

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Butiraldehid merupakan salah satu senyawa yang memiliki gugus aldehid yang banyak digunakan dalam industri kimia. Butiraldehid dikenal juga dengan nama n-butanol atau butil aldehid. Secara alami butiraldehid terdapat pada daun teh, aroma kopi, dan asap tembakau. Butiraldehid merupakan produk intermediet yang banyak digunakan untuk menghasilkan produk-produk lain seperti n-butanol, 2 etil heksanol (2-EH), dan Poli Vinil Butiral (PVB). N-butiraldehid sebagai bahan baku pembuatan n-butanol ini merupakan cairan jernih yang tidak berwarna dan mempunyai bau yang khas. Sifat fisika n-butiraldehid antara lain dapat larut dalam air, etil alkohol, etil asetat, aseton, dan toluena, dan merupakan zat yang mudah terbakar (Surijarifre, 2009).

Karena pentingnya kegunaan n-butiraldehid, maka kebutuhan n-butiraldehid di Indonesia semakin meningkat. Namun untuk memenuhi kebutuhannya di Indonesia khususnya pada masa ini masih harus mengandalkan impor dari luar negeri. Maka direncanakan untuk didirikan pabrik n-butiraldehid untuk memenuhi sebagian besar kebutuhan dalam negeri dan sebagian dapat dieksport untuk menambah cadangan devisa dan diharapkan juga dapat membuka lapangan kerja baru. Menurut data komoditi impor dari Badan Pusat Statistik Indonesia, kebutuhan n-butiraldehid menunjukkan nilai yang terus meningkat dari tahun ke tahun. Ini dikarenakan Indonesia masih menggunakan seperti n-butanol, 2 etil heksanol (2-EH), dan Poli Vinil Butiral (PVB) yang dihasilkan dari n-butiraldehid. Kebutuhan butiraldehid di dunia pada tahun 2023 mencapai 163.789 ton/tahun. Akan tetapi sampai tahun 2019 kemampuan produksi butiraldehid di dunia diperkirakan baru mencapai 123.087 ton/tahun.

Di Indonesia, kebutuhan butiraldehid didasarkan pada produksi resin sebanyak 171.000 ton/tahun. Selain itu, Indonesia membutuhkan n-butiraldehid untuk memproduksi n-butanol sebagai solven cat yang mencapai 200.000 ton setiap tahunnya (BPS, 2024). Terakhir, Indonesia membutuhkan isobutiraldehid untuk

sintesis 2-ethylheksanol sebagai plasticizer pada pabrik PVC. Hal ini menunjukkan bahwa pangsa pasar butiraldehid di Indonesia masih besar.

Berdasarkan data statistik kebutuhan Indonesia akan butiraldehid terus meningkat dari tahun ketahun. Sama halnya dengan kebutuhan dunia akan butiraldehid juga terus meningkat seiring dengan berkembangnya pembangunan disektor industri kimia. Dengan dibangunnya pabrik butiraldehid di Indonesia akan memacu perkembangan industri-industri yang menggunakan butiraldehid sebagai bahan baku maupun bahan pembantu.

Sebenarnya di Indonesia sendiri sudah ada yang memproduksi n-butiraldehid, akan tetapi tidak sebanding dengan kebutuhan n-butiraldehid. Oleh karena itu, pendirian pabrik n-butiraldehid di Indonesia sangat penting guna memenuhi kebutuhan dalam negeri. Pendirian pabrik n-butiraldehid dapat membuka lapangan kerja baru dan menekan angka impor, sehingga mengurangi jumlah pengangguran di Indonesia serta meningkatkan pertumbuhan ekonomi negara. Selain itu juga untuk memenuhi pasar di luar negeri yang diharapkan dapat meningkatkan devisa negara.

Dalam reaksi ini, propilen (C_3H_6) dipilih sebagai bahan baku utama karena ketersediaannya yang tinggi sebagai hasil samping dari proses perengkahan (*cracking*) minyak bumi, *fluid catalytic cracking* (FCC), dan juga sebagai produk dari industri petrokimia berbasis naphta. Propilen memiliki keunggulan berupa struktur molekul sederhana dan ikatan rangkap karbon-karbon yang reaktif, menjadikannya ideal sebagai substrat untuk membentuk gugus aldehid melalui proses hidroformilasi. Reaksi antara propilen dan *syngas* menghasilkan dua produk utama yaitu n-butiraldehid (produk linear) dan isobutiraldehid (produk cabang). Namun, dengan penggunaan katalis rhodium, selektivitas terhadap n-butiraldehid dapat ditingkatkan hingga >90%, sehingga sangat cocok untuk proses industri yang mengutamakan efisiensi dan kemurnian produk (Ullmann's, 2021).

Gas sintesis, sebagai pasangan reaksi propilen, juga merupakan bahan baku penting dalam industri kimia karena dapat diperoleh dari berbagai sumber energi seperti gas alam, batubara, biomassa, bahkan dari proses reformasi uap (*steam reforming*) metanol atau hidrokarbon ringan. Fleksibilitas ini menjadikan *syngas*

sebagai bahan baku yang berkelanjutan dan adaptif terhadap kondisi energi nasional. Dengan teknologi gasifikasi yang terus berkembang, potensi produksi *syngas* di Indonesia melalui konversi batubara atau biomassa juga sangat besar, sehingga membuka peluang integrasi antara industri petrokimia dengan industri energi dan kimia hijau (*green chemical industry*) (Ullmann's, 2021).

Penggunaan propilen dan *syngas* sebagai bahan baku dalam perancangan pabrik n-butiraldehid memiliki sejumlah keunggulan, baik dari sisi teknis, ekonomis, maupun lingkungan. Secara teknis, proses hidroformilasi dapat dijalankan pada suhu dan tekanan relatif rendah (sekitar 100–120 °C dan 10–30 atm) terutama dengan penggunaan katalis rhodium, sehingga lebih hemat energi dibanding teknologi lain. Secara ekonomis, pemanfaatan propilen yang tersedia dalam negeri dapat menekan ketergantungan terhadap impor bahan kimia antara. Sementara dari sisi lingkungan, proses ini menghasilkan limbah minimal dan dapat diintegrasikan dengan sistem daur ulang katalis, sejalan dengan prinsip industri kimia berkelanjutan.

Dengan mempertimbangkan potensi bahan baku lokal, tren kebutuhan industri hilir, efisiensi proses, dan aspek keberlanjutan, maka perancangan pabrik n-butiraldehid dari propilen dan gas sintesis merupakan langkah strategis dalam mendukung pembangunan industri petrokimia nasional yang terintegrasi, mandiri, dan berdaya saing global. Selain menjadi sarana penguatan struktur industri kimia hulu di Indonesia, proyek ini juga mendukung hilirisasi produk-produk bernilai tambah dari minyak bumi dan gas alam.

1.2 Rumusan Masalah

Semakin tingginya penggunaan pabrik n-butiraldehid di dunia yang merupakan produk antara dalam suatu proses industri seperti n-butanol dan 2-etil heksanol memacu Indonesia untuk memberikan suatu prospek baru untuk dibuat suatu perancangan pabrik pembuatan butiraldehid (C_4H_8O) dengan menggunakan bahan baku propilen (C_3H_6) dan gas sintesa (CO dan H_2) dengan menggunakan proses hidroformilasi (*oxo-reaction*).

1.3 Tujuan Perancangan Pabrik

Tujuan dari prarancangan pabrik butiraldehid dari propilen dan gas sintesis dengan proses *oxo-reaction* adalah:

1. Untuk memenuhi prasyarat untuk menjadi sarjana S1 Teknik Kimia
2. Untuk meningkatkan pengetahuan tentang perancangan pabrik n-butiraldehid dengan proses *oxo-reaction* sehingga memberikan gambaran tentang kelayakan pendirian pabrik ini.
3. Untuk menerapkan disiplin ilmu teknik kimia khususnya di bidang perancangan, proses dan operasi teknik kimia sehingga akan memberikan gambaran kelayakan pabrik pembuatan Butiraldehid.
4. Untuk meningkatkan skill dalam penggunaan software aplikasi untuk perancangan pabrik.

1.4 Manfaat Prarancangan Pabrik

Manfaat perancangan pabrik pembuatan butiraldehid (C_4H_8O) dengan menggunakan bahan baku propilen (C_3H_6) dan gas sintesis (CO dan H₂) dengan menggunakan proses oxo reaction atau hidroformilasi adalah memberi gambaran kelayakan (*feasibility*) pabrik ini untuk dikembangkan di Indonesia. Dimana nantinya gambaran tersebut menjadi patokan untuk pengambilan keputusan terhadap pendirian suatu pabrik.

1.5 Batasan Masalah

Di dalam penyusunan dan penyelesaian tugas prarancangan pabrik n-butiraldehid ini, penyusun membatasi hanya pada *flowsheet (steady state)*, pabrik n-butiraldehid, *dynamic mode*, neraca massa, neraca energi, spesifikasi peralatan, analisa ekonomi, unit utilitas, Autodesk P&ID, Aspen Hysys, Autodesk Plant 3D dan tugas khusus.

