

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

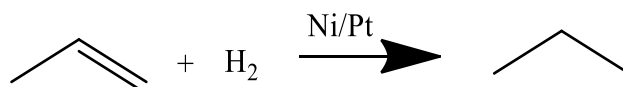
Parameter	Nilai
Berat molekul	42,08 g/mol
Titik didih (1 atm)	–47,7 °C
Titik leleh (1 atm)	–185,17 °C
Densitas (20 °C, 1 atm)	0,00178 g/cm ³
Titik nyala	–108 °C
Suhu penyalan otomatis (autoignition temperature)	455 °C
Tekanan uap (25 °C)	1159 kPa
Viskositas (25 °C)	0,00858 mPa·s
Konduktivitas termal (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

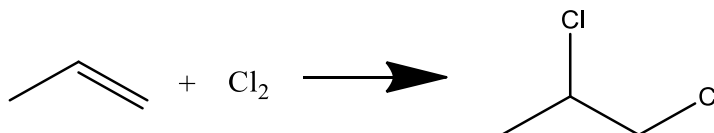
Propilena dapat mengalami reaksi hidrogenasi dengan penambahan gas hidrogen (H₂) menggunakan katalis logam seperti nikel atau platina. Reaksi ini menghasilkan senyawa alkana, yaitu propana (Solomons & Fryhle, 2012).



Gambar 2. 1 Reaksi hidrogenasi propilena

b. Reaksi Adisi Halogen

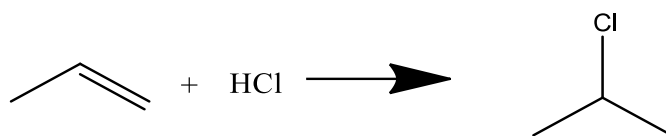
Ikatan rangkap pada propilena memungkinkan terjadinya reaksi adisi dengan halogen, misalnya Cl₂, membentuk senyawa dihaloalkana seperti 1,2-dikloropropana (Solomons & Fryhle, 2012).



Gambar 2. 2 Reaksi adisi halogen dari propilena

c. Reaksi Adisi Asam Halida

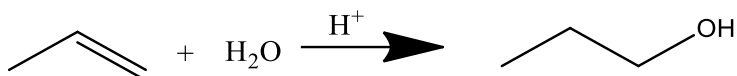
Propilena juga dapat bereaksi dengan asam halida (contohnya HCl) melalui mekanisme adisi elektrofilik, menghasilkan senyawa haloalkana seperti 2-kloropropana sesuai dengan aturan Markovnikov (Solomons & Fryhle, 2012).



Gambar 2. 3 Reaksi adisi asam halogen dari propilena

d. Reaksi Hidrasi

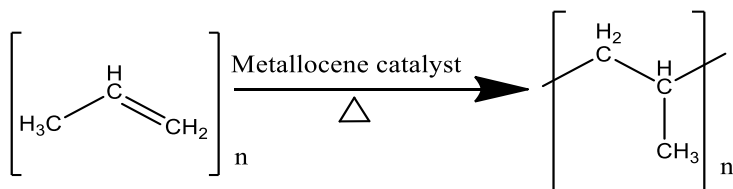
Dalam kondisi asam, propilena dapat bereaksi dengan air membentuk alkohol. Produk yang terbentuk bergantung pada kondisi reaksi, namun secara umum menghasilkan turunan propanol (Solomons & Fryhle, 2012).



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

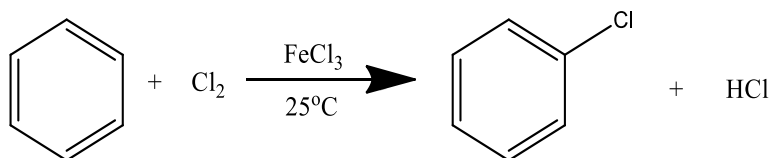
2. Sifat Kimia

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

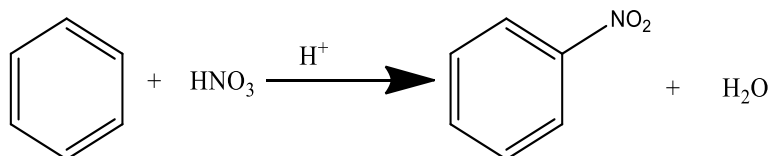
Benzena dapat bereaksi dengan halogen, misalnya klorin (Cl_2), melalui mekanisme substitusi aromatik elektrofilik dengan bantuan katalis asam Lewis seperti FeCl_3 . Pada kondisi suhu sekitar 25 °C, reaksi ini menghasilkan klorobenzena sebagai produk utama.



Gambar 2. 6 Reaksi halogenasi benzena

c. Reaksi Nitrasi

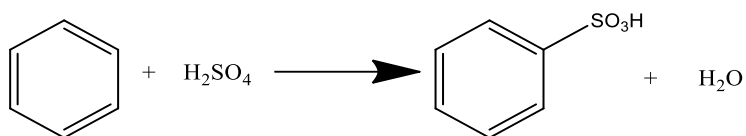
Dalam campuran asam nitrat (HNO_3) dan asam kuat sebagai katalis, benzena mengalami reaksi substitusi membentuk nitrobenzena. Reaksi ini berlangsung melalui pembentukan elektrofil kuat (ion nitronium) yang menyerang cincin aromatik.



Gambar 2. 7 Reaksi nitrasi benzena

d. Reaksi Sulfonasi

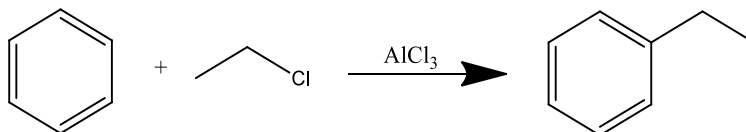
Benzena juga dapat mengalami reaksi substitusi dengan asam sulfat pekat atau sulfur trioksida (SO_3), menghasilkan asam benzenasulfonat. Reaksi ini bersifat reversibel dan termasuk dalam mekanisme substitusi aromatik elektrofilik.



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

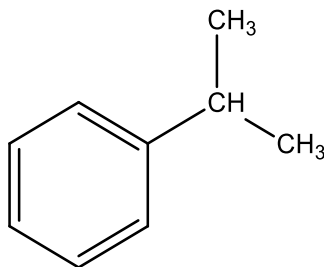
Tabel 2. 4 Sifat Fisika dan Termodinamika Isopropil Benzena

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).

