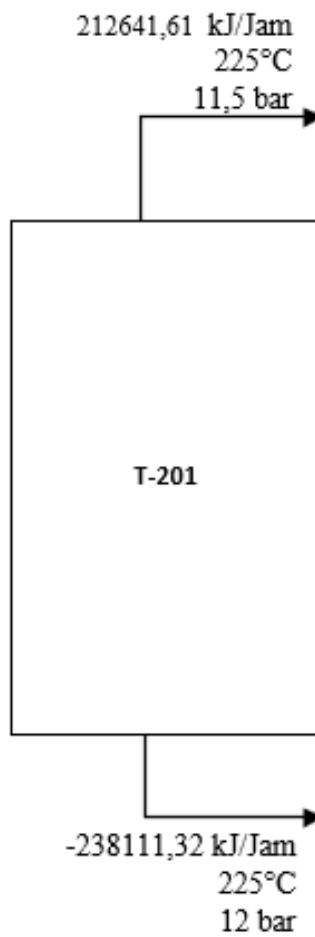
1. Neraca Panas pada Reaktor Alkilasi



Tabel 2. 18 Neraca Panas pada Reaktor Alkilasi

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Propylene	912925,03	
Propane		25652,30
Benzene	25191303,66	24888103,84
Cumene		1370208,94
DIPB		-179736,39
Total	26104228,69	26104228,69

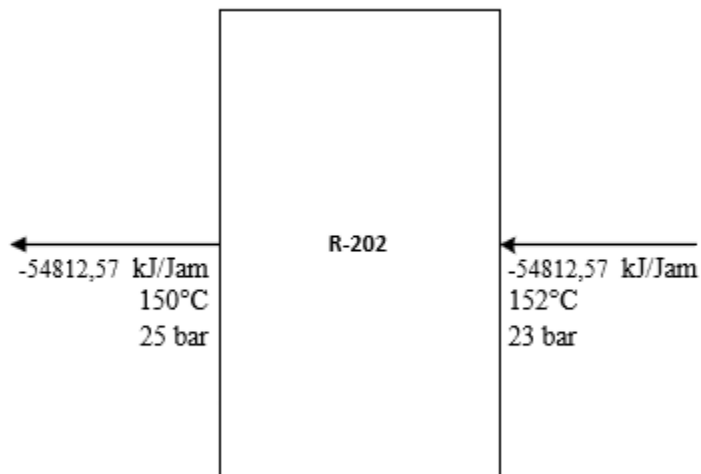
2. Neraca Panas pada Depropanizer



Tabel 2. 19 Neraca Panas pada Depropanizer

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Propane	-70.91	-323511.56
Benzene	15256674.13	15434100.83
<i>Cumene</i>	63341.62	-124752.24
DIPB	-2312.48	-6273.11
Reboiler (Qr)	-1424263.93	
Condenser (Qc)		212641.61
Q lepas	1298837.11	
Total	15192205.54	15192205.54

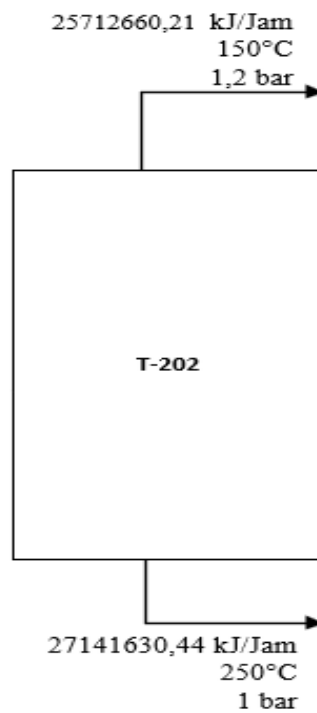
3. Neraca Panas pada Reaktor Transalkilasi



Tabel 2. 20 Neraca Panas pada Reaktor Transalkilasi

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Benzene	486759,71	195866,45
<i>Cumene</i>		-36547,65
DIPB	-541572,28	-214131,37
Total	-54812,57	-54812,57