1.6 Kapasitas Prarancangan Pabrik

Kapasitas pabrik merupakan faktor yang sangat penting dalam pendirian pabrik karena akan mempengaruhi perhitungan teknis dan ekonomis. Semakin besar kapasitas pabrik kemungkinan keuntungan yang diperoleh akan semakin besar, tetapi dalam penentuan kapasitas perlu juga dipertimbangkan faktor lainnya.

Faktor-faktor yang mempengaruhi kapasitas pabrik yaitu data kebutuhan n-butiraldehid di Indonesia yang akan diuraikan berikut ini.

1.6.1 Data Kebutuhan N-Butiraldehid di Indonesia

Konsumsi n-butiraldehid di dunia diprediksi akan mencapai 171.921 ton/tahun pada tahun 2024 karena banyaknya industri yang menggunakan senyawa ini untuk sintesis 2-etilheksanol sebagai *plasticizer* pada pabrik PVC. Data Kebutuhan n-butiraldehid di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1.1.

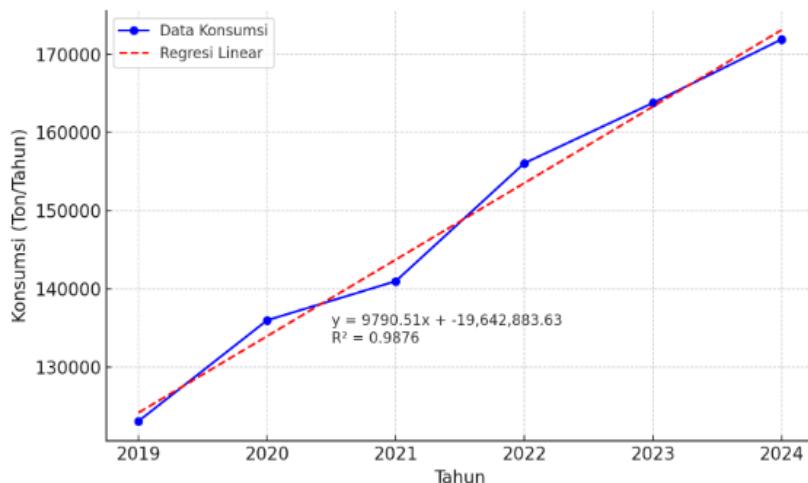
Tabel 1.1 Data Kebutuhan n-butiraldehid di Indonesia

No.	Tahun	Konsumsi (Ton/Tahun)
1.	2019	123.087
2.	2020	135.986
3.	2021	140.987
4.	2022	156.076
5.	2023	163.789
6.	2024	171.921

(Sumber: Badan Pusat Statistik, BPS (tahun 2024).

Dalam kurun waktu 5 tahun terakhir terdapat kenaikan import n-butiraldehid dalam negeri. Hal ini menunjukan bahwa kebutuhan n-butiraldehid dalam negeri masih tinggi.

Selanjutnya kebutuhan n-butiraldehid di Indonesia pada tahun 2019 sampai 2024 dapat diproyeksikan sebagaimana dinyatakan pada Gambar 1.1



Gambar 1.1 Grafik n-butiraldehid di Indonesia pada tahun 2019 hingga 2024

Berdasarkan Gambar 1.1 dapat dilihat bahwa persamaan yang diperoleh adalah $y = 9790,51x - 19.642.883,63$ dengan $R^2 = 0,9876$. Kebutuhan n-butiraldehid di Indonesia tiap tahunnya mengalami kenaikan sesuai dengan persamaan garis lurus: $y = 9790,51x - 19.642.883,63$ dimana y adalah kebutuhan n-butiraldehid pada tahun tertentu dalam ton, sedangkan x adalah tahun ke yang akan dihitung.

Kebutuhan impor n-butiraldehid di Indonesia pada tahun 2028 adalah sebagai berikut:

$$y = 9790,51x - 19.642.883,63$$

$$y = 9790,51 (2028) - 19.642.883,63$$

$$y = 212.270$$

Sehingga kebutuhan impor n-butiraldehid di Indonesia pada tahun 2028 diperkirakan sebesar 212.270 ton/tahun. Prediksi data kebutuhan impor pada tahun 2025 sampai 2028 menggunakan cara ekstrapolasi juga dapat dilihat pada Tabel 1.2

Tabel 1.2 Data Kapasitas Produksi n-butiraldehid Indonesia

No.	Tahun	Konsumsi (Ton/Tahun)
1.	2025	182.899
2.	2026	192.689
3.	2027	202.480
4.	2028	212.270

(Sumber : Data Ekstrapolasi, 2025).

Tabel 1.2 menunjukkan data proyeksi kebutuhan n-butiraldehid di Indonesia untuk periode tahun 2025 hingga 2028. Data ini diperoleh berdasarkan perhitungan ekstrapolasi linear dari tren kebutuhan pada tahun-tahun sebelumnya (2019–2024). Ekstrapolasi dilakukan menggunakan persamaan regresi linear yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu: $y = 9790,51x - 19.642.883,63$

Berdasarkan perhitungan tersebut, diperoleh prediksi kebutuhan n-butiraldehid di Indonesia pada tahun 2025 sebesar 182.899 ton/tahun. Nilai ini terus meningkat pada tahun-tahun berikutnya, yaitu menjadi 192.689 ton/tahun pada 2026, 202.480 ton/tahun pada 2027, dan mencapai 212.270 ton/tahun pada 2028. Peningkatan ini menunjukkan adanya tren pertumbuhan konsumsi yang stabil dari

tahun ke tahun, dengan rata-rata pertambahan sekitar 12.000 hingga 13.000 ton per tahun.

Tabel ini sangat penting sebagai acuan dalam merancang kapasitas produksi pabrik n-butiraldehid. Dengan memperkirakan kebutuhan masa depan secara kuantitatif, perancang pabrik dapat menentukan skala produksi yang optimal, serta melakukan analisis teknis dan ekonomi yang lebih akurat. Selain itu, data ini juga mendukung perencanaan investasi jangka panjang dan strategi pemenuhan pasar domestik agar dapat mengurangi ketergantungan impor di masa depan.

Jadi, kapasitas pabrik baru diperkirakan dapat memenuhi kebutuhan dalam negeri sebesar 50% dari kapasitas produksi yang diinginkan pada tahun yang akan datang sebesar 212.270 Ton/tahun. Sehingga didapatkan kapasitas pabrik baru pada tahun 2028 adalah 106.135 Ton/tahun. Hal ini didasarkan pada kapasitas pabrik-pabrik yang sudah beroperasi, Berdasarkan data pabrik butiraldehid yang sudah berdiri di luar negeri, Eropa (230.000-260.000 ton/tahun). Cina (112.000 – 120.000 ton/tahun). Hungaria (100.000 – 117.000 ton/tahun). Jerman (95.000 – 105.000 ton/tahun) Dengan memperhatikan faktor-faktor diatas, maka dipilih dengan kapasitas 100.000 ton/tahun yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri, pabrik ini direncanakan akan didirikan pada tahun 2028.

Selain untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri, sekitar 5–10% dari total produksi pabrik n-butiraldehid direncanakan akan dieksport ke luar negeri. Berdasarkan data pabrik-pabrik yang telah beroperasi di berbagai negara, ekspor dapat diarahkan ke negara-negara yang memiliki konsumsi tinggi namun tidak sepenuhnya mampu memenuhi kebutuhannya, seperti negara-negara di Asia. Selain itu, negara-negara Asia Tenggara memiliki kedekatan geografis dengan Indonesia, sehingga biaya logistik relatif rendah dan waktu pengiriman lebih cepat. Negara-negara di Eropa seperti Jerman dan Hungaria memang memiliki kapasitas produksi besar, namun kebutuhan internal mereka terhadap turunan n-butiraldehid (seperti *plasticizer*, pelarut, dan *intermediate* kimia lainnya) juga tinggi. Oleh karena itu, peluang ekspor ke Eropa tetap terbuka, terutama jika produk Indonesia memiliki keunggulan dari segi harga atau kualitas. Dengan demikian,

strategi ekspor ini akan memperluas pasar, meningkatkan nilai tambah produk, serta mengurangi ketergantungan terhadap pasar domestik semata.

1.6.2 Data Kapasitas Produksi n-butiraldehid di Beberapa Negara

Data ekstrapolasi tersebut telah diperoleh untuk kapasitas industri yang menghasilkan n-butiraldehid. Jika dilihat dari data ekstrapolasi kebutuhan n-butiraldehid ada peningkatan dari tahun ketahun. Adapun pabrik yang sudah mendirikan produk n-butiraldehid dapat dilihat pada Tabel 1.3

Tabel 1.3 Data Produksi Pabrik n-butiraldehid di Beberapa Negara

Negara	Kapasitas (Ton/Tahun)
Eropa	240.000
Cina	120.000
Hungaria	117.000
Jerman	105.000

(Sumber: Badan Pusat Statistik, BPS (tahun 2024).