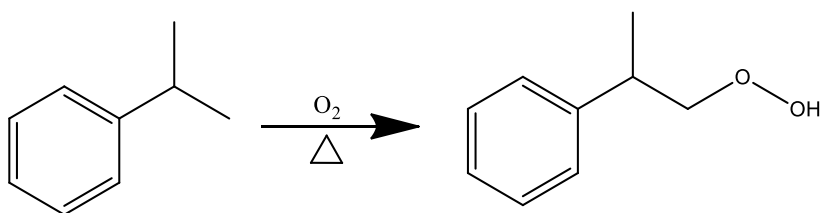


Gambar 2. 10 Struktur molekul Isopropil Benzena (PubChem, 2023)

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).

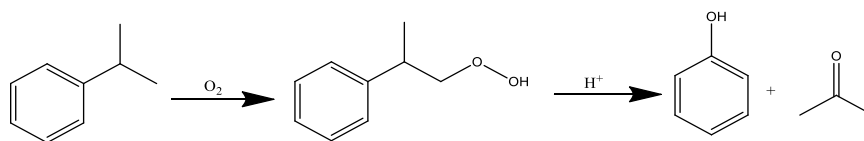


Gambar 2. 11 Reaksi oksidasi Isopropil benzene

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.

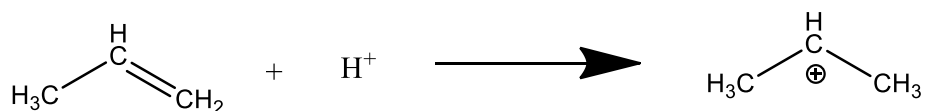
2.5.1.1 Mekanisme Reaksi *Cumene*

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.

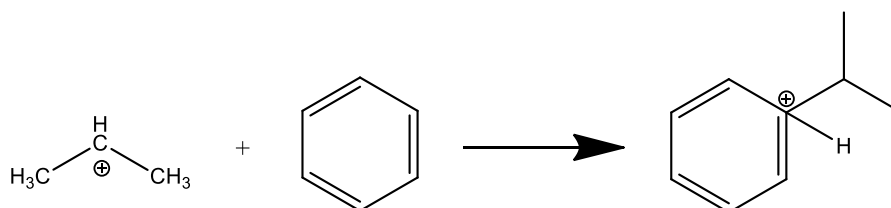


Gambar 2. 13 Tahap Alkilasi Benzena

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).

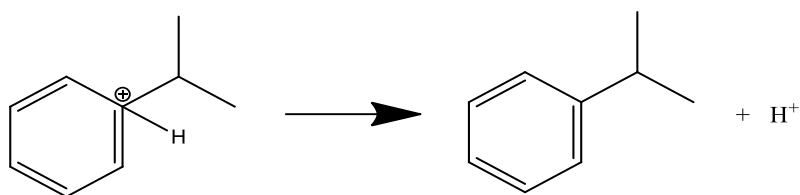
Pada tahap ini, sistem aromatik benzena sementara terganggu karena salah satu atom karbon berubah dari hibridisasi sp^2 menjadi sp^3 . Muatan positif pada kompleks sigma tidak terlokalisasi pada satu atom, melainkan terdelokalisasi di sepanjang cincin aromatik melalui resonansi, yang memberikan stabilisasi 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*

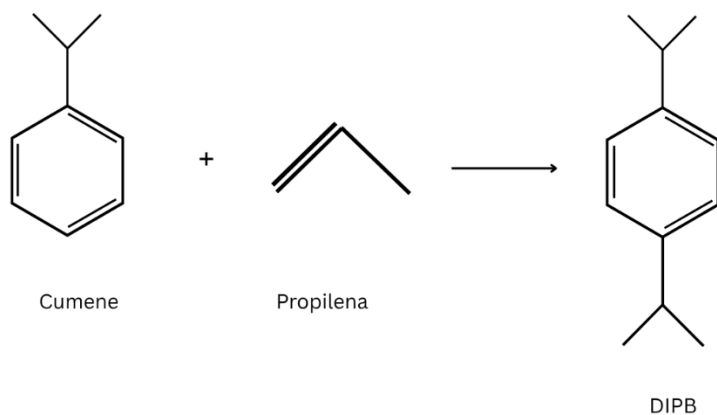
Pada tahap akhir, kompleks sigma mengalami pelepasan proton (H^+) dari atom karbon yang terikat pada gugus isopropil. Pelepasan proton ini bertujuan untuk mengembalikan struktur aromatik benzena yang stabil. Proton yang dilepaskan akan kembali ke situs asam katalis zeolit, sehingga katalis dapat digunakan 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.

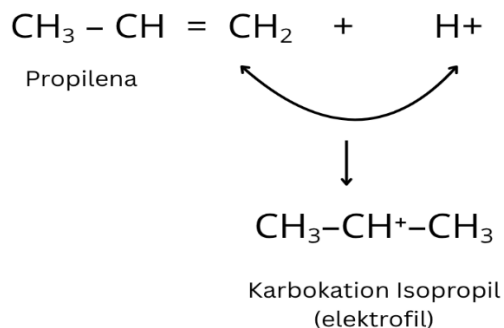


Gambar 2. 16 Reaksi pembentukan DIPB

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.

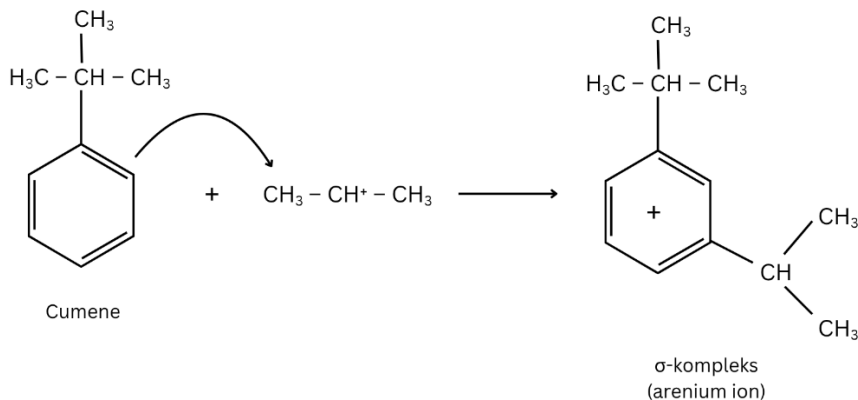


Gambar 2. 17 Tahap Pembentukan Karbokation Isopropil

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.