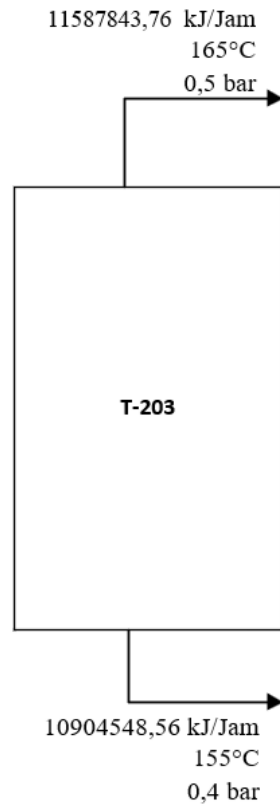
4. Neraca Panas pada Kolom Benzena



Tabel 2. 21 Neraca Panas pada Kolom Benzena

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Benzene	2143744.81	19165043.05
<i>Cumene</i>	-156408.14	-726591.39
DIPB	-15580.38	-73717.21
Reboiler (Qr)	42183422.32	
Condenser (Qc)		25712660.21
Q lepas		77783.95
Total	44155178.61	44155178.60

5. Neraca Panas pada Kolom *Cumene*



Tabel 2. 22 Neraca Panas pada Kolom *Cumene*

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
<i>Cumene</i>	-888750.99	-978749.35
DIPB	-76566.64	-734776.54
Reboiler (Qr)	11587843.76	
Condenser (Qc)		11586866.64
Q lepas		749185.37
Total	10622526.12	10622526.12

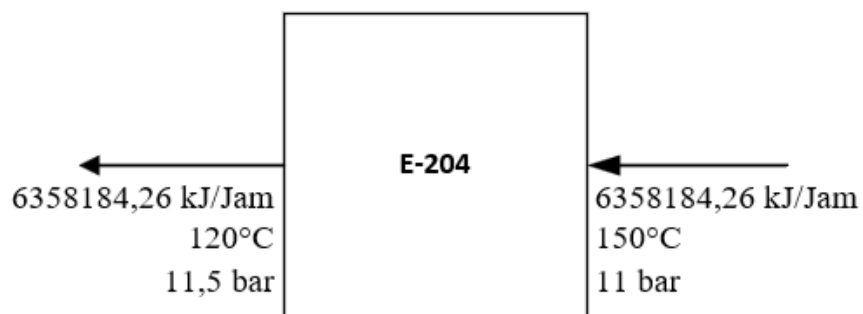
6. Neraca Panas pada Heat Exchanger (E-201)



Tabel 2. 23 Neraca Panas pada *Heat Exchanger* (E-201)

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Feed Campuran	18155721,18	26573065,11
Q Heater	8417343,93	
Total	26573065,11	26573065,11

7. Neraca Panas pada Heat Exchanger (E-204)



Tabel 2. 24 Neraca Panas pada *Heat Exchanger* (E-204)

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Feed Campuran	6394196,10	6358184,26

Q Heater	-36011,84	
Total	6358184,26	6358184,26

8. Neraca Panas Overall

Tabel 2. 25 Neraca Panas Overall

Alat	Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Reaktor Alkylasi	Propylene	912925.03	0.00
	Propane	0.00	25652.30
	Benzene	25191303.66	24888103.84
	<i>Cumene</i>	0.00	1370208.94
	DIPB	0.00	-179736.39
Depropanizer	Propane	-70.91	-323511.56
	Benzene	15256674.13	15434100.83
	<i>Cumene</i>	63341.62	-124752.24
	DIPB	-2312.48	-6273.11
	Reboiler (Qr)	-1424263.926	0
	Condenser (Qc)	0	212641.6139
	Q lepas	1298837.11	0
Reaktor Transalkylasi	Benzene	486759.71	195866.45
	<i>Cumene</i>	0.00	-36547.65
	DIPB	-541572.28	-214131.37
Kolom Benzena	Benzene	2143744.809	19165043.05
	<i>Cumene</i>	-156408.1394	-726591.3938
	DIPB	-15580.38054	-73717.21072
	Reboiler (Qr)	42183422.32	0
	Condenser (Qc)	0	25712660.21
	Q lepas	0	77783.95
Kolom <i>Cumene</i>	Benzene	2143744.809	19165043.05
	<i>Cumene</i>	-156408.1394	-726591.3938
	DIPB	-15580.38054	-73717.21072
	Reboiler (Qr)	42183422.32	0
	Condenser (Qc)	0	25712660.21
	Q lepas	0	77783.95
Total		129551978.87	129551978.87