1. Eropa

Tabel diatas menunjukkan data konsumsi n-butiraldehida di kawasan Eropa selama periode 2019 hingga 2023 dalam satuan ton per tahun. Secara umum, terlihat adanya tren fluktuatif dalam konsumsi, yang dipengaruhi oleh dinamika industri kimia, kondisi ekonomi global, serta krisis energi yang melanda Eropa dalam beberapa tahun terakhir. Adapun data konsumsi n-butiraldehida di kawasan Eropa selama periode 2019 hingga 2023 dapat dilihat pada Tabel 1.4

Tabel 1.4 Data Produksi Pabrik n-butiraldehid di Kawasan Eropa

No.	Tahun	Konsumsi (Ton/Tahun)
1.	2019	230.000
2.	2020	245.000
3.	2021	260.000
4.	2022	250.000
5.	2023	240.000

(Sumber: Statista dan HIS Markit (S&P Global, 2023).

Berikut data ekstrapolasi n-butiraldehid di Kawasan Eropa. Data ekstrapolasi tersebut telah diperoleh untuk kapasitas industri yang menghasilkan n-butiraldehid. Jika dilihat dari data ekstrapolasi kebutuhan n-butiraldehid ada peningkatan dari tahun ketahun.

Tabel 1.5 Data Ekstrapolasi n-butiraldehid di Kawasan Eropa

No.	Tahun	Konsumsi (Ton/Tahun)
1.	2025	255.000
2.	2026	257.000
3.	2027	260.000
4.	2028	262.000

(Sumber : Data Ekstrapolasi, 2025).

Tabel 1.5 menyajikan hasil proyeksi kebutuhan n-butiraldehid di kawasan Eropa untuk periode tahun 2025 hingga 2028. Estimasi ini diperoleh menggunakan metode ekstrapolasi berdasarkan tren historis dari data produksi sebelumnya. Terlihat adanya peningkatan bertahap pada konsumsi tahunan, dimulai dari 255.000 ton pada tahun 2025 dan mencapai 262.000 ton pada tahun 2028. Kenaikan ini menunjukkan pola pertumbuhan yang cukup stabil, mencerminkan permintaan yang konsisten terhadap senyawa ini dalam berbagai aplikasi industri.

2. Cina

Tabel di atas menunjukkan tren konsumsi n-butiraldehida di Cina selama periode 2019 hingga 2023. Kenaikan ini mencerminkan pertumbuhan stabil dalam permintaan domestik terhadap n-butiraldehida, terutama untuk industri bahan kimia antara seperti pelarut, plasticizer, dan senyawa turunan lainnya. Peningkatan ini juga mengindikasikan bahwa industri kimia di Cina tetap berkembang meskipun menghadapi tekanan global seperti pandemi dan ketegangan perdagangan. Adapun data konsumsi n-butiraldehida di kawasan Cina selama periode 2019 hingga 2023 dapat dilihat pada Tabel 1.6

Tabel 1.6 Data Produksi Pabrik n-butiraldehid di Kawasan Cina

No.	Tahun	Konsumsi (Ton/Tahun)
1.	2019	112.000
2.	2020	115.000
3.	2021	118.000
4.	2022	119.000
5.	2023	120.000

(Sumber: Statista dan HIS Markit (S&P Global, 2023).

Berikut data ekstrapolasi n-butiraldehid di Kawasan Cina. Data ekstrapolasi tersebut telah diperoleh untuk kapasitas industri yang menghasilkan n-butiraldehid. Jika dilihat dari data ekstrapolasi kebutuhan n-butiraldehid ada peningkatan dari tahun ketahun. Estimasi dalam tabel ini diperoleh dari pendekatan matematis menggunakan metode ekstrapolasi linear, yang didasarkan pada pola pertumbuhan konsumsi sebelumnya. Informasi ini sangat berguna sebagai referensi dalam menyusun strategi produksi, investasi pabrik baru, maupun rencana ekspor ke pasar Cina. Dengan memahami kebutuhan masa depan secara kuantitatif, pelaku industri dapat lebih siap dalam memenuhi permintaan pasar secara efisien dan berkelanjutan.

Tabel 1.7 Data Ekstrapolasi n-butiraldehid di Kawasan Cina

No.	Tahun	Konsumsi (Ton/Tahun)
1.	2025	124.000
2.	2026	126.000
3.	2027	128.000
4.	2028	130.000

(Sumber : Data Ekstrapolasi, 2025).

Tabel 1.7 menyajikan hasil perhitungan proyeksi konsumsi n-butiraldehid di kawasan Cina untuk periode tahun 2025 hingga 2028. Berdasarkan data tersebut, diperkirakan terjadi peningkatan konsumsi secara bertahap dari 124.000 ton pada tahun 2025 hingga mencapai 130.000 ton pada tahun 2028. Tren ini menunjukkan bahwa permintaan terhadap n-butiraldehid di wilayah tersebut diprediksi akan terus

tumbuh seiring dengan perkembangan industri yang menggunakan senyawa ini sebagai bahan baku.

3. Hungaria

Tabel konsumsi n-butiraldehida di Hungaria menunjukkan tren yang stabil dengan kecenderungan meningkat selama lima tahun terakhir. Hal ini mengindikasikan bahwa permintaan terhadap n-butiraldehida di negara tersebut cukup konsisten, mencerminkan keberlanjutan aktivitas industri kimia di Hungaria. Kestabilan ini juga menunjukkan bahwa n-butiraldehida masih menjadi bahan kimia penting dalam berbagai aplikasi industri lokal, terutama dalam pembuatan plasticizer, pelarut, dan senyawa turunan lainnya. Adapun data konsumsi n-butiraldehida di kawasan Hungaria selama periode 2019 hingga 2023 dapat dilihat pada Tabel 1.8

Tabel 1.8 Data Produksi Pabrik n-butiraldehid di Kawasan Hungaria

No.	Tahun	Konsumsi (Ton/Tahun)
1.	2019	100.000
2.	2020	110.000
3.	2021	120.000
4.	2022	115.000
5.	2023	117.000

(Sumber: Statista dan HIS Markit (S&P Global, 2023).

Tabel 1.9 Data Ekstrapolasi n-butiraldehid di Kawasan Hungaria

No.	Tahun	Konsumsi (Ton/Tahun)
1.	2025	128.000
2.	2026	131.000
3.	2027	135.000
4.	2028	139.000

(Sumber : Data Ekstrapolasi, 2025).

Tabel ini menyajikan proyeksi konsumsi n-butiraldehid di kawasan Hungaria untuk empat tahun ke depan, yaitu dari tahun 2025 hingga 2028. Perhitungan dilakukan menggunakan metode ekstrapolasi linear berdasarkan tren konsumsi aktual dari tahun 2019 hingga 2023. Terlihat bahwa konsumsi n-

butiraldehid diprediksi mengalami kenaikan bertahap, dimulai dari 124.100 ton pada tahun 2024 hingga mencapai 139.700 ton pada tahun 2028. Perkiraan ini menunjukkan bahwa kebutuhan terhadap senyawa kimia tersebut masih akan terus tumbuh di wilayah tersebut.

Peningkatan ini mencerminkan keberlanjutan aktivitas industri yang memanfaatkan n-butiraldehid, terutama dalam pembuatan plasticizer, pelarut, dan bahan turunan lainnya. Meskipun sempat terjadi fluktuasi ringan dalam data historis, proyeksi ini memberikan gambaran optimis terhadap permintaan pasar di Hungaria. Informasi semacam ini sangat berguna dalam perencanaan kapasitas produksi, strategi distribusi bahan baku kimia, serta pengambilan keputusan investasi oleh pelaku industri terkait.

4. Jerman

Selama lima tahun terakhir, konsumsi n-butiraldehida di Jerman mengalami peningkatan yang cukup konsisten. Pola ini mencerminkan keberlanjutan penggunaan senyawa tersebut dalam sektor industri, terutama pada industri kimia yang terus berkembang. Kestabilan dan pertumbuhan konsumsi tersebut menunjukkan bahwa n-butiraldehida memiliki peran strategis sebagai bahan dasar dalam berbagai proses produksi, termasuk pembuatan bahan kimia turunan dan pelarut industri. Adapun data konsumsi n-butiraldehida di kawasan Jerman selama periode 2019 hingga 2023 dapat dilihat pada Tabel 1.7

Tabel 1.10 Data Produksi Pabrik n-butiraldehid di Kawasan Jerman

No.	Tahun	Konsumsi (Ton/Tahun)
1.	2019	95.000
2.	2020	100.000
3.	2021	102.000
4.	2022	102.000
5.	2023	105.000

(Sumber: Statista dan HIS Markit (S&P Global, 2023).