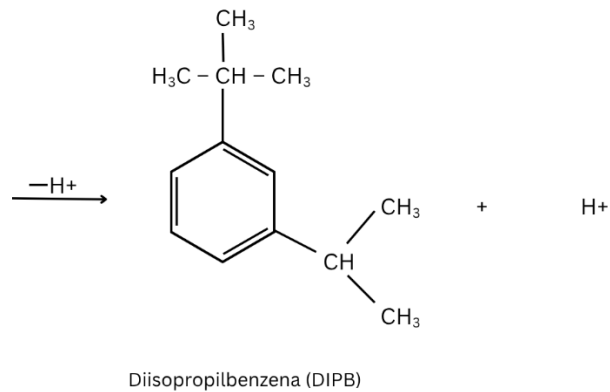


Gambar 2. 18 Tahap Serangan Elektrofilik pada *Cumene*

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.

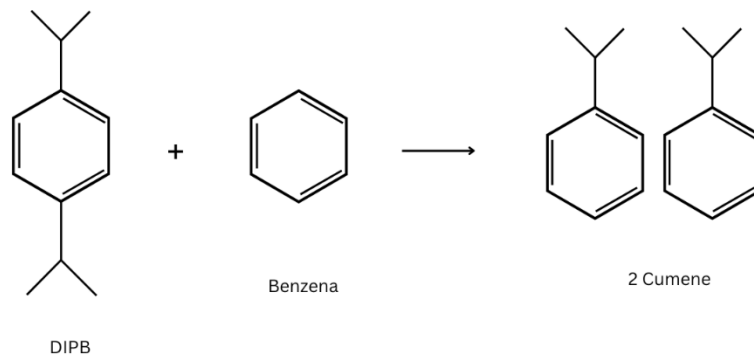
Pembentukan DIPB umumnya meningkat ketika konsentrasi propilena terlalu tinggi atau rasio benzena terhadap propilena terlalu rendah di dalam reaktor alkilasi.



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 benzena untuk menghasilkan *cumene* tambahan. Reaksi ini bertujuan meningkatkan yield *cumene* dan mengurangi akumulasi produk samping berat didalam sistem proses.

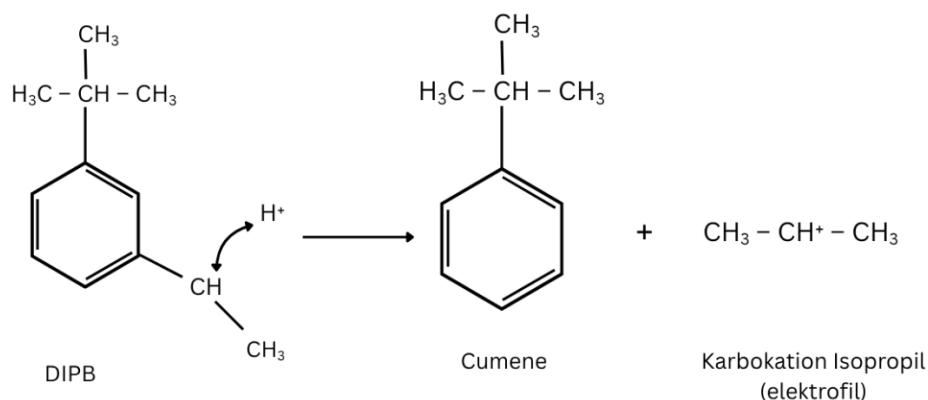


Gambar 2. 20 Reaksi Transalkilasi DIPB menjadi *Cumene*

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.

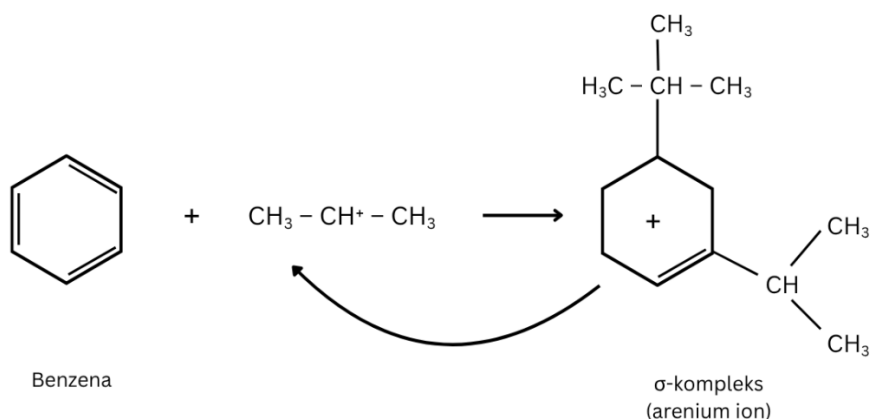
Tahap ini menghasilkan satu molekul *cumene* dan satu karbokation isopropil yang selanjutnya akan bereaksi dengan benzena.



Gambar 2. 21 Tahap Pelepasan Gugus Isopropil dari DIPB

2. Mekanisme Tahap II: Serangan Elektrofilik ke Benzena

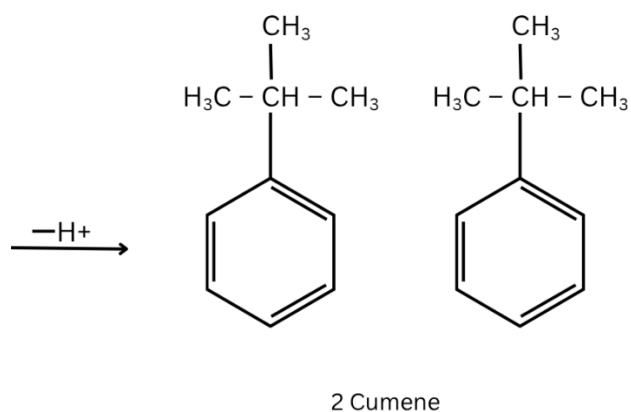
Karbokation isopropil yang terbentuk kemudian menyerang cincin aromatik benzena sehingga membentuk σ -kompleks (arenium ion). Tahap ini menjadi tahap pengendali laju (*rate determining step*) karena membutuhkan energi aktivasi untuk mengganggu kestabilan aromatik benzena.



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.