2.9 Tata Letak Pabrik dan Pemetaan

Tata letak pabrik merupakan representasi letak dari bagian-bagian pabrik dalam kaitannya satu sama lain yang terdiri atas beberapa area seperti tempat karyawan bekerja, lokasi peralatan, tempat penyimpanan bahan baku dan juga produk. Secara umum, tata letak pabrik *cumene* dengan kapasitas 65.000 ton/tahun di Cilegon dibagi menjadi beberapa area utama, yaitu:

- i. Daerah Administrasi atau Perkantoran
Daerah administrasi atau perkantoran ialah area pusat kegiatan pengelolaan pabrik untuk mengatur kelancaran operasional dan kegiatan lainnya. Area ini berlokasi pada bagian depan pabrik, dekat dengan gerban utama, dan relatif jauh dari area proses untuk menjamin keamanan dan kenyamanan kerja. Fasilitas dalam area ini meliputi kantor administrasi, ruang rapat, laboratorium, ruang kontrol (*control room*), pos keamanan, area parkir, serta fasilitas pendukung karyawan.
- ii. Daerah Fasilitas Umum
Daerah fasilitas umum yang memadai seperti tempat parkir, pos keamanan, tempat ibadah, klinik, kantin, toilet yang diperlukan untuk menunjang kinerja para pegawai.
- iii. Penyimpanan Bahan Baku
Area penyimpanan bahan baku terletak di bagian depan-samping pabrik, dekat dengan area proses agar aliran bahan baku ke unit produksi lebih efisien dan meminimalkan panjang perpipaan. Area ini terdiri dari tangki penyimpanan benzena dan tangki penyimpanan propilena. Penempatan tangki propilena dibuat terpisah dan dilengkapi pagar pengaman karena sifatnya yang mudah terbakar dan bertekanan.
- iv. Area Utilitas
Area utilitas berlokasi di sisi kanan bagian depan pabrik dan berdekatan dengan area proses untuk memenuhi kebutuhan energi, air, dan utilitas lainnya secara efisien. Fasilitas yang terdapat pada area ini meliputi boiler sebagai penyedia steam, cooling tower untuk sistem pendinginan, unit pengolahan air, serta substation listrik. Lokasi ini dipilih agar distribusi utilitas ke area proses berlangsung efektif namun tetap aman dari gangguan operasional.
- v. Daerah Proses

Daerah proses merupakan jantung pabrik dimana peralatan proses berada dan proses produksi berlangsung. Area ini terletak dibagian tengah pabrik dan disusun secara berurutan mengikuti aliran proses, yaitu reaktor alkilasi, reaktor transalkilasi, heat exchanger, kolom distilasi benzena, kolom distilasi *cumene*, dan kolom distilasi DIPB. Penempatan berurutan ini memudahkan aliran material, mengurangi kehilangan energi, dan mempermudah pengendalian proses.

vi. Workshop/ Maintenance

Area workshop atau maintenance terletak di sisi kiri dekat dengan area proses untuk memudahkan akses perawatan dan perbaikan peralatan proses jika terjadi kerusakan. Fasilitas ini dilengkapi dengan bengkel mekanik, gudang suku cadang, dan peralatan pendukung maintenance.

vii. Unit Pengolahan Limbah (WWTP)

Daerah unit pengolahan limbah (*Wastewater Treatment Plant/ WWTP*) terletak di bagian sisi kanan area proses, tepatnya dibagian hilir aliran proses. Penempatan ini bertujuan untuk memudahkan pengumpulan limbah cair dari seluruh unit proses sebelum dilakukan pengolahan lebih lanjut. Lokasi WWTP dipilih agak terpisah dari area utama untuk menghindari kontaminasi dan menjaga aspek keselamatan serta kesehatan lingkungan kerja. Selain itu, posisi di sisi pabrik memudahkan pengawasan dan pengendalian sistem pembuangan limbah sesuai dengan standar lingkungan yang berlaku.