Tabel 1.11 Data Ekstrapolasi n-butiraldehid di Kawasan Jerman

No.	Tahun	Konsumsi (Ton/Tahun)
1.	2025	117.000
2.	2026	121.000
3.	2027	125.000
4.	2028	128.000

(Sumber : Data Ekstrapolasi, 2025).

Tabel 1.11 menyajikan hasil perhitungan proyeksi konsumsi n-butiraldehid di kawasan Jerman untuk periode tahun 2025 hingga 2028. Berdasarkan data tersebut, diperkirakan terjadi peningkatan konsumsi secara bertahap dari 117.000 ton pada tahun 2025 hingga mencapai 128.000 ton pada tahun 2028. Tren ini menunjukkan bahwa permintaan terhadap n-butiraldehid di wilayah tersebut diprediksi akan terus tumbuh seiring dengan perkembangan industri yang menggunakan senyawa ini sebagai bahan baku.

1.6.3 Data Kapasitas Produksi Propilen di Indonesia

Data kapasitas produksi propilen di Indonesia sebagai bahan baku utama dalam pembuatan n-butiraldehid. Informasi dalam tabel ini sangat penting untuk menggambarkan potensi industri petrokimia nasional, khususnya dalam hal penyediaan bahan baku propilen yang krusial untuk berbagai produk turunan seperti polipropilen, akrilonitril, dan n-butiraldehid melalui proses hidroformilasi. Pertumbuhan kapasitas produksi yang konsisten mencerminkan upaya Indonesia dalam mengurangi ketergantungan impor dan memperkuat kapasitas hilirisasi industri kimia domestik.

Tabel 1.12 Data Produksi Propilen di PT. Pertamina UP IV

No.	Tahun	PT. Pertamina UP IV (Ton/Tahun)
1.	2019	145.000
2.	2020	153.000
3.	2021	162.000
4.	2022	172.000
5.	2023	180.000

(Sumber: Badan Pusat Statistik, BPS (tahun 2024).

Tabel 1.12 menyajikan data kapasitas produksi propilen di Indonesia dari tahun 2019 hingga 2023. Berdasarkan tabel tersebut, produksi propilen mengalami peningkatan setiap tahunnya, dimulai dari 145.000 ton pada tahun 2019 dan mencapai 180.000 ton pada tahun 2023. Kenaikan ini menunjukkan tren pertumbuhan yang cukup stabil, dengan rata-rata peningkatan sekitar 8.000–10.000 ton per tahun. Data ini bersumber dari lembaga terpercaya, yaitu Statista dan HIS Markit (S&P Global, 2023), yang sering digunakan dalam analisis industri kimia global.

1.6.4 Data Kapasitas Produksi Gas Sintesa di Indonesia

Pertumbuhan kapasitas ini mengindikasikan bahwa industri dalam negeri terus melakukan ekspansi untuk menjawab permintaan yang semakin besar, terutama pada sektor-sektor strategis yang bergantung pada pasokan gas sintesa. Peningkatan produksi tersebut juga berpotensi mendukung program substitusi impor dan memperkuat kemandirian energi berbasis gas di Indonesia. Dengan tren seperti ini, Indonesia memiliki peluang besar untuk meningkatkan nilai tambah sumber daya alam melalui optimalisasi gas sintesa sebagai komponen utama dalam proses produksi berbasis gas.

Tabel 1.13 Data Produksi Gas Sintesa di PT. Pertamina UP IV

No.	Tahun	PT. Pertamina UP IV (Ton/Tahun)
1.	2019	300.000
2.	2020	315.000
3.	2021	331.000
4.	2022	350.000
5.	2023	368.000

(Sumber: Badan Pusat Statistik, BPS (tahun 2024).

Tabel 1.13 menyajikan data kapasitas produksi gas sintesa di Indonesia selama lima tahun terakhir, mulai dari tahun 2019 hingga 2023. Berdasarkan data tersebut, produksi gas sintesa menunjukkan tren peningkatan dari 300.000 ton pada tahun 2019 menjadi 368.000 ton pada tahun 2023. Kenaikan ini berlangsung secara bertahap setiap tahunnya, mencerminkan adanya penguatan kapasitas produksi

dalam negeri seiring dengan meningkatnya kebutuhan terhadap gas sintesa sebagai bahan baku industri kimia, energi, dan pupuk.

1.7 Pemilihan Lokasi Pabrik

Pemilihan lokasi pabrik secara geografis dapat memberikan pengaruh yang besar terhadap lancarnya kegiatan industri. Karena berkaitan langsung dengan nilai ekonomi pabrik yang akan didirikannya di Balongan Indramayu, Jawa Barat, Dipilihnya lokasi Balongan adalah dengan pertimbangan sebagai berikut:

1. Penyediaan Bahan Baku

Propilen dan Syngas sebagai bahan baku pembuatan butiraldehid diperoleh dari PT. Pertamina UP VI yang berlokasi di Balongan Indramayu.

2. Pemasaran

Butiraldehid banyak digunakan sebagai solvent sangat potensial untuk pulau Jawa dimana pabrik- plastik, deterjen dan pelapis banyak didirikan. Yang berarti memperpendek jarak antara pabrik yang diproduksi dengan pabrik yang membutuhkan butiraldehid.

3. Transportasi

Pengangkutan bahan baku menuju Balongan cukup mudah mengingat jalan raya Pantura sudah cukup baik dan lancar. Selain itu juga untuk pemasaran produk daerah Balongan cukup strategis, karena letaknya yang dekat dengan kawasan-kawasan industri seperti Cilegon, Cikampek, Purwakarta, Jakarta dan dekat dengan Pulau Jawa Tengah dan Jawa Timur. Fasilitas transportasi laut seperti pelabuhan tersedia dekat dengan lokasi pabrik

4. Tenaga Kerja

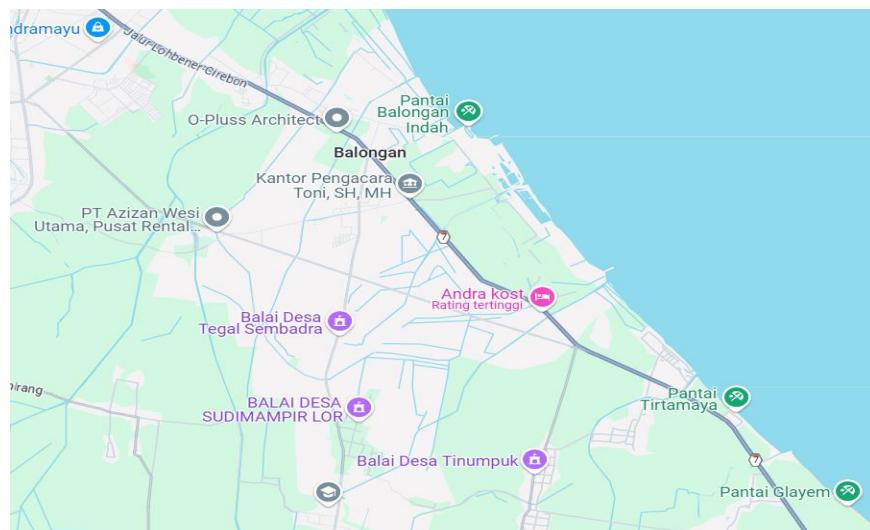
Kawasan industri terletak di daerah Jawa yang sarat dengan pendidikan formal maupun non formal dimana banyak dihasilkan tenaga kerja ahli maupun non ahli, sehingga tenaga kerja mudah didapatkan.

5. Utilitas

Balongan, Indramayu merupakan daerah industri yang sudah mapan, maka penyediaan utilitas tidak mengalami kesulitan. Pelabuhan dan sungai untuk memenuhi kebutuhan air.

6. Kemungkinan Perluasan Pabrik

Dengan didirikannya pabrik di Balongan Indramayu diharapkan dapat diadakan perluasan ditahun mendatang mengingat lahan yang tersedia masih memungkinkan.



Gambar 1.2 Lokasi Pabrik

Lokasi pabrik direncanakan di Balongan, Indramayu, Jawa Barat karena dekat dengan sumber bahan baku (PT. Pertamina UP VI), akses transportasi yang baik, serta wilayah industri yang strategis untuk distribusi produk dan potensi perluasan di masa depan.

1.8 Seleksi Pemilihan Proses

Terdapat dua metode utama dalam produksi n-butiraldehid yang umum digunakan dalam industri, yaitu proses hidroformilasi dan proses dehidrogenasi. Kedua proses ini memiliki prinsip reaksi, kondisi operasi, serta efisiensi yang berbeda, dan dipilih berdasarkan ketersediaan bahan baku, biaya operasional, serta kebutuhan produk turunan yang diinginkan. Proses dehidrogenasi melibatkan konversi n-butanol menjadi n-butiraldehid melalui pelepasan hidrogen, sedangkan proses hidroformilasi merupakan reaksi adisi gas sintesis (CO dan H₂) ke dalam alkena (propilena) dengan bantuan katalis logam transisi. Penjelasan lebih rinci mengenai kedua proses tersebut disajikan sebagai berikut.