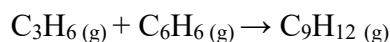
Tabel 2. 7 Nilai entalpi pembentukan pada 298K

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

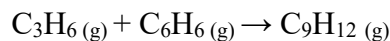
d. Konstanta Kesetimbangan pada Kondisi Standar (K_o)

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:

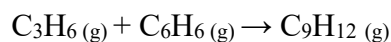
- $\Delta H = -99420 \text{ J/mol}$
- $T = 523 \text{ K}$

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.

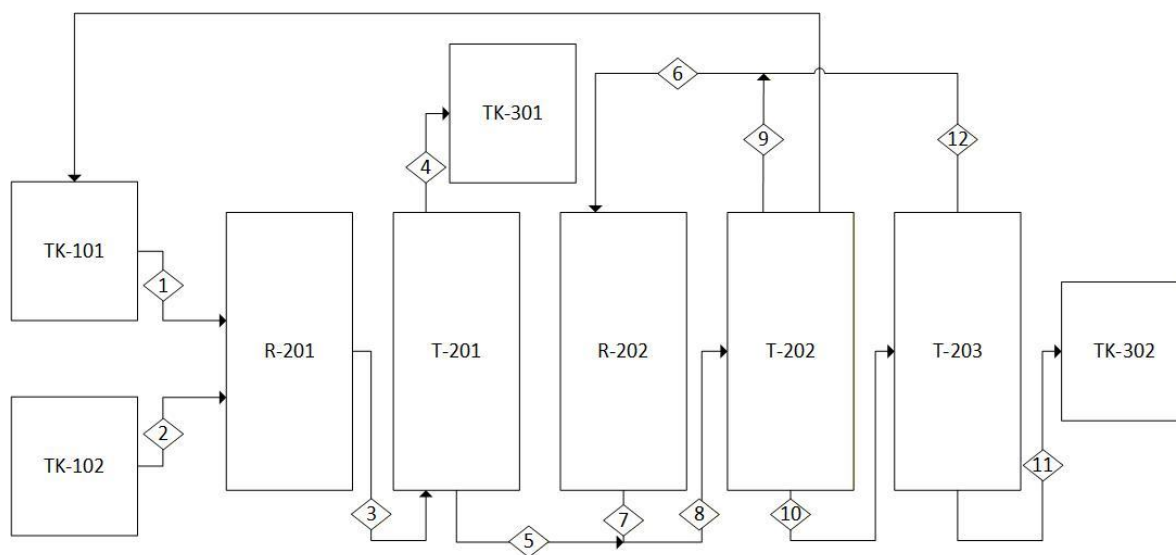
Selanjutnya, untuk memaksimalkan pemanfaatan komponen yang belum terkonversi, aliran benzena hasil distilat dari kolom (T-202) yang telah terkondensasi dalam fasa cair dipompa menggunakan (P-202 A/B) dan dialirkan kembali sebagai aliran recycle. Aliran ini kemudian dibagi menjadi dua, di mana sebagian 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