viii. Penyimpanan Produk

Area penyimpanan produk terletak dibagian belakang pabrik setelah area proses. Penempatan ini mengikuti alur proses produksi, dimana produk *cumene* yang telah dimurnikan dari unit distilasi langsung dialirkan ke tangki penyimpanan. Lokasi ini dipilih untuk meminimalkan panjang perpipaan dari unit proses ke tangki serta memudahkan pengelolaan produk sebelum didistribusikan. Selain itu, area ini dipisahkan dari area bahan baku untuk menghindari kontaminasi silang dan meningkatkan keamanan operasional.

ix. Area Distribusi Produk

Area distribusi produk/ *loading area* terletak berdekatan dengan storage produk dibagian belakang pabrik dan memiliki akses langsung ke jalur keluar pabrik. Area ini digunakan untuk proses pemuatan *cumene* ke dalam truk tangki melalui sistem pompa. Penempatan *loading area* dibagian belakang bertujuan untuk memisahkan jalur distribusi produk dari aktivitas utama di area proses serta menghindari konflik lalu lintas antara kendaraan logistik dan pekerja. Selain itu, posisi ini memungkinkan proses distribusi berlangsung lebih efisien dan aman.

x. Area Perluasan

Area perluasan terletak dibagian paling belakang pabrik, setelah area storage produk dan *loading area*. Area ini disediakan untuk mengantisipasi pengembangan kapasitas produksi atau penambahan unit proses di masa mendatang. Penempatan dibagian belakang dipilih agar tidak mengganggu operasional pabrik yang sedang berjalan serta memberikan fleksibilitas dalam pengembangan tanpa perlu melakukan perubahan signifikan pada tata letak yang sudah ada.

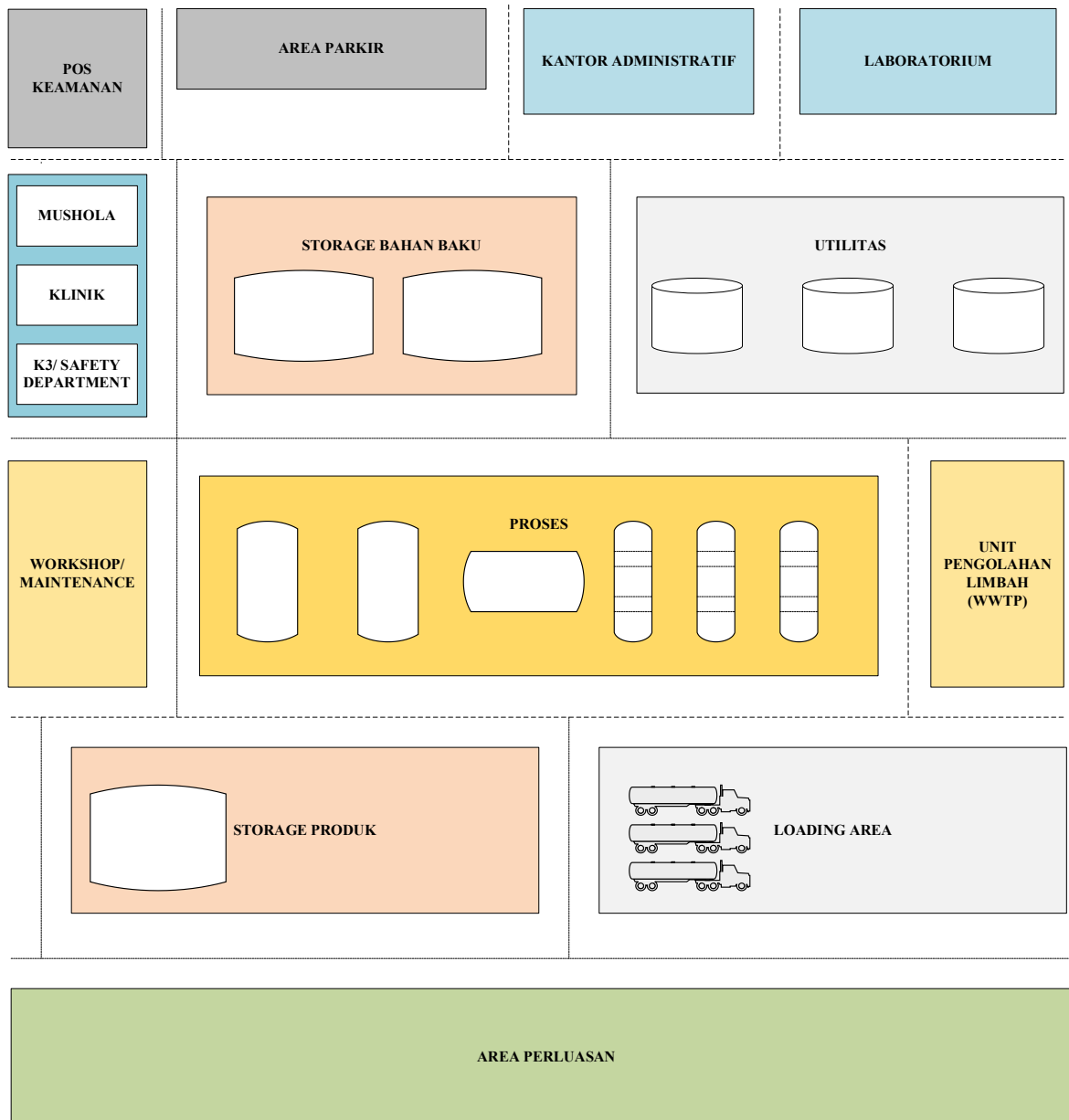
Adapun perincian luas tanah yang akan digunakan area-area tersebut sebagai bangunan pabrik dapat dilihat pada Tabel 2.26 berikut.