1.8.1 Proses Hidroformilasi (*Oxo-Reaction*)

Proses hidroformilasi, atau yang dikenal juga sebagai reaksi *OXO*, merupakan salah satu proses penting dalam industri petrokimia yang digunakan untuk mengubah alkena menjadi aldehida. Reaksi ini melibatkan penambahan satu molekul karbon monoksida (CO) dan satu molekul hidrogen (H₂) ke alkena dengan bantuan katalis logam transisi. Dalam konteks produksi n-butiraldehid, bahan baku utama yang digunakan adalah propilena, yang akan bereaksi dengan gas sintesis (campuran CO dan H₂) untuk menghasilkan campuran n-butiraldehid dan iso-butiraldehid.

Secara umum, reaksi hidroformilasi propilena berlangsung sebagai berikut:



Reaksi ini bersifat eksotermik, sehingga pelepasan panas perlu dikendalikan agar tidak memengaruhi selektivitas produk. Produk utama yang diinginkan adalah n-butiraldehid karena memiliki nilai ekonomi dan aplikasi industri yang lebih tinggi, sedangkan iso-butiraldehid terbentuk sebagai produk samping.

Katalis yang digunakan dalam proses hidroformilasi sangat mempengaruhi efisiensi dan selektivitas reaksi. Dua jenis katalis utama yang umum digunakan adalah kobalt (Co) dan rhodium (Rh). Katalis kobalt memerlukan tekanan dan suhu tinggi untuk beroperasi (200–300 atm, 150–200°C), namun memiliki selektivitas yang rendah terhadap n-butiraldehid. Sementara itu, katalis rhodium mampu bekerja pada tekanan dan suhu yang lebih rendah (10–30 atm, 80–120°C) serta memberikan selektivitas yang lebih tinggi terhadap n-butiraldehid, terutama jika digunakan bersama ligan fosfin seperti triphenylphosphine.

Mekanisme reaksi hidroformilasi secara umum terdiri dari beberapa tahap penting. Pertama, molekul alkena berikatan dengan kompleks logam dari katalis. Selanjutnya, karbon monoksida dan hidrogen berikatan pada pusat logam dan mengalami migrasi ke ikatan rangkap alkena, membentuk kompleks alkil-karbonil. Proses ini diikuti dengan adisi hidrogen yang akhirnya menghasilkan aldehida, lalu produk dilepaskan dari kompleks dan katalis kembali ke bentuk awalnya untuk digunakan kembali dalam siklus reaksi.

Secara industri, proses hidroformilasi dimulai dengan pencampuran propilena, karbon monoksida, dan hidrogen dalam rasio molar tertentu. Campuran ini dialirkan bersama pelarut dan katalis rhodium ke dalam reaktor homogen. Reaksi berlangsung pada suhu dan tekanan terkontrol untuk menjaga konversi tinggi dan selektivitas terhadap n-butiraldehid. Produk keluar dari reaktor berupa campuran aldehida, pelarut, sisa gas reaktan, dan katalis.

Tahap selanjutnya adalah pemisahan fasa gas dan cair. Gas yang tidak bereaksi (CO dan H_2) dapat dipisahkan dan dikembalikan ke dalam sistem, sedangkan fasa cair yang mengandung aldehida, pelarut, dan katalis diarahkan ke unit pemulihan. Katalis dan pelarut dipisahkan untuk didaur ulang ke reaktor, sehingga efisiensi proses tetap terjaga dan biaya operasional dapat ditekan. Campuran aldehida kemudian dimurnikan melalui distilasi untuk memisahkan n-butiraldehid sebagai produk utama dan iso-butiraldehid sebagai produk samping.

Proses hidroformilasi menggunakan katalis rhodium memiliki berbagai keunggulan, seperti efisiensi konversi tinggi, selektivitas produk yang baik, kondisi operasi yang lebih ringan, serta kemudahan dalam daur ulang katalis. Hal ini membuat proses ini lebih ekonomis dan ramah lingkungan dibandingkan dengan proses yang menggunakan katalis kobalt. Oleh karena itu, dalam prarancangan pabrik ini, dipilih katalis rhodium sebagai katalis utama untuk memastikan produksi n-butiraldehid yang optimal.

1.8.2 Proses Dehidrogenasi

Proses dehidrogenasi adalah reaksi kimia yang melibatkan penghilangan atom hidrogen dari suatu senyawa organik. Dalam konteks industri kimia, dehidrogenasi digunakan untuk mengubah alkohol menjadi aldehida atau keton. Pada pembuatan n-butiraldehid, proses dehidrogenasi biasanya dilakukan terhadap n-butanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) untuk menghasilkan n-butiraldehid ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CHO}$) sebagai produk utama, disertai pelepasan gas hidrogen (H_2) sebagai produk samping.

Reaksi dehidrogenasi n-butanol menjadi n-butiraldehid secara kimia dapat dituliskan sebagai berikut:



Reaksi ini bersifat endotermik, artinya membutuhkan suplai panas agar dapat berlangsung dengan baik. Karena itu, reaksi ini biasanya dijalankan pada suhu tinggi, antara 300°C hingga 400°C , dan menggunakan katalis logam seperti tembaga (Cu), perak (Ag), seng (Zn), atau kromium (Cr_2O_3) untuk meningkatkan laju reaksi dan efisiensi konversi.

Secara industri, proses dehidrogenasi n-butanol dilakukan dalam reaktor tubular atau fixed-bed reactor yang berisi katalis padat. Umpam berupa uap n-butanol dialirkan secara kontinu ke dalam reaktor yang dipanaskan. Di dalam reaktor, terjadi reaksi dehidrogenasi di permukaan katalis, yang mengubah n-butanol menjadi n-butiraldehid dan gas hidrogen. Campuran gas keluar reaktor kemudian didinginkan untuk mengembunkan aldehyda, sementara hidrogen yang tidak terkondensasi akan dipisahkan secara fisik dan dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar atau bahan baku proses lain.

Setelah keluar dari reaktor, campuran produk dikondensasikan dalam heat exchanger atau kondensor untuk memisahkan n-butiraldehid dari fase gas. Selanjutnya, dilakukan pemurnian melalui proses distilasi untuk memisahkan n-butiraldehid dari air, sisa n-butanol yang tidak bereaksi, serta zat pengotor lainnya. Sisa n-butanol dapat dikembalikan ke reaktor sebagai resirkulasi untuk meningkatkan efisiensi bahan baku.

Dengan demikian, proses dehidrogenasi merupakan salah satu alternatif rute produksi n-butiraldehid yang cukup efisien dari sisi bahan baku, namun membutuhkan kontrol operasi yang baik terutama terkait suhu, pemilihan katalis, dan penanganan produk samping berupa gas hidrogen. Proses ini banyak digunakan terutama jika sumber n-butanol tersedia dalam jumlah besar sebagai produk samping dari industri lain, seperti fermentasi atau hidrogenasi butiraldehid.

Perbandingan proses pembuatan N-Butiraldehid dapat dilihat pada table berikut:

Tabel 1.14 Perbandingan Proses Pembuatan N-Butiraldehid

Aspek	Dehidrogenasi	Hidroformilasi
Bahan Baku	n-Butanol	Propilena, CO, dan H ₂ (gas sintesis)
Reaksi	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CHO} + \text{H}_2$	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2 + \text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CHO}$ (+ iso)
Sifat Reaksi	Endotermik (butuh panas)	Eksotermik (melepaskan panas)
Selektivitas	70-85 %	90–95 %
Katalis	Cu, ZnO, Cr ₂ O ₃	Rhodium (Rh), atau Kobalt (Co)
Suhu Operasi	300–400°C	80–150°C
Tekanan Operasi	1–5 atm (rendah)	10–30 atm (Rh), 150–300 atm (Co)
Produk Samping	Gas hidrogen (H ₂)	Iso-butiraldehid
Jenis Reaktor	Fixed Bed Reactor (Reaktor unggun tetap) atau Fluidized Bed Reactor	Plug Flow Reactor (PFR) atau Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) untuk sistem cair-gas
Konversi	80-90 %	90–98 %
Kelebihan	Bahan baku lebih stabil, tidak perlu CO/H ₂	Selektivitas tinggi, kondisi operasi lebih ringan
Kekurangan	Konsumsi energi tinggi, penanganan H ₂	Butuh gas sintesis dan katalis mahal

(Sumber : Matsinha, L. C, 2019).