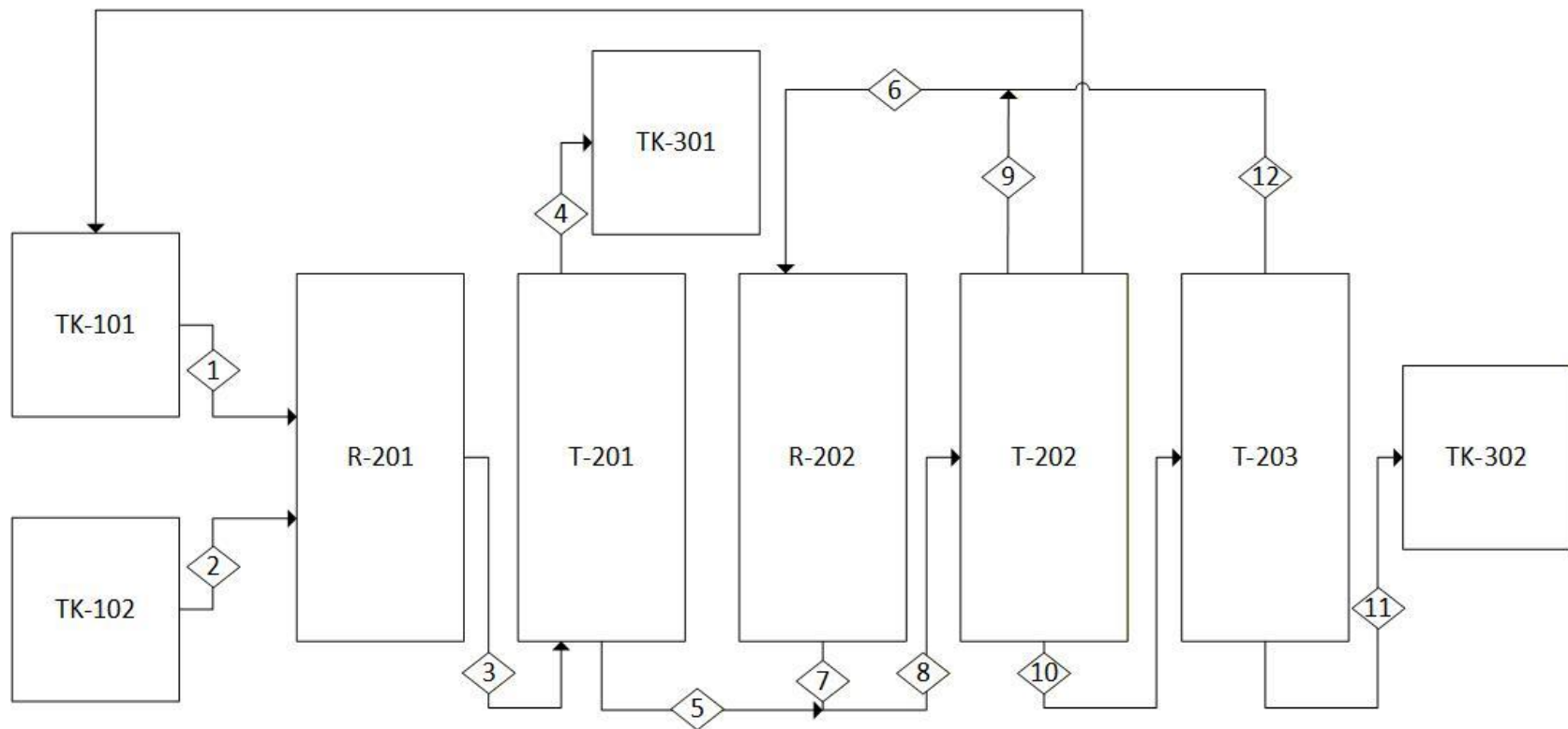
Tabel 2. 10 Kode Alat

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

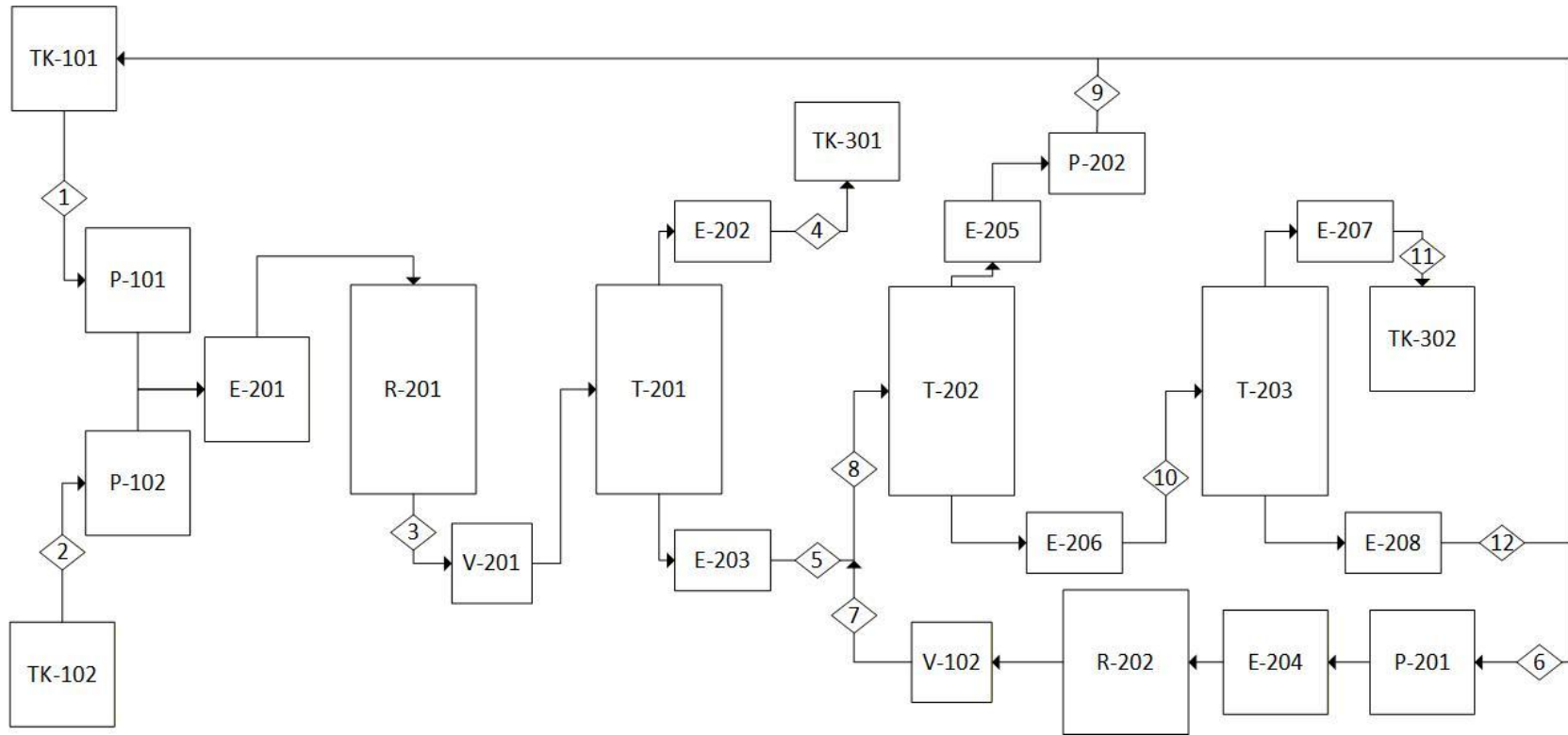
2.7 Diagram Alir

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

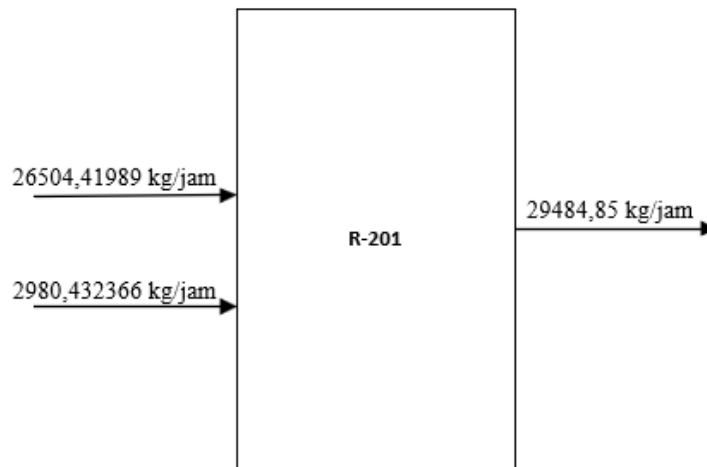
2.8.1 Neraca Massa

Ringkasan hasil perhitungan neraca massa pada Pra-Rancangan Pabrik Isopropil Benzene (*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.