Tabel 2. 26 Rincian Luas Tanah

No	Nama Bangunan / Area	Luas (m ²)
1	Pos Keamanan	30
2	Area Parkir	400
3	Kantor Administrasi	600
4	Laboratorium	300
5	Mushola	75
6	Klinik	75
7	Area K3 / Safety	50
8	Workshop / Maintenance	400
9	Area Utilitas	1.200
10	Gudang Bahan Baku	250

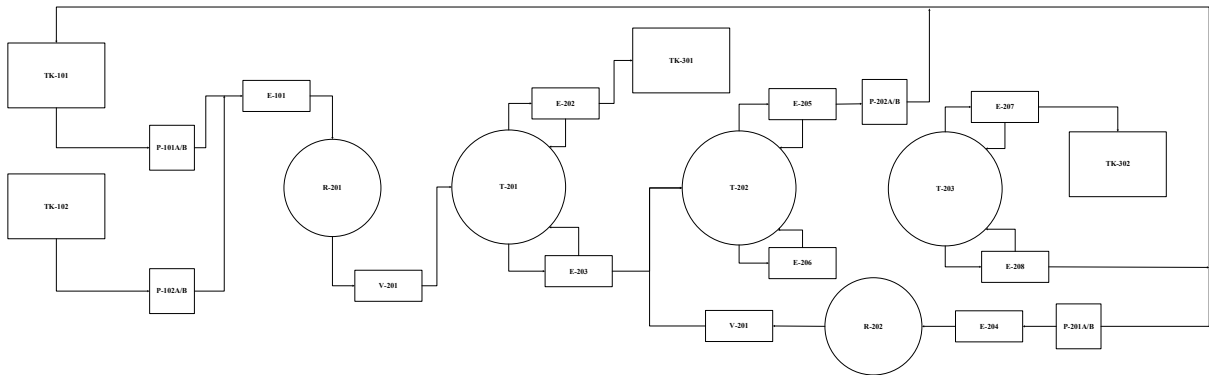
11	Tangki Bahan Baku	2.500
12	Area Proses (Produksi)	18.000
13	Ruang Kontrol	300
14	Unit Pengolahan Limbah (WWTP)	500
15	Tangki Produk	2.000
16	Loading Area	600
17	Jalan & Sirkulasi	8.000
18	Area Perluasan	15.000
TOTAL		51.280 m²