Berdasarkan perbandingan antara proses dehidrogenasi dan hidroformilasi dalam pembuatan n-butiraldehid, dapat disimpulkan bahwa proses hidroformilasi lebih unggul dan lebih banyak digunakan dalam industri. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, di antaranya selektivitas yang lebih tinggi terhadap produk n-

butiraldehid, kondisi operasi yang lebih ringan (suhu dan tekanan lebih rendah), serta efisiensi proses yang lebih baik terutama saat menggunakan katalis rhodium. Selain itu, bahan baku propilena dan gas sintesis umumnya lebih tersedia dan lebih murah dibandingkan n-butanol, terutama dalam skala besar. Proses hidroformilasi juga menghasilkan produk samping yang minimal dan memungkinkan daur ulang katalis secara efisien, sehingga lebih ekonomis dan ramah lingkungan dibandingkan proses dehidrogenasi yang bersifat endotermik dan membutuhkan energi tinggi.

1.8.3 Perbandingan Proses Hidroformilasi Katalis Cobalt (Co), Rhodium (Rh), dan Nax-Zeolit.

Perbandingan Proses Hidroformilasi Katalis Cobalt (Co), Rhodium (Rh), dan Nax-Zeolit. Proses pembuatan produk kimia dengan bantuan katalis umumnya memberikan hasil yang lebih efisien dan selektif dibandingkan proses tanpa katalis. Pada awalnya, proses hidroformilasi untuk pembentukan n-butiraldehid dilakukan dengan menggunakan katalis cobalt (Co). Namun, seiring berkembangnya teknologi, katalis cobalt dinilai kurang efisien dari segi kondisi operasi, selektivitas produk, dan konsumsi energi. Oleh karena itu, katalis rhodium (Rh) mulai digunakan karena menawarkan keunggulan dalam hal aktivitas yang lebih tinggi, selektivitas yang lebih baik terhadap produk n-butiraldehid, serta kondisi operasi yang lebih ringan. Selain kedua katalis tersebut, penelitian terbaru menunjukkan bahwa katalis berbasis Nax-Zeolit juga memiliki potensi besar dalam proses hidroformilasi. Katalis ini mampu memberikan kestabilan yang tinggi, dapat digunakan kembali (reusability), serta lebih ramah lingkungan, sehingga menjadi alternatif menjanjikan untuk pengembangan proses yang lebih berkelanjutan. Berikut ini adalah perbandingan penggunaan katalis cobalt, rhodium dan Nax-Zeolit:

1.8.4 Reaksi Hidroformilasi Dengan Katalis Nax-Zeolit

Proses hidroformilasi adalah reaksi kimia yang digunakan untuk mengubah alkena menjadi aldehida dengan menambahkan gas karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂) di hadapan katalis. Dalam produksi n-butiraldehid, reaksi ini dilakukan dengan menggunakan propilena (C₃H₆) sebagai alkena yang bereaksi dengan CO dan H₂ untuk menghasilkan n-butiraldehid (C₄H₈O). Proses ini memiliki

kondisi operasi yang sangat tinggi, yaitu pada suhu dan tekanan yang terlalu tinggi. Salah satu katalis yang digunakan dalam proses ini adalah Nax-zeolit, yaitu zeolit yang telah dimodifikasi dengan natrium (Na^+) untuk meningkatkan kestabilan dan aktivitas katalitiknya.

Penggunaan katalis Nax-zeolit dalam reaksi hidroformilasi merupakan pendekatan yang relatif baru dan menarik karena katalis ini berbasis zeolit (mineral aluminosilikat mikropori) yang telah dimodifikasi dengan ion natrium (Na^+). Struktur pori dari zeolit, khususnya tipe X, memiliki ukuran dan geometri yang dapat mempengaruhi difusi molekul dan arah reaksi.

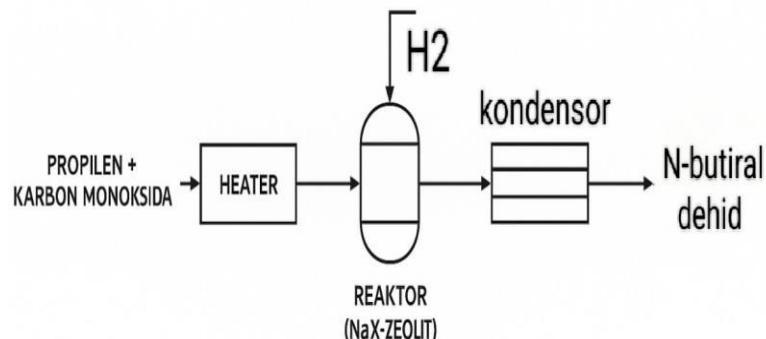
Dalam sistem katalisis ini, Nax-zeolit dapat berperan sebagai katalis heterogen yang stabil terhadap suhu tinggi dan tidak larut dalam media reaksi, sehingga memudahkan pemisahan dan regenerasi katalis. Mekanisme reaksi yang melibatkan Nax-zeolit mencakup adsorpsi propilena ke permukaan katalis, diikuti oleh koordinasi CO dan H_2 . Reaksi kemudian berlanjut melalui pembentukan kompleks logam-karbonil yang memungkinkan pembentukan ikatan C–C baru (antara propilena dan karbonil) dan pembentukan gugus aldehida. Pori-pori dari Nax-zeolit memungkinkan pembentukan produk linier secara selektif dengan menghambat terbentuknya produk bercabang secara sterik. Pengaruh suhu, tekanan parsial CO dan H_2 , serta rasio molar bahan baku sangat berpengaruh terhadap laju reaksi dan distribusi produk. Secara umum, reaksi hidroformilasi dilakukan pada suhu sekitar 100–150 °C dan tekanan total 1–10 MPa untuk mencapai konversi dan selektivitas yang optimal. Nax-zeolit juga memperlihatkan ketahanan yang baik terhadap deaktivasi dibandingkan dengan katalis homogen berbasis logam transisi seperti rhodium atau kobalt. Reaksi yang terjadi adalah reaksi katalitik Nax-zeolit, reaksinya eksotermis dan *irreversible*, panas yang dihasilkan diserap dengan pendingin. Reaksi keseluruhannya adalah sebagai berikut:



Penggunaan Nax-zeolit dalam hidroformilasi memberikan keunggulan tambahan dari sisi lingkungan dan ekonomi karena dapat mengurangi limbah katalis logam berat, memungkinkan operasi dalam sistem berkelanjutan, dan

menurunkan biaya operasional melalui regenerasi katalis (Pena, M. A., & Fierro, J. L. G., 2021).

Adapun diagram blok proses pembuatan butiraldehid dengan reaksi hidroformilasi dengan katalis *nax-zeolit* dapat dilihat pada Gambar 1.2



Gambar 1.3 Diagram Blok Proses Pembuatan Butiraldehid Dengan Reaksi Hidroformilasi Dengan Katalis *Nax-Zeolit*

Tabel 1.14 Analisa Ekonomi Awal Proses Hidroformilasi (*oxo-reaction*) Menggunakan katalis *Nax-Zeolit*

	Bahan Baku			Produk	
	Propilen	Gas sintesa	<i>Nax-Zeolit</i>	N-Butiraldehid	Iso-Butiraldehid
Berat Molekul	42,08 gr/mol	20,8 gr/mol		72,104 gr/mol	72,104 gr/mol
Harga Per Kg	Rp. 12.500	Rp. 18.000	400.000	Rp. 35.000	Rp. 24.000
Kebutuhan	$\begin{aligned} 1\text{ mol} \times 42,08 \text{ gr/mol} \\ = 42,08 \text{ gr} \\ = 0,04208 \text{ kg} \end{aligned}$	$\begin{aligned} 1 \text{ mol} \times 20,8 \text{ gr/mol} \\ = 20,8 \text{ gr} \\ = 0,0208 \text{ kg} \end{aligned}$		$\begin{aligned} 1 \text{ mol} \times 72,104 \text{ gr/mol} \\ = 72,104 \text{ gr} \\ = 0,072104 \text{ kg} \end{aligned}$	$\begin{aligned} 1 \text{ mol} \times 72,104 \text{ gr/mol} \\ = 72,104 \text{ gr} \\ = 0,072104 \text{ kg} \end{aligned}$

Harga kg	0,04208	0,0208 kg	0,0001kg	0,072104 kg	0,072104 kg
Total	kg × Rp.	Rp.18.000	×400.000	× Rp 35.000	× Rp 24.000
	12.500	= Rp. 374	= 40	= Rp 2.523	= Rp 1.730
	= Rp. 526				
Analisa	= Produk – Reaktan				
Ekonomi	$ \begin{aligned} &= (\text{Rp. } 2.523 + \text{Rp. } 1.730) - (\text{Rp. } 526 + \text{Rp. } 374 + \text{Rp. } 40) \\ &= \text{Rp. } 4.253 - \text{Rp. } 1.040 \\ &= \text{Rp. } 3.213/\text{kg} \\ &= \text{Rp. } 321.300/\text{Ton} \end{aligned} $				

1.8.5 Reaksi Hidroformilasi Dengan Katalis Cobalt

Reaksi hidroformilasi merupakan proses kimia penting dalam industri petrokimia yang melibatkan penambahan gas karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H_2) ke dalam senyawa alkena, dalam hal ini propilena (C_3H_6), untuk membentuk produk utama berupa n-butiraldehid ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$). Dalam reaksi ini, digunakan katalis logam transisi, dan salah satu katalis yang telah lama digunakan secara komersial adalah kobalt (Co). Kobalt biasanya digunakan dalam bentuk kompleks kobalt karbonil, seperti $\text{HCo}(\text{CO})_4$ atau $\text{Co}_2(\text{CO})_8$, yang dapat larut dalam medium reaksi dan bertindak sebagai katalis homogen. Meskipun katalis kobalt memiliki aktivitas lebih rendah dibandingkan rhodium, kelebihan utamanya adalah biaya yang jauh lebih rendah, sehingga masih relevan secara ekonomi, khususnya untuk skala besar.