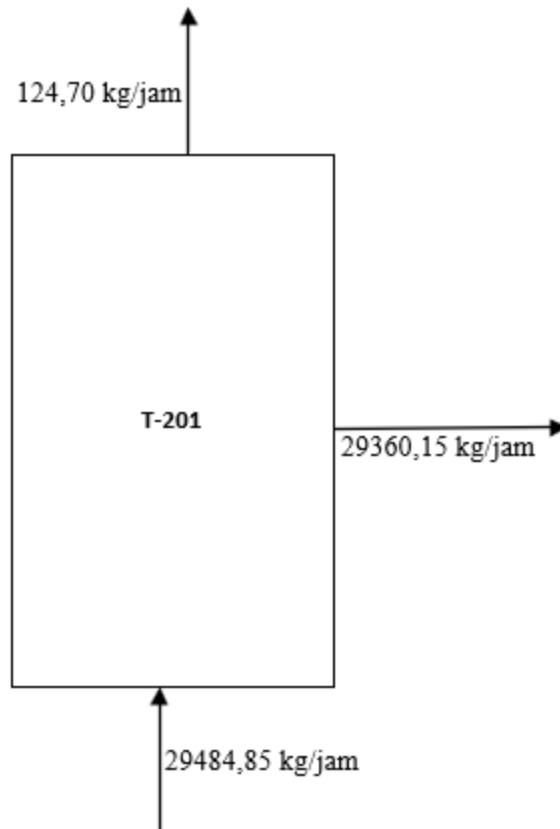
1. Neraca Massa pada Reaktor Alkilasi



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

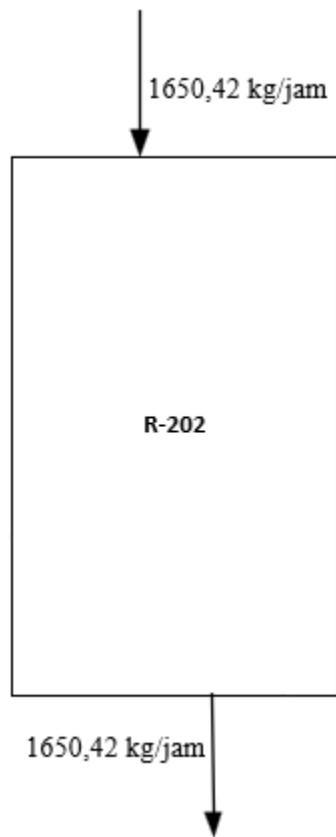
2. Neraca Massa pada Depropanizer



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	

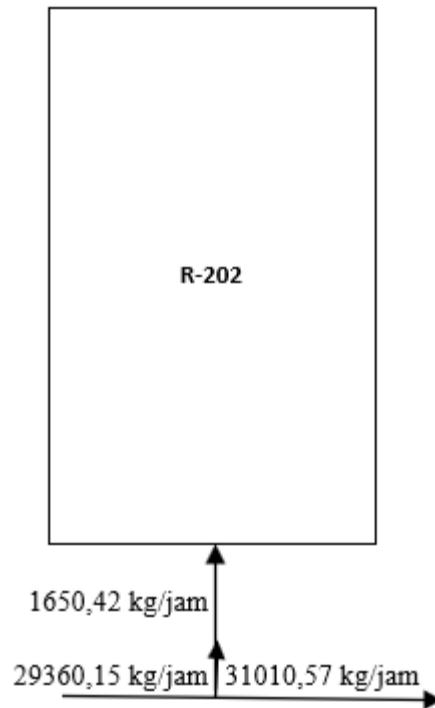
3. Neraca Massa pada Reaktor Transalkilasi