Layout pabrik *cumene*



Gambar 2. 27 Layout Pabrik *Cumene*

2.10 Tata Letak Alat Proses



Gambar 2. 28 Tata Letak Alat Proses

Pada perancangan tata letak alat proses pabrik *cumene* kapasitas 65.000 ton/tahun, terdapat beberapa faktor penting yang perlu diperhatikan agar operasi pabrik berjalan aman, efisien, dan ekonomis. Penentuan tata letak alat proses dilakukan dengan mempertimbangkan aspek keselamatan kerja, kemudahan operasi, akses pemeliharaan, serta kelancaran aliran proses. Beberapa hal yang menjadi dasar pertimbangan dalam penentuan tata letak alat proses adalah sebagai berikut:

i. Aliran bahan baku dan produk

Penempatan alat proses disusun mengikuti urutan aliran proses sehingga perpindahan bahan baku, produk antara, dan produk akhir dapat berlangsung secara kontinu dan efisien. Tata letak yang baik dapat meminimalkan panjang perpipaian, kehilangan tekanan, serta biaya perpompaan. Selain itu, aliran proses yang tersusun linear juga mempermudah operator dalam pengawasan proses produksi.

ii. Aspek keselamatan proses (*process safety*)

Peralatan yang beroperasi pada suhu dan tekanan tinggi seperti reaktor alkilasi, reaktor transalkilasi, serta kolom distilasi ditempatkan dengan jarak aman terhadap area utilitas maupun fasilitas umum untuk mengurangi risiko apabila terjadi kebocoran, ledakan, atau kebakaran. Berdasarkan praktik umum perancangan pabrik kimia dan acuan dari Towler dan Sinnott (2013), jarak antar peralatan proses utama umumnya berkisar 3-5 meter untuk memberikan ruang isolasi, inspeksi, dan pemadaman kebakaran.

iii. Akses operasi dan *maintenance*

Tata letak alat dirancang agar operator dan teknisi dapat dengan mudah melakukan pengoperasian, inspeksi, serta pemeliharaan peralatan. Jalur akses di sekitar alat proses disediakan untuk mobilitas pekerja maupun peralatan *maintenance* seperti fotklift dan crane portable. Penempatan untuk heat exchanger, pompa, dan valve dibuat mudah dijangkau untuk mempercepat proses perawatan dan perbaikan apabila terjadi gangguan operasi.

iv. Ventilasi dan arah aliran udara

Area proses dirancang terbuka dan memiliki sirkulasi udara yang baik untuk mencegah akumulasi uap hidrokarbon yang mudah terbakar, khususnya benzena dan propilena. Penempatan alat proses juga mempertimbangkan arah angin dominan agar apabila terjadi pelepasan gas berbahaya, penyebarannya tidak menuju area operator maupun bangunan administrasi.

v. Efisiensi perpipaan dan utilitas

Peralatan yang saling berhubungan ditempatkan berdekatan untuk mengurangi panjang perpipaan dan kehilangan panas selama proses berlangsung. Unit distilasi dan heat exchanger dikelompokkan dalam area yang sama agar distribusi utilitas seperti steam, cooling water, dan condensate return menjadi lebih efisien.

vi. Kemudahan pengembangan pabrik

Tata letak area proses juga mempertimbangkan kemungkinan ekspansi kapasitas di masa mendatang. Oleh karena itu, disediakan ruang kosong (*future expansion area*) disekitar area proses sehingga penambahan alat baru dapat dilakukan tanpa mengganggu operasi utama pabrik.

vii. Ketentuan keselamatan dan lingkungan

Perancangan tata letak alat proses mempertimbangkan ketentuan keselamatan industri dan pengendalian lingkungan, seperti penyediaan akses evakuasi, jalur pemadam kebakaran, serta pemisahan area penyimpanan bahan mudah terbakar dengan area kerja umum. Selain itu, penempatan unit pengolahan limbah dilakukan pada area terpisah untuk meminimalkan dampak pencemaran terhadap lingkungan sekitar.