Proses reaksi dengan katalis kobalt berlangsung melalui beberapa tahap, dimulai dari pembentukan kompleks kobalt karbonil aktif, diikuti oleh koordinasi propilena pada pusat logam, kemudian adisi CO dan H_2 . Reaksi ini dilanjutkan dengan pembentukan kompleks alkil-kobalt, yang kemudian mengalami reaksi migrasi hidrid dan akhirnya menghasilkan n-butiraldehid serta melepaskan kembali katalis aktif ke siklus reaksi. Dalam sistem katalis kobalt, kondisi operasi umumnya melibatkan tekanan tinggi (197 atm - 294 atm) dan suhu antara 150–200 °C agar kobalt tetap dalam bentuk kompleks aktif dan mencegah pengendapan logam bebas. Di bawah kondisi ini, propilena bereaksi dengan CO dan H_2 membentuk n-butiraldehid ($\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CHO}$) sebagai produk utama. Namun, karena sifat struktur propilena yang simetris, reaksi juga menghasilkan isobutiraldehid (CH_3-

$\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CHO}$ sebagai produk samping dalam jumlah kecil. Reaksi keseluruhannya adalah sebagai berikut:

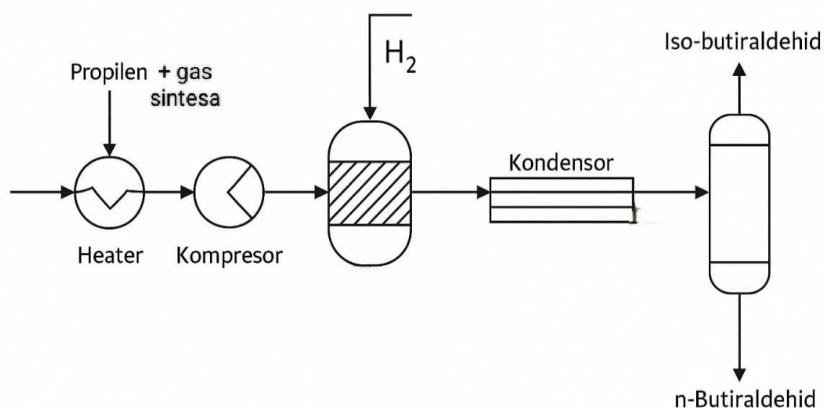


Salah satu kelemahan katalis kobalt adalah selektivitasnya terhadap produk linier seperti n-butiraldehid cenderung lebih rendah dibanding rhodium. Oleh karena itu, upaya modifikasi dilakukan, misalnya dengan penambahan ligan fosfin seperti triphenylphosphine (PPh_3), untuk meningkatkan selektivitas terhadap n-butiraldehid dan menstabilkan kompleks kobalt. Namun, penggunaan ligan fosfin menambah biaya dan kompleksitas proses. Selain itu, sistem kobalt memiliki tantangan dari sisi pemulihan dan daur ulang katalis, karena katalis homogen sulit dipisahkan dari produk dan pelarut.

Walau demikian, hidroformilasi dengan katalis kobalt tetap banyak digunakan, terutama dalam skenario industri di mana biaya katalis menjadi pertimbangan utama. Beberapa penelitian terbaru juga mulai mengembangkan sistem katalis kobalt heterogen dengan mendukung kobalt pada permukaan padat seperti zeolit, silika, atau karbon aktif untuk mengatasi tantangan pemisahan dan meningkatkan keberlanjutan proses (Thudor, 2002).

pembuatan n-butanol, pelarut, plastik, dan bahan aditif.

Adapun diagram blok proses pembuatan butiraldehid dengan reaksi hidroformilasi dengan katalis cobalt dapat dilihat pada Gambar 1.3



Gambar 1.4 Diagram Blok Proses Pembuatan Butiraldehid Dengan Reaksi Hidroformilasi Dengan Katalis Cobalt

Tabel 1.15 Analisa Ekonomi Awal Proses Hidroformilasi (*oxo-reaction*) Menggunakan katalis Cobalt

	Bahan Baku			Produk	
	Propilen	Gas sintesa	Cobalt	N-Butiraldehid	Iso-Butiraldehid
Berat Molekul	42,08 gr/mol	20,8 gr/mol		72,104 gr/mol	72,104 gr/mol
Harga Per Kg	Rp. 12.500	Rp. 18.000	1.500.000	Rp. 35.000	Rp. 24.000
Kebutuhan n	1mol×42,08 gr/mol = 42,08 gr = 0,04208 kg	1 mol × 20,8 gr/mol = 20,8 gr = 0,0208 kg	0,0001kg	1 mol × 72,104 gr/mol = 72,104 gr = 0,072104 kg	1 mol × 72,104 gr/mol = 72,104 gr = 0,072104 kg
Harga Total	0,04208 kg × Rp. 12.500 = Rp. 526	0,0208 kg × Rp. 18.000 = Rp. 374	0,0001kg × 1.500.000 0 = 150	0,072104 kg × Rp 35.000 = Rp 2.523	0,072104 kg × Rp 24.000 = Rp 1.730
Analisa Ekonomi	$= \text{Produk} - \text{Reaktan}$ $= (\text{Rp. } 2.523 + \text{Rp. } 1.730) - (\text{Rp. } 526 + \text{Rp. } 374 + \text{Rp. } 150)$ $= \text{Rp. } 4.253 - \text{Rp. } 1.150$ $= \text{Rp. } 3.103/\text{kg}$ $= \text{Rp. } 310.300/\text{Ton}$				

1.8.6 Reaksi hidroformilasi dengan katalis Rhodium melalui proses Oxo- Reaction

Proses ini memiliki kondisi operasi yang sangat tinggi, yaitu pada suhu dan tekanan yang terlalu tinggi. Proses produksi butiraldehid menggunakan metode hidroformilasi katalis Rhodium dapat dibagi dalam beberapa tahap, yaitu:

1. Uraian Proses

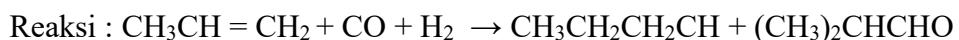
Pembuatan n-butiraldehid dari propilen dan gas sintesis dengan proses Hidroformilasi (*oxo-reaction*) yaitu meliputi:

2. Persiapan Bahan Baku

Reaktan yang berupa propilen yang diperoleh dari hasil samping pengilangan minyak bumi yang berwujud cair disimpan dalam tangki dengan suhu awal -48°C dan tekanan 1 atm dipanaskan dengan menggunakan *Heat Exchanger* untuk menaikkan temperatur sebelum masuk reaktor terlebih dahulu dinaikkan tekanannya mencapai 10 atm dengan menggunakan kompressor. Gas campuran terdiri dari gas CO dan H₂ dengan perbandingan 49:51 diperoleh dari PT Pertamina UP VI yang berlokasi di jalan Industri Balongan Indramayu dengan suhu awal 28°C dan tekanan awal 1 atm. Sebelum dimasukkan ke dalam reaktor. Campuran gas ini terlebih dulu dinaikkan tekanannya mencapai 10 atm dengan menggunakan Kompressor. Setelah semua persiapan bahan baku selesai di proses, reaktan dan gas campuran dimasukkan ke dalam reaktor PFR maka tahap reaksi akan dimulai.