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

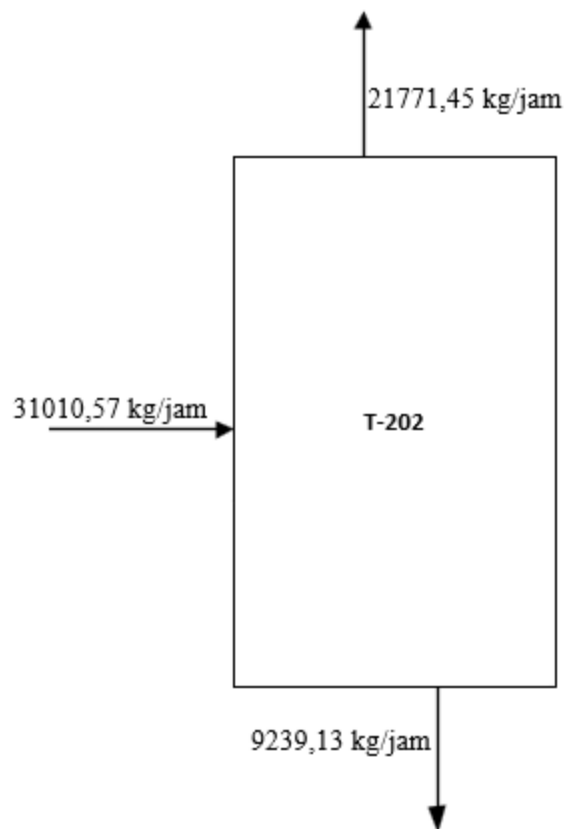
Mixing point pada Reaktor Transalkilasi



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

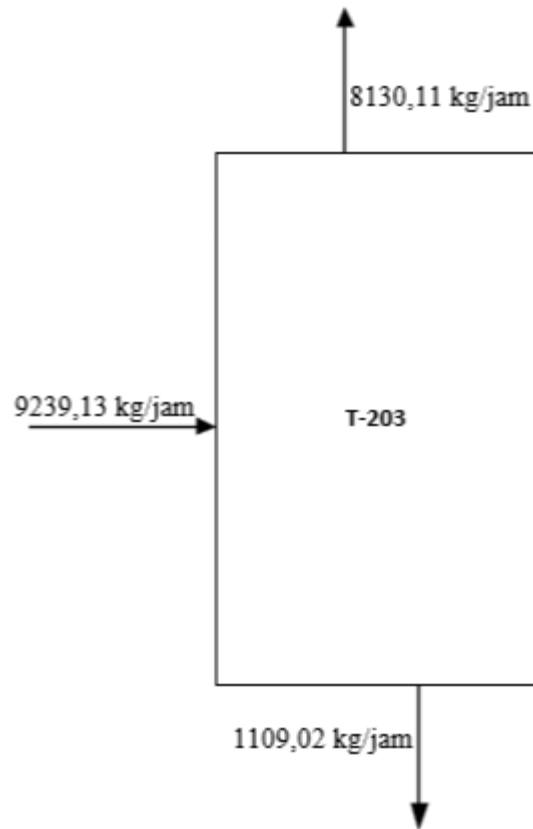
4. Neraca Massa pada Kolom Benzena



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	

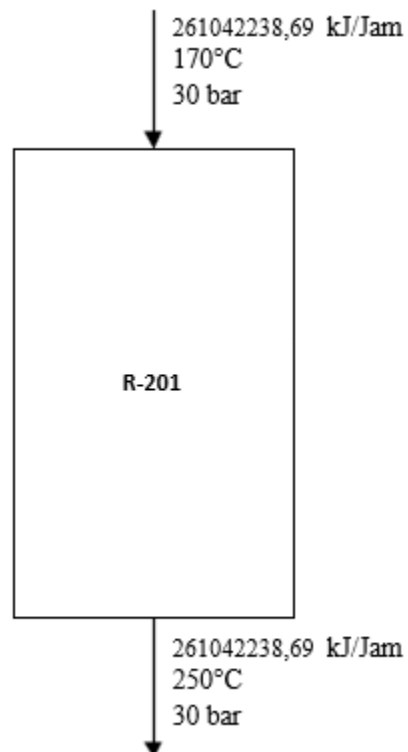
6. Neraca Massa *Overall*

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

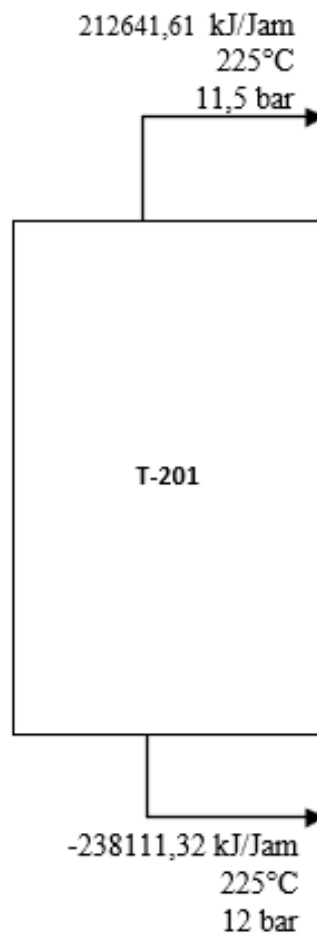
1. Neraca Panas pada Reaktor Alkilasi



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

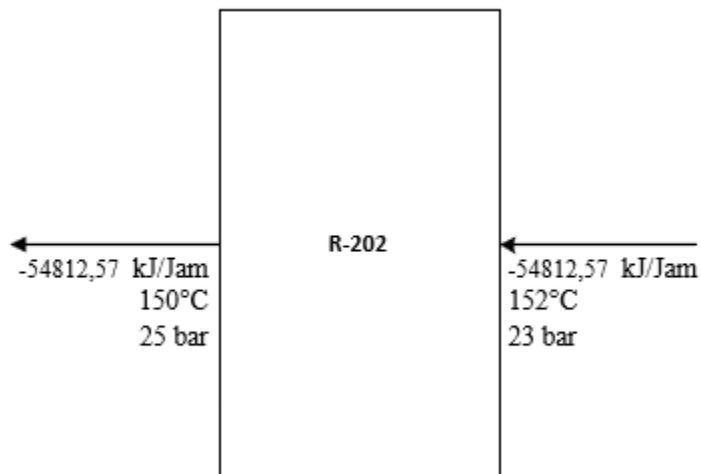
2. Neraca Panas pada Depropanizer



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

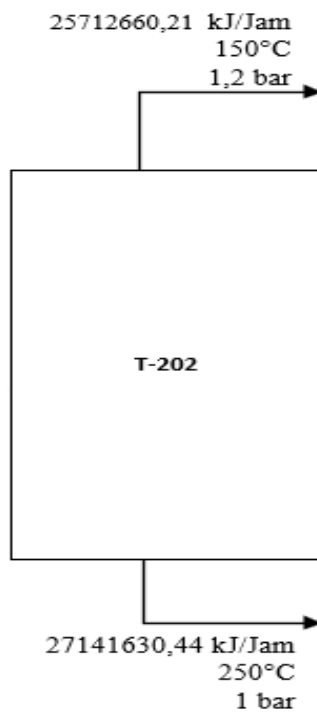
3. Neraca Panas pada Reaktor Transalkilasi



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

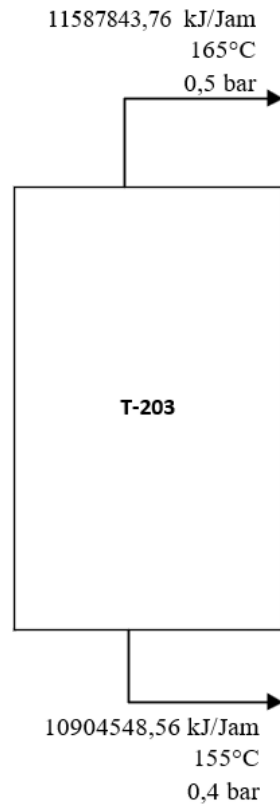
4. Neraca Panas pada Kolom Benzena



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

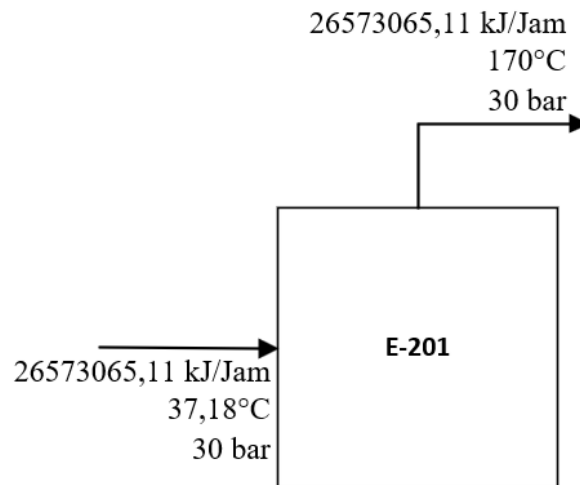
5. Neraca Panas pada Kolom *Cumene*



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

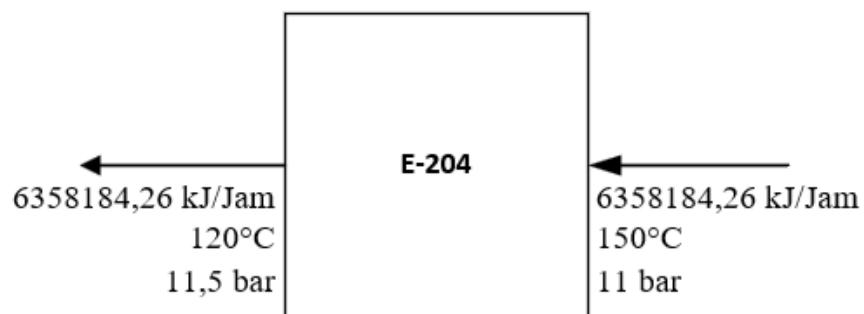
6. Neraca Panas pada Heat Exchanger (E-201)



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
	Cumene	0.00	1370208.94
	DIPB	0.00	-179736.39
Depropanizer	Propane	-70.91	-323511.56
	Benzene	15256674.13	15434100.83
	Cumene	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
	Cumene	0.00	-36547.65
	DIPB	-541572.28	-214131.37
Kolom Benzena	Benzene	2143744.809	19165043.05
	Cumene	-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 Cumene	Benzene	2143744.809	19165043.05
	Cumene	-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.