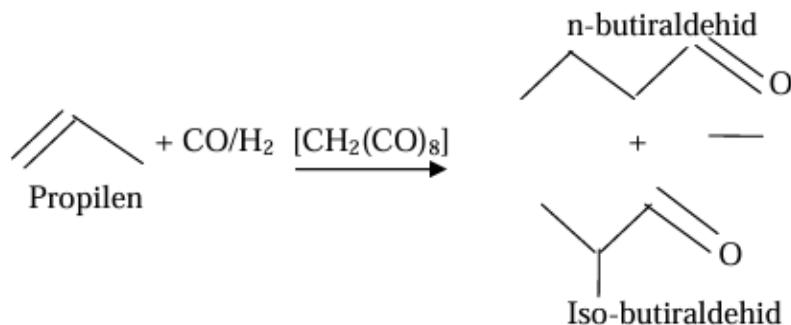
3. Tahap Reaksi

Propilen dan gas sintesis (CO dan H₂) yang digunakan sebagai reaktan memiliki perbandingan 1:1:1



Propilen gas sintesis n-butiraldehid iso-butiraldehid

Propilen gas sintesis n-butiraldehid iso-butiraldehid Reaktan berupa propilen dan gas sintesis dimasukan kedalam Reaktor R dengan menggunakan kompressor. Didalam reaktor akan terjadi percampuran dari semua bahan-bahan yang digunakan. Reaksi yang didalam reaktor yaitu reaksi eksotermis dengan konversi reaktan 99,99% reaksi yang terjadi adalah:



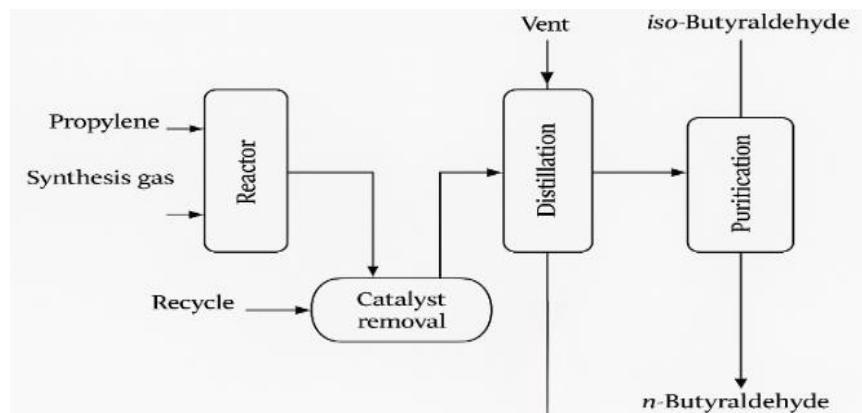
Gambar 1.6 Reaksi pembentukan butiraldehid (n/i) (Agar, 2003).

Katalis yang digunakan adalah katalis Rhodium yang berikatan dengan ligannya yaitu PPh₃ (*Triphenylphospin*) dan dimodifikasi dengan SiO₂ (Silika) yang telah di-packing ke dalam *plug plow reactor* PFR. Dengan menggunakan katalis ini dan kondisi operasi bertemperatur 60°C dan tekanan 10 atm. Selanjutnya didinginkan dengan menggunakan Cooler (CO) hal ini dilakukan untuk mencairkan produk (n- dan i-butiraldehid) sehingga produk (n dan i-butiraldehid) dan reaktan yang berupa gas (hidrogen) dapat terpisahkan berdasarkan fasanya. Setelah didinginkan produk dialirkkan ke Absorber (ABS) yang bertujuan untuk memisahkan campuran propilen dan gas sintesis dari produk dengan menggunakan pelarut H₂O. Produk yang dihasilkan terdiri dari campuran n- dan i-butiraldehid. Produk ini akan dimurnikan berdasarkan perbedaan titik didihnya pada kolom destilasi (MD). Sebelum dimurnikan pada kolom destilasi, campuran n- dan i-butiraldehid dipanaskan dengan menggunakan Heater (He) untuk mencapai suhu operasi pada kolom destilasi.

4. Tahap Pemurnian Produk

Di dalam kolom distilasi akan terjadi proses pemisahan dari larutan tersebut berdasarkan titik didihnya. Produk yang diinginkan adalah n-butiraldehid dengan kadar 95%. Umpulan masuk adalah n dan i-butiraldehid. Produk atas dari distilasi dikondensasi dan dihasilkan n- dan i-butiraldehid dengan kadar i-butiraldehid lebih banyak. Hasil dari kondensasi dialirkkan ke akumulator. Dari akumulator, aliran sebagian di refluks ke kolom distilasi dan sebagian lagi dipompakan ke *Heat Exchanger* (HE) sehingga suhu i-butiraldehid mencapai suhu kamar (25°C) dan kemudian dipompakan ke tangki penyimpanan (V) untuk disimpan. Produk bawah

dari kolom destilasi dipanaskan pada reboiler. Sebagian produk dikembalikan ke kolom destilasi dan sebagian lagi dipompakan ke *Heat Exchanger* (HE) sehingga suhu n-butiraldehid mencapai 25°C. Selanjutnya n-butiraldehid dipompa dan disimpan dalam tangki penyimpanan V-100.



Gambar 1.5 Diagram Blok Proses Pembuatan Butiraldehid Dengan Reaksi Hidroformilasi Dengan Katalis Rhodium

Tabel 1.16 Analisa Ekonomi Awal Proses Hidroformilasi (*oxo-reaction*) Menggunakan katalis Rhodium

	Bahan Baku			Produk	
	Propilen	Gas sintesa	Rhodium	N-Butiraldehid	Iso-Butiraldehid
Berat Molekul	42,08 gr/mol	20,8 gr/mol		72,104 gr/mol	72,104 gr/mol
Harga Per Kg	Rp. 12.500	Rp. 18.000	10.000.000	Rp. 35.000	Rp. 24.000
Kebutuhan	1 mol mol×42,0 8 gr/mol = 42,08 gr = 0,04208 kg	1 mol × 20,8 gr/mol = 20,8 gr = 0,0208 kg	0,0001kg	1 mol × 72,104 gr/mol = 72,104 gr = 0,072104 kg	1 mol × 72,104 gr/mol = 72,104 gr = 0,072104 kg

Harga Total	0,04208 kg × Rp. 12.500 = Rp. 526	0,0208 kg Rp.18.00 0 = Rp. 374	0,0001kg ×10.000.0 0 0 = 1000	0,072104 kg × Rp 35.000 = Rp 2.523	0,072104 kg × Rp 24.000 = Rp 1.730
Analisa Ekonomi	$ \begin{aligned} &= \text{Produk} - \text{Reaktan} \\ &= (\text{Rp. } 2.523 + \text{Rp. } 1.730) - (\text{Rp. } 526 + \text{Rp. } 374 + \text{Rp. } 1000) \\ &= \text{Rp. } 4.253 - \text{Rp. } 1.900 \\ &= \text{Rp. } 2.353 / \text{kg} \\ &= \text{Rp. } 235.300 / \text{Ton} \end{aligned} $				

1.8.7 Perbandingan Proses Pembuatan N-Butiraldehid

Berdasarkan ketiga proses diatas ketiga proses tersebut memiliki parameter yang berbeda-beda. Berdasarkan perbedaan parameter-parameter tersebut sistem pembuatan N-Butiraldehid yang ada sebagaimana dilihat pada Tabel 1.17

Tabel 1.17 Perbandingan Proses Pembuatan N-Butiraldehid

Parameter	Proses I	Proses II	Proses III
Katalis Konversi	<i>Nax-Zeolit</i>	<i>Cobalt tetracarbonyl Hydride</i>	<i>Rhodium triphenylphosphine</i>
Selektivitas	80–90%	60–75%	85–95%
Efisiensi Energi	Tinggi (kondisi moderat + mudah dipisahkan)	Rendah (butuh suhu & tekanan tinggi)	Tinggi (reaksi berlangsung pada kondisi ringan)
Aspek Operasi:			
a. Suhu	150°C-200 °C	150 °C-180 °C	65 °C-80 °C
b. Tekanan	200 atm-300 atm	197 atm -294 atm	10 atm – 30 atm
Katalis	Mudah didapat	Sulit didapat	Mudah didapat

(Sumber : Matsinha, L. C, 2019).

Dari tabel 1.3 maka dipilih proses hidroformilasi dengan katalis *rhodium triphenylphosphine*, dengan alasan Proses ini yang paling banyak digunakan dalam

industri sehingga memudahkan pencairan referensi. Kondisi operasi yang mendekati kondisi lingkungan sehingga hemat energi proses Reaksi hidroformilasi dengan katalis Rhodium melalui proses *Oxo – Reaction*.

Tiga proses hidroformilasi untuk produksi n-butiraldehid memiliki keunggulan dan kelemahan masing-masing. Proses dengan katalis Nax-Zeolit memiliki biaya katalis yang rendah namun memerlukan suhu dan tekanan sangat tinggi (150–200°C dan 200–300 atm), sehingga kurang efisien secara energi. Proses dengan katalis Cobalt juga membutuhkan kondisi operasi tinggi (150–180°C dan 197–294 atm) dan memiliki selektivitas yang rendah terhadap n-butiraldehid (rasio n:i = 4:1), sehingga produk samping masih cukup banyak. Sementara itu, proses dengan katalis Rhodium menunjukkan performa terbaik dengan kondisi operasi ringan (65–80°C dan 10–30 atm), selektivitas (85–95%), dan selektivitas tinggi terhadap n-butiraldehid (rasio n:i = 16:1), menjadikannya pilihan yang paling efisien, hemat energi, dan sesuai untuk skala industri. Ketiga proses memiliki margin keuntungan ekonomi yang sama, namun secara keseluruhan, proses rhodium lebih unggul dari segi teknis dan lingkungan.