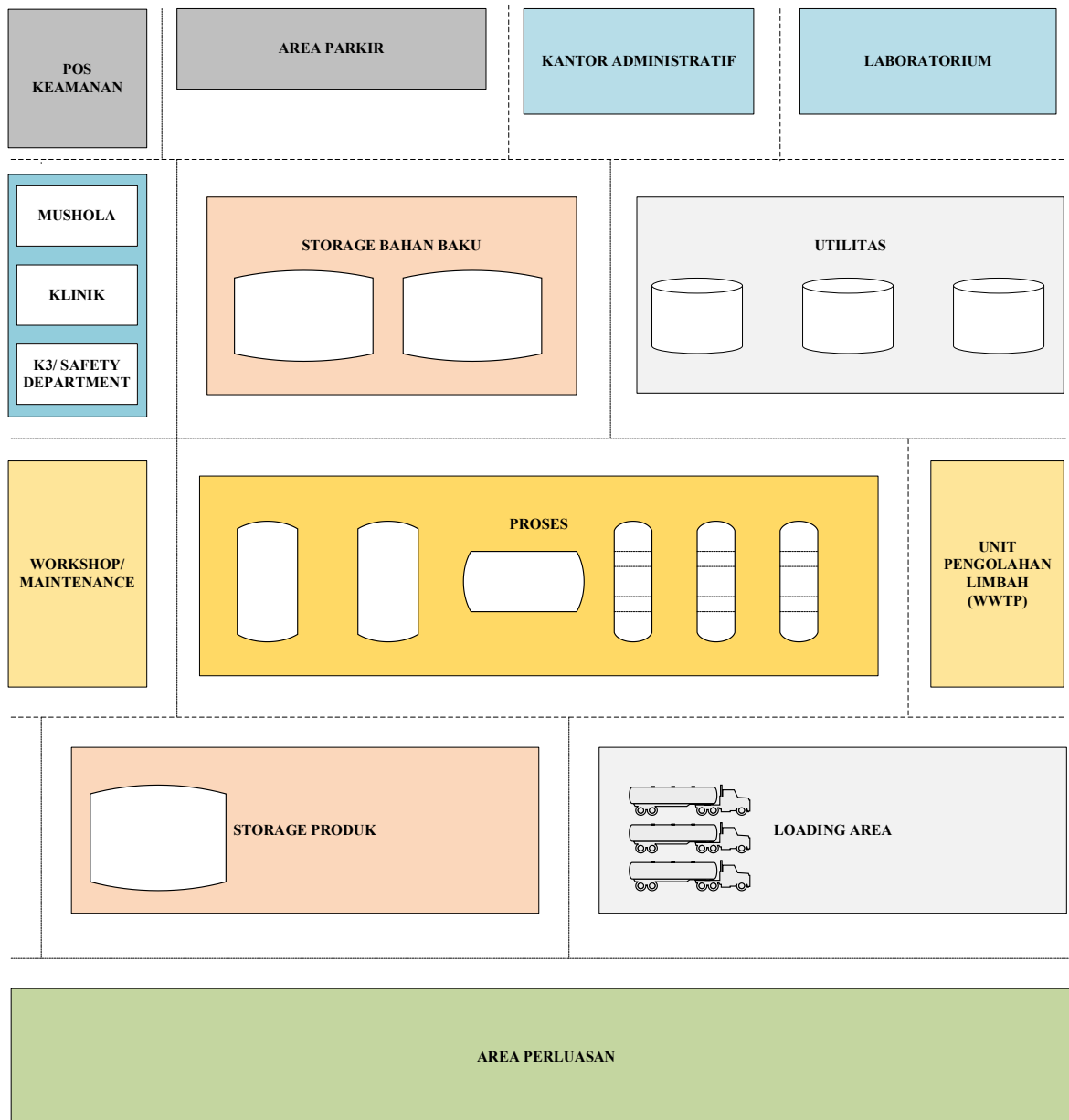
Adapun perincian luas tanah yang akan digunakan area-area tersebut sebagai bangunan pabrik dapat dilihat pada Tabel 2.26 berikut.

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

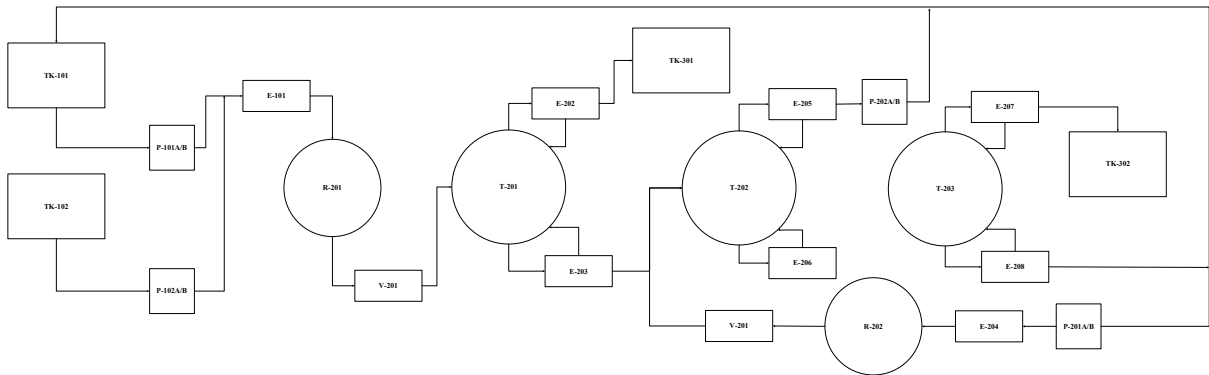
11	Tangki Bahan Baku	2.500
12	Area Proses (Produksi)	18.000
13	Ruang Kontrol	300
14	Unit Pengolahan Limbah (WWTP)	500
15	Tangki Produk	2.000
16	Loading Area	600
17	Jalan & Sirkulasi	8.000
18	Area Perluasan	15.000
TOTAL		51.280 m²

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 perpipaan, 